

CARACTERISTIQUES SPECTRALES DES SURFACES SABLEUSES DE LA REGION COTIERE NORD-OUEST DE L'EGYPTE: APPLICATION AUX DONNEES SATELLITAIRES SPOT

POUGET M. ¹, MADEIRA J ¹, LE FLOCH E. ², KAMAL S ³

RESUME

A l'occasion d'un travail récent sur l'utilisation des données satellitaires SPOT pour la cartographie des ressources renouvelables dans la région côtière nord-ouest de l'Egypte on a étudié les relations existant entre les états de surface et la luminance mesurée par les capteurs HRV. Comme il est classique en zone aride, on a pu vérifier l'influence de trois facteurs parmi les plus importants qui affectent cette luminance: la rugosité (pierrosité, touffes de végétation, microrelief créé par l'érosion éolienne et par les pratiques culturales, etc.), les constituants minéralogiques (calcaire, sable siliceux, croûte saline) et la couleur des sols

On se propose, à la suite de travaux récents (ESCADAFAL, 1989; MADEIRA et al,1990,1991), de préciser l'influence de certains constituants minéralogiques, et surtout de la couleur, par une étude des caractéristiques spectrales d'échantillons de sols appartenant à une géoséquence représentative de cette région d'Egypte. La géoséquence se caractérise par une couverture sableuse présentant une variation plus ou moins continue de la composition minéralogique (calcaire, quartz) et de la couleur entre deux termes extrêmes:

- depuis des sables très blancs (10YR8/2) et excessivement calcaires sur la dune littorale de calcaire oolithique.
- jusqu'à des sables siliceux rougeâtres (7,5YR7/6) d'origine éolienne et recouvrant les surfaces encroûtées du plateau continental.

La géoséquence est étudiée à deux niveaux:

- au niveau de 6 échantillons représentatifs de la couverture sableuse avec l'acquisition des spectres de réflectance diffuse dans la partie visible du spectre (entre 400 et 800 nm). Les coordonnées chromatiques HELMHOTZ, calculées à partir des spectres, permettent de déterminer un indice de rougeur IR (HEM) tel que défini par MADEIRA (réf.). Les valeurs croissantes de l'indice rendent compte du gradient de couleur lui même en relation avec une proportion croissante de sables siliceux rougeâtres.
- au niveau de l'image SPOT (10 avril 1987), la création et la visualisation du néocanal correspondant à un indice de rougeur SPOT:

¹Unité de Télédétection, centre ORSTOM de Bondy

²CEFE/CNRS, Montpellier

³Department of Botany, Alexandria University, Egypt.

$$IR (SPOT) = \frac{XS_2^2}{XS_1^3}$$
 apporte une information très pertinente sur la répartition spatiale des différentes surfaces sableuses en fonction de leur couleur et de leur composition minéralogique. Cet indice est ensuite comparé à un indice de couleur $IC (SPOT) = \frac{XS_2 - XS_1}{XS_2 + XS_1}$

Une validation de ces deux modèles empiriques est obtenue avec 26 sites tests qui conduisent à estimer l'influence des facteurs couleur et composition minéralogique tout en prenant en compte les autres paramètres de surface notamment la rugosité et localement l'humidité.

Dans le cadre d'une étude récente, utilisant les données satellitaires SPOT et portant sur la cartographie des ressources renouvelables de cette région côtière nord-ouest de l'Egypte (POUGET et al, 1989, 1990, 1991), on a pu mettre en évidence, et préciser pour une part, l'influence des principaux paramètres qui conditionnent les mesures radiométriques enregistrées par les capteurs des satellites dans le domaine du visible et proche infra-rouge. Parmi ces paramètres, les caractéristiques de la surface du sol, telles que rugosité, composition minéralogique et couleur, jouent un rôle majeur. En zone aride, ce résultat n'est pas pour surprendre après les travaux d'ESCADAFAL (1989) en Tunisie et de très nombreuses autres études qu'il serait fastidieux de rappeler ici.

Concernant la couleur, ESCADAFAL a montré que les coefficients chromatiques (X,Y,Z) sont très fortement corrélés à la réflectance dans les bandes spectrales rouges, vertes et bleues des capteurs (MSS et TM) des satellites Landsat. Pour les données MSS le rapport MSS5/MSS4 fournit une information intéressante sur la couleur de la surface des sols. En effet, pour des sols, dont les gammes de teintes sont comparables, ce rapport est d'autant plus grand que la pureté (saturation) est elle-même plus élevée. Avec les données TM, cet auteur conclut que les canaux TM1 et TM3 sont les plus importants pour discriminer les surfaces d'après leur couleur.

