

Propriétés spectrales des surfaces et télédétection de variations spatiales et temporelles de l'infiltrabilité de sols arides (Menzel Habib, Tunisie)

RICHARD ESCADAFAL¹, ROGER PONTANIER¹ et ABDERRAZAK BELGHITH²

¹ ORSTOM, Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération, Mission en Tunisie, B.P. 434, 1004 El Menzah, Tunisie; téléphone : +216 (1) 750-009; télécopieur : +216 (1) 750-254

² CNT, Centre national de télédétection de Tunisie, B.P. 200, 1080 Tunis cedex, Tunisie; téléphone : +216 (1) 760-900; télécopieur : +216 (1) 760-890

Résumé

En régions arides, le cycle de l'eau est fortement influencé par les caractéristiques de la surface des sols, qui déterminent en particulier l'aptitude au ruissellement et l'érodabilité du milieu. Les capteurs à haute résolution spatiale, tel le HRV de SPOT, fournissent des mesures des propriétés spectrales des surfaces dans le domaine optique du visible au proche infrarouge. Dans cette étude, la réflectance spectrale des échantillons de surface a été mesurée sur le terrain avec un spectroradiomètre portable, dans la région de Menzel Habib, en Tunisie méridionale. Six sites ont été étudiés, représentant des faciès écologiques typiques dans la région et pour lesquels des mesures d'infiltration sous pluies simulées sont disponibles. La comparaison des deux séries de mesures montre que les variations d'état des surfaces se traduisent aussi bien sur le plan hydrodynamique que sur celui des propriétés spectrales. En particulier, l'indice de coloration calculé à partir des bandes visibles décroît en fonction de la dégradation des surfaces, qui se traduit par une infiltrabilité plus faible. Par calcul de cet indice pour trois images HRV de SPOT prises à des dates différentes, un essai d'application au suivi de la variation de l'infiltrabilité des sols et de l'état de dégradation du milieu est présenté à titre d'illustration de l'intérêt de la démarche proposée.

1. Introduction

1.1. Contexte

Le travail présenté ici s'inscrit dans le cadre d'un projet mené par le Centre national de télédétection de Tunisie intitulé «Veille satellitaire de la désertification». Il est réalisé avec la collaboration scientifique de l'ORSTOM (Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération) et avec les partenaires nationaux tels les directions techniques du ministère de l'Agriculture (Direction des forêts, Direction des sols), les Commissariats régionaux au développement agricole, l'Institut national de la météorologie, le ministère de l'Environnement et l'Institut des régions arides (Médénine). Son objectif est de mettre au point une méthode de surveillance par télédétection des milieux arides en Tunisie méridionale. En utilisant les différents types de données-images disponibles, après interétalonnage, les changements affectant ces milieux seront détectés, qu'il s'agisse de dégradation (ensablement, diminution du couvert végétal) ou d'amélioration de l'état du milieu à la suite des actions de protection (mise en défens, travaux de fixation des sables, entre autres).

Dans ce cadre, une des premières étapes entreprises est la caractérisation des surfaces représentatives des différents écosystèmes et de leur condition (bon état, dégradé, etc.). En sus des données sur les sols et la végétation, qui sont déjà bien connues grâce aux travaux de terrain des différents organismes cités ci-dessus, des mesures spectroradiométriques sont réalisées sur des sites représentatifs. Une base de données sur les propriétés spectrales de la surface des sols de la Tunisie aride est ainsi en cours de constitution.

1.2. Problématique

Dans le domaine de la télédétection des ressources en eau, en ce qui concerne la détermination des paramètres du bilan hydrique, l'accent est mis sur la mesure directe des flux (évaporation, par exemple) ou de la teneur en eau des sols. Une approche alternative a été mise au point ces dernières années, montrant que, en zone aride, les caractères de la surface des sols déterminent leur aptitude à l'infiltration : on parle d'«infiltrabilité potentielle». Ceci a été mis en évidence sous pluies simulées, au Sahel (CASENAVE et VALENTIN, 1989) et en Tunisie par les travaux de ASSELINE *et al.* (1989), ESCADAFAL (1989) et FLORET *et al.* (1992).