Dans un autre contexte climatique, et pour des sols aussi différents que les ferrallitiques (latosols) des régions tropicales du Brésil, MADEIRA a établi des relations quantitatives précises entre la couleur, exprimée par des paramètres colorimétriques obtenus par des mesures de réflectance diffuse, et la composition minéralogique des sols (nature et teneur en oxyhydroxides de fer). Il a montré aussi les relations existant entre un indice de rougeur, calculé à partir des coordonnées d'HELMHOLTZ (CERVELLE et al, 1977), et la teneur en hématite. (MADEIRA et al, 1990, 1991)

Cet indice de rougeur peut être estimé comme suit, à partir des canaux de Thematic Mapper:

$$IR(TM) = \frac{TM_3^2}{TM_1 * TM_2^3}$$

Dans le cas du plateau central brésilien et pour des sols nus (labours), le néocanal "indice de rougeur", créé en calculant cet indice radiométrique pour chacun des pixels de l'image, s'avère être en étroite relation avec la teneur en hématite des sols en surface.

En région aride, et en particulier dans cette région d'Egypte, les sols sont généralement de texture sableuse avec des teneurs en hématite extrêmement faibles peu comparables aux données précédentes. Par contre l'hématite, même en très faible quantité, contribue à la coloration des sols. En mélange avec les particules argileuses elle forme un revêtement plus ou moins continu autour des grains de sable dont la composition minéralogique peut être très variable en fonction de l'origine et de la situation géomorphologique. La couverture sableuse présente une grande diversité entre deux pôles extrêmes:

- d'une part des sables blancs (10YR 8/2) excessivement calcaires
- et d'autre part des sables rougeâtres (7,5YR 7/6) siliceux; la densité du recouvrement végétal étant dans tous les cas inférieure à 15%.

Pour saisir au mieux toute la diversité et la distribution spatiale de la couverture sableuse on se propose de tester l'indice de rougeur proposé par MADEIRA en l'utilisant dans un contexte climatique et pédologique totalement différent et en l'adaptant aux données SPOT. Avec les deux seuls canaux du visible XS1 et XS2, l'indice de rougeur devient donc, par analogie à TM:

$$IR(SPOT) = \frac{XS_2^2}{XS_1^3}$$

MATERIEL ET METHODE

La géoséquence (figure 1).

La zone d'étude se situe à une centaine de kilomètres à l'ouest d'Alexandrie le long de la côte et concerne la région d'El Omayed.(AYYAD et *al*, 1983) dont le climat est de type méditerranéen aride (P=150 mm/an).

Dans le cadre de la cartographie de cette région (POUGET et *al*, 1990, 1991) une étude détaillée des relations états de surface/image SPOT a été réalisée au niveau de sites tests. Parmi les 26 sites étudiés on en sélectionne 6, représentatifs de la géoséquence, avec prélèvement pour chacun d'eux d'un échantillon de la surface du sol. La figure 1 précise la couleur à l'état sec (code Munsell) et la teneur en calcaire total des 6 échantillons (voir aussi tableau 1).

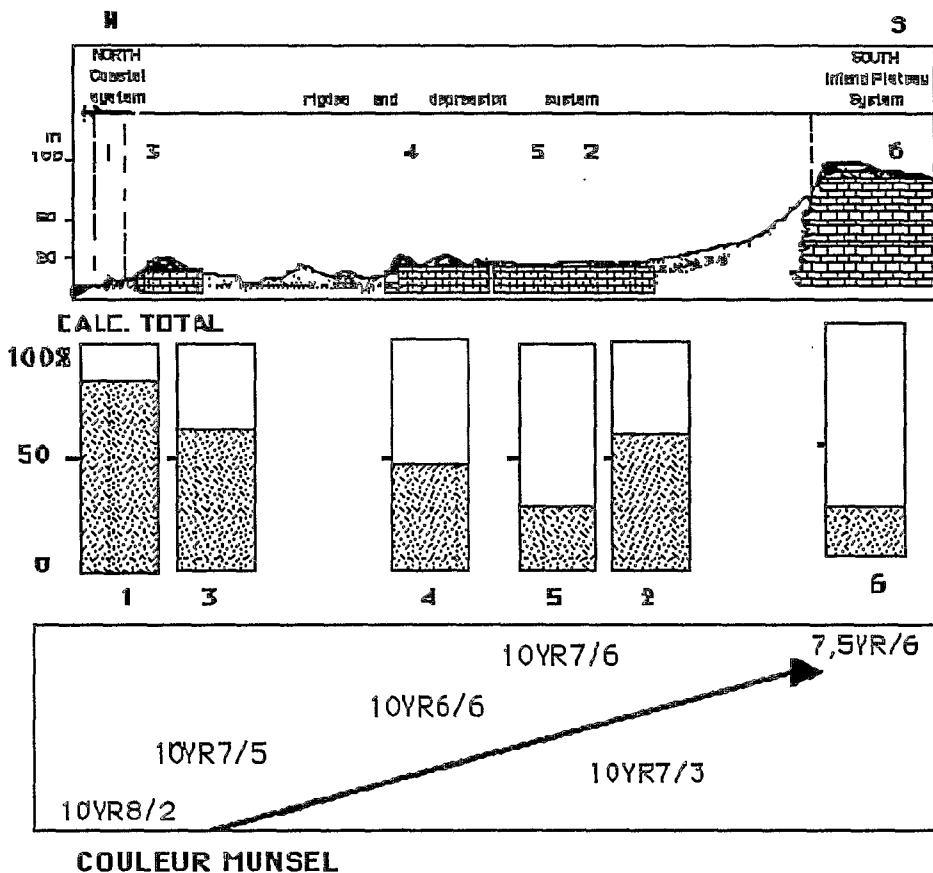


Figure 1: Organisation géomorphologique de la géoséquence.

L'organisation géomorphologique est caractérisée par trois ensembles:

- une dune côtière (coastal system) constituée de calcaire oolithique plus ou moins consolidé avec une couverture de sable blanc excessivement calcaire (échantillon 1).
- un système de dunes (grès calcaire) consolidées, parallèles à la côte et séparées par des dépressions (ridges and depressions system). Les sols sont sableux, plus ou moins profonds, avec parfois des accumulations calcaires (encroûtements) à faible profondeur ou affleurant localement (échantillon 2). En surface, les sables présentent une grande diversité: plus clairs et plus calcaires au niveau des dunes consolidées (échantillon 3), plus rougeâtres et siliceux au niveau des sols les plus profonds ou fixés par la végétation (échantillons 4 et 5).
- un plateau faiblement ondulé et surélevé (inland plateau) prend le relais vers le sud avec une couverture discontinue de sables siliceux rougeâtres d'origine éolienne.

Très globalement la couverture sableuse s'organise donc selon un gradient nord-sud, les sables devenant de plus en plus siliceux et rougeâtres.

La démarche (figure 2).

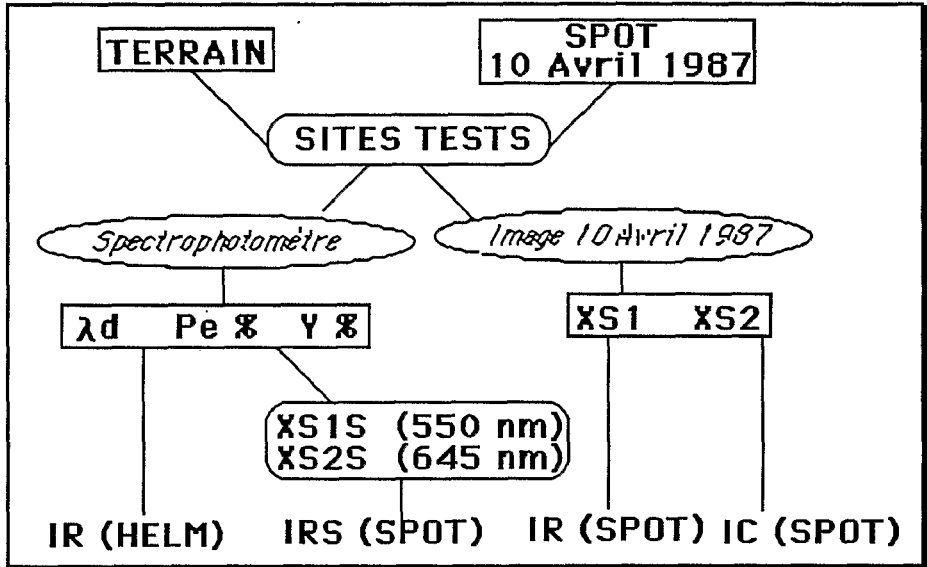


Figure 2: Organigramme de la démarche.