Ainsi, s'il est possible de distinguer les différents types de surface par leurs propriétés optiques, les données de télédétection à haute résolution nous permettraient de délimiter des surfaces de comportement hydrodynamique connu, ce qui est d'un grand intérêt pour la modélisation du cycle de l'eau. Des essais dans ce sens ont déjà été réalisés par classification empirique d'images satellitaires (ALBERGEL *et al.*, 1987).

1.3. Objectifs de l'étude

Le présente étude aborde cette problématique en se basant sur des mesures au sol pour préciser les relations entre propriétés hydrodynamiques et propriétés spectrales. Les données spectroradiométriques de terrain obtenues au cours de ce travail sont mises en relation avec les mesures d'infiltration sous pluies simulées déjà réalisées dans la région de Menzel Habib (fig. 1). En vérifiant la séparabilité des différentes surfaces à partir de mesures dans les bandes spectrales des canaux HRV de SPOT, cette étude a pour but d'évaluer la faisabilité de la télédétection de l'infiltrabilité de sols du sud de la Tunisie.

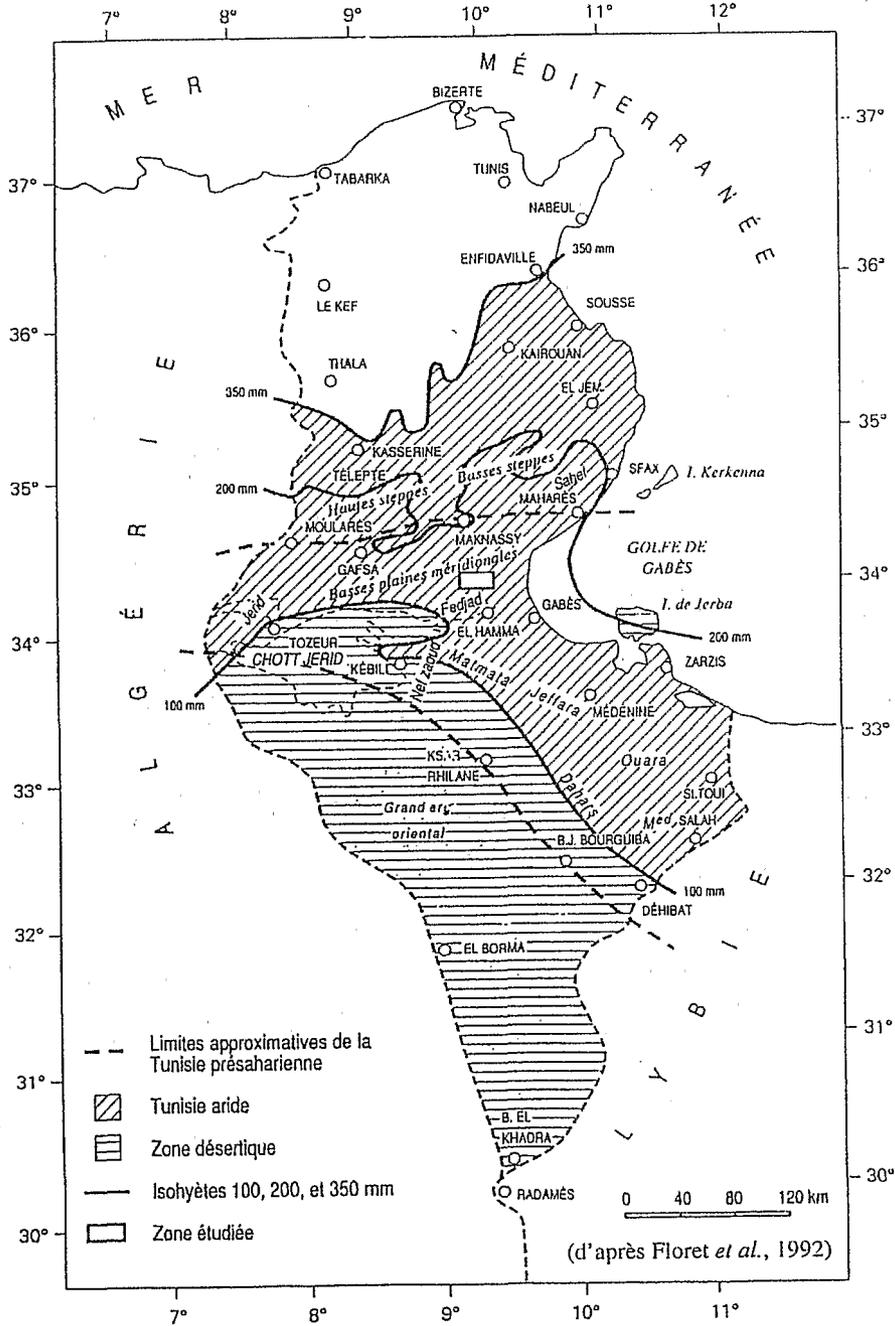


Figure 1. Carte de situation de la zone d'étude

2. Données de terrain

Le climat de la zone d'étude est de type aride méditerranéen, avec des précipitations irrégulières tombant surtout en hiver (moyenne annuelle de 150 à 180 mm). La végétation, sous forme de steppes à ligneux bas exploitées en parcours, présente un recouvrement qui excède rarement 30 %, sur des sols sablo-limoneux calcaires. La céréaliculture pluviale se développe entraînant des phénomènes de dégradation et des problèmes de durabilité inhérents à la fragilité de ces milieux.

2.1. Sites sélectionnés

Les résultats des nombreux travaux sur l'écologie de cette région ont été synthétisés dans l'ouvrage de FLORET et PONTANIER (1982), auquel on se référera pour une description plus complète des différentes séquences de dégradation et de la nomenclature des faciès correspondants. Parmi les différents écosystèmes qui y ont été décrits, nous avons sélectionné deux d'entre eux qui couvrent une grande partie de la zone, et qui ont des caractéristiques nettement différentes :