La démarche se situe à deux niveaux;

- Dans un premier temps, la mesure au laboratoire de la réflectance diffuse (spectrophotomètre CARRY), pour les 6 échantillons, fournit les paramètres colorimétriques nécessaires au calcul de l'indice de rougeur à partir des coordonnées d'HELMHOLTZ:

$$IR (HELM) = \frac{(dd - 580) * Pe\%}{Y^2}$$

dd = longueur d'onde dominante

Pe% = pureté d'excitation.

Y = luminance.

Cet indice qui doit permettre de caractériser, sinon de quantifier, le gradient de couleur représenté par les 6 échantillons est comparé, ensuite, à un indice de rougeur simulé SPOT calculé selon la formule :

$$IRS (SPOT) = \frac{XS_2^2 S}{XS_1^3 S}$$

XS₁S = réflectance diffuse à 550nm.

XS₂S = réflectance diffuse à 645 nm.

- Dans une deuxième étape, au niveau de l'image SPOT du 10 Avril 1987 (KJ=107-288) on crée un néo-canal "Indice de Rougeur SPOT" en calculant pour chaque pixel la valeur du même indice à partir des valeurs

radiométriques des canaux XS₁ et XS₂:

$$IR (SPOT) = \frac{XS_2^2}{XS_1^3}$$

Chacun des sites tests est caractérisé par une valeur moyenne de l'indice de rougeur.

On compare alors les échantillons, caractérisés par l'indice de rougeur IR (HELM), et les sites tests correspondants, caractérisés par l'indice de rougeur IR (SPOT). Compte tenu du nombre restreint d'individus il ne s'agit donc que d'une comparaison qualitative.

La pertinence du néocanal IR (SPOT) est ensuite analysée et discutée au niveau de l'ensemble des sites tests pour tenir compte des autres paramètres qui influencent les données satellitaires, rugosité et couvert végétal notamment. Cet indice radiométrique est comparé à un indice de couleur souvent utilisé (POUGET et *al*, 1989,1990; BELGHIT, 1990):

$$IC (SPOT) = \frac{XS_2 - XS_1}{XS_2 + XS_1}$$

RESULTATS ET DISCUSSION

- **Caractéristiques spectrales des échantillons: Indice de Rougeur IR (HELM).**

Le comportement spectral des sols étudiés est illustré par la figure 3 qui présente les courbes de réflectance diffuse des échantillons 1 et 6, termes extrêmes de la géoséquence

Outre une grande différence d'intensité de la réflectance les deux courbes se distinguent nettement par leur allure générale en relation avec la nature des constituants minéralogiques:

- réflectance élevée et courbe plus ou moins convexe (échantillon 1), liée à l'absence de bandes de transition intra-atomiques caractéristiques des éléments de transition (absence de fer).
- réflectance moins élevée et courbe concave puis convexe soulignant la présence d'hématite (échantillon 6). Ce type de courbe est à rapprocher du type III "affecté par le fer" (STONER et *al*, 1981).

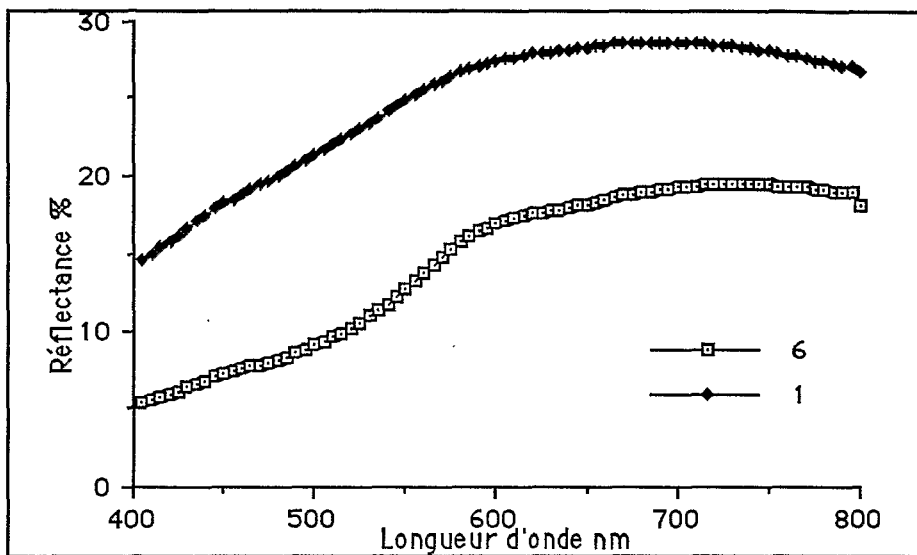


Figure 3: Courbes de réflectance diffuse des échantillons 1 et 6.