- a) les piémonts limoneux dans lesquels deux faciès sont distingués :
 - faciès de dégradation, caractérisé par un couvert végétal très faible (3 %), soumis à une exploitation pastorale intensive (AA1, suivant FLORET et PONTANIER, 1982);
 - faciès de restauration du même milieu, après deux années de mise en défens, la végétation s'est bien développée et couvre 20 % de la surface (AA2);
- b) les steppes sur sol sableux (à *Rhantherium suaveolens*) qui présentent une séquence de dégradation dont nous avons suivi quatre faciès, de la steppe en bon état (RK3) sur sol profond, jusqu'à la steppe dégradée sur sol érodé battant (RK1), en passant par les faciès intermédiaires RK2 et RK2-1.

2.2. Mesures sous pluies simulées

2.2.1. Appareillage

Les mesures d'infiltration ont été réalisées avec un petit simulateur de pluie facilement transportable. Il est constitué d'une tour démontable de 4 m de hauteur, du haut de laquelle un gicleur asperge une parcelle d'essai limitée par un cadre métallique de 1 m de côté. Le gicleur est placé sur un bras oscillant, dont l'amplitude peut être réglée, déterminant ainsi l'intensité de l'averse simulée. Le débit de l'eau qui ruisselle éventuellement vers l'exutoire de la parcelle d'essai est mesuré par un limnigraphe à mouvement rapide. L'infiltration est calculée par différence entre la quantité d'eau appliquée et la quantité ruisselée. La description complète du dispositif peut être trouvée dans ASSELINE *et al.* (1989).

2.2.2. Protocole de mesures

Trois averses simulant différents types d'événements pluvieux observés dans la région ont été successivement appliquées. Le tableau 1 résume les caractéristiques de ces averses, composées respectivement de trois, puis de deux, puis d'une phase d'intensité pluviométrique constantes. Ce protocole est celui qui a été défini pour tester, en Tunisie centrale et méridionale, une séquence pluvieuse de retour décennale. (FLORET *et al.*, 1989).

Tableau