Ces résultats ne sont pas pour surprendre. Par contre l'indice de rougeur IR (HELM), calculé à partir des paramètres colorimétriques, permet de rendre compte de ces différences en ordonnant globalement les échantillons en fonction de leur couleur de plus en plus rouge, corrélativement à une teneur en calcaire de plus en plus faible. L'échantillon 5 apparaît cependant moins rouge que le 4, tout en étant légèrement moins calcaire (Tableau 1).

N	Couleur Munsell	CO ₃ Ca Total	x	y	Y%	dd	Pe%	IR (HELM)	IRS (SPOT)	IR (SPOT)	IC (SPOT)
1	10YR8/2	90	0,3442	0,349	24	578,1	17,92	-0,059	0,0518	0,0049	-0,0144
2	10YR7/3	58	0,3738	0,3631	29	581,9	29,66	0,067	0,0799	0,0095	0,0619
3	10YR7/5	54	0,3775	0,3677	15	581,4	31,79	0,198	0,1182	0,0093	0,0451
4	10YR6/6	44	0,3828	0,3694	13	582	33,76	0,399	0,1495	0,0114	0,0614
5	10YR7/6	36	0,3865	0,3719	14	582	35,23	0,359	0,1405	0,0112	0,0772
6	7,5YR7/6	17	0,386	0,3706	13	582,3	34,77	0,473	0,1575	0,0118	0,0827

Tableau 1: Caractéristiques analytiques et spectrométriques des échantillons

La figure 4 montre que cet indice s'avère être en relation assez étroite avec l'indice simulé IRS (SPOT) construit selon le modèle proposé par MADEIRA pour TM. Autrement dit, les seules parties du spectre correspondant aux deux canaux SPOT du visible XS₁ et XS₂, sont susceptibles de rendre compte de la rougeur des échantillons de sol.

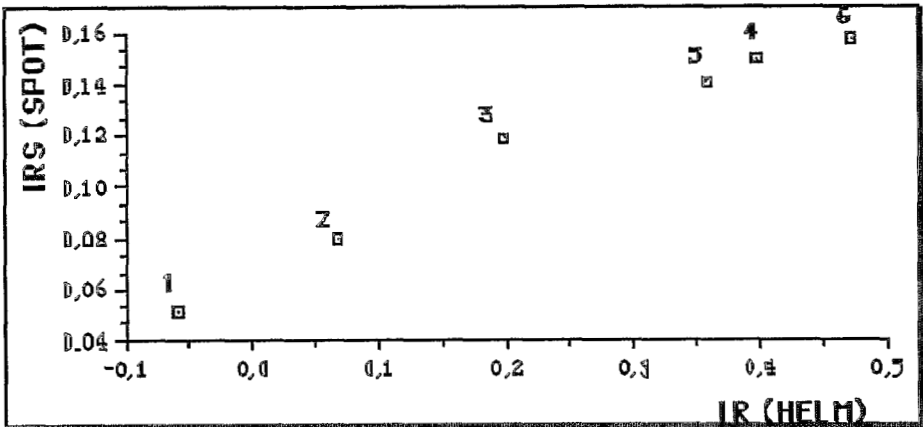


Figure 4: Les relations IR (HELM) / IRS (SPOT)

• **Caractéristiques radiométriques des sites tests: le néocanal Indice de rougeur IR (SPOT).**

Au niveau des sites tests eux-mêmes, sur l'image SPOT, l'application du modèle précédent montre (figure 5) que l'indice de rougeur IR (SPOT), calculé à partir des valeurs radiométriques XS_1 et XS_2 mesurées par le satellite (image du 10 avril 1987), est en relation étroite avec l'indice de rougeur IR (HELM) mesuré sur les échantillons de sol.

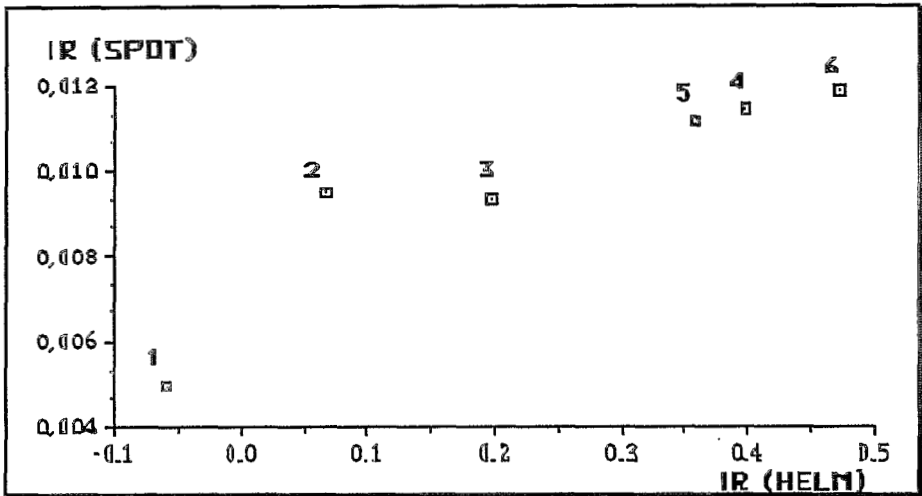


Figure 5: Les relations IR (HELM) / IR (SPOT).

Il faut noter que le site 2 s'écarte un peu de ce que l'on pourrait considérer être la "droite de corrélation" si le nombre d'individus était suffisant: l'indice de rougeur SPOT du site test étant plus élevé que celui de l'échantillon de sol prélevé. En fait, le site 2 représente une surface restreinte (4 pixels) correspondant à une petite plage dénudée soumise à une déflation éolienne intense qui a dégagé l'horizon supérieur sableux rougeâtre et mis à nu l'encroûtement calcaire sous-jacent (échantillon 2). La présence d'un mince voile sableux discontinu peut expliquer

que l'indice de rougeur mesuré à partir des données SPOT soit plus élevé, le capteur intégrant l'ensemble de la surface (encroûtement calcaire et voile sableux rougeâtre discontinu).

En fait il semblerait que les points se distribuent selon deux droites de pente différentes:

- pour les valeurs les plus faibles des indices, entre 0 et 0,2 (échantillons 1 à 3), les données SPOT rendraient mieux compte des différences de rougeur.
- pour les valeurs plus élevées (échantillons 3 à 6) on constate que ces différences seraient plus nettement exprimées par l'indice IR (HELM) mesuré sur les échantillons (pente plus faible). Malgré cette perte de sensibilité le néocanal Indice de Rougeur rend compte de la variabilité observée sur le terrain.

• **Caractérisation de la couverture sableuse.**

L'indice de rougeur IR (SPOT) et l'indice de brillance IB ($IB = \sqrt{(XS_1)^2 + (XS_2)^2 + (XS_3)^2} / 3$) permettent de situer l'ensemble des 26 sites tests étudiés sur un diagramme bidimensionnel combinant ces deux indices radiométriques (figure 6). On individualise ainsi les principaux milieux composant l'ensemble de cette couverture sableuse.

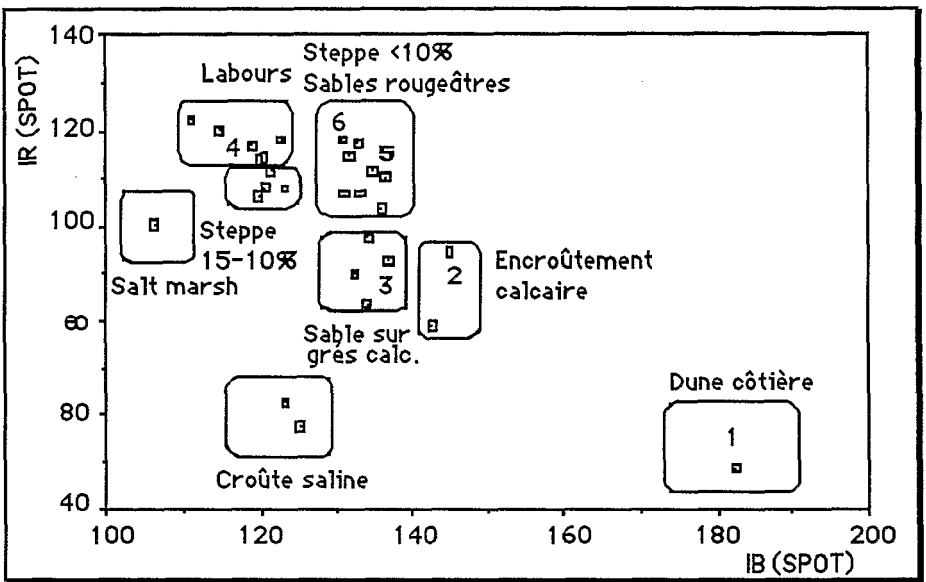


Figure 6: Distribution des sites tests sur le diagramme IR (SPOT) / IB (SPOT)

- dans le domaine des basses luminances (faibles valeurs de l'indice de brillance), outre les milieux salés (salt marsh) bien individualisés, l'indice de rougeur contribue à distinguer deux milieux très différents malgré des brillances comparables : les sols nus labourés (site 4) et les steppes à couvert végétal assez dense (15-10%). Cette distinction n'était pas possible pour l'indice de couleur IC (SPOT) très corrélé à l'indice de brillance (Tableau 2).

	XS ₁	XS ₂	XS ₃	IB	IC	IR
XS ₁	1,00					
XS ₂	0,94	1,00				
XS ₃	0,93	0,99	1,00			
IB	0,97	0,99	0,99	1,00		
IC	0,82	0,96	0,97	0,93	1,00	
IR	0,57	0,80	0,83	0,76	0,93	1,00

Tableau 2 : Image SPOT (avril 1987): Matrice de corrélation entre les canaux bruts et les néocanaux (IB,IC,IR).

Par contre, l'indice de rougeur ne permet pas de distinguer la croûte saline de la dune côtière car les deux surfaces sont décolorées (IR très faible). Elles se différencient alors par des brillances très différentes.

- dans le domaine des luminances moyennes à très élevées (steppes à couvert végétal inférieur à 10%) l'indice de rougeur permet de caractériser et d'individualiser des surfaces qui deviennent de moins en moins rouges et qui sont plus claires: sables rougeâtres siliceux (sites 6 et 5), sables moins rouges sur grés calcaire (site 3), encroûtement calcaire affleurant (site 2) et sable blanc excessivement calcaire (site 1) au niveau de la dune côtière.

Il apparaît donc que l'indice de rougeur est très discriminant dans le cas de surfaces où le recouvrement végétal est inférieur à environ 10%. Ceci traduit une influence déterminante du sol par rapport à la végétation (rugosité) et éventuellement à l'activité chlorophyllienne. Au delà de 10% la végétation tend à "gommer" l'influence du sol, le facteur rugosité devenant prépondérant avec un coefficient d'ombrage estimé égal à deux fois le pourcentage de recouvrement végétal. soit plus de 20%. (ESCADAFAL, 1989).

Il serait particulièrement intéressant d'étudier expérimentalement les variations de cet indice sur des sols différents et en fonction d'un taux de recouvrement végétal croissant afin de préciser les conditions de validité de son application.

BIBLIOGRAPHIE

AYYAD (M.G.), LE FLOCH (E.), 1983.- An Ecological Assessment of Renewable Resources for Rural Agricultural Development in the Western

- POUGET (M.), CORNET (A.), LE FLOCH (E.), KAMAL (S.), 1990. - Apport de la Télédétection spatiale SPOT à l'établissement des bases écologiques pour le développement rural intégré des zones arides. Cas concrets de la région côtière du nord-ouest - Egypte - et de la Réserve de la Biosphère de Mapimi - Mexique. Atelier MAB/UNESCO, Coquimbo (Chili), avril 1989,.
- POUGET (M), LE FLOCH (E.), KAMAL (S.), SALEM (B.), AYYAD (M.). 1991 - Utilisation des données SPOT pour la cartographie des ressources renouvelables. Région méditerranéenne côtière nord-ouest de l'Egypte. Rapport final. Ministère de l'Environnement, Paris, à paraître 1991.
- RAKOTO-RAVALONTSALAMA (M.) and al, 1988.- Guide de l'utilisateur de PLANETES. Unité de Télédétection / L.I.A., Centre O.R.S.T.O.M., Bondy, 130p.
- STONER E. R.), BAUMGARDNER (M.F.), 1981. - Characteristic variations in reflectance of surface soils. Soil Sc. Soc. Am. J. 45(6):1161-1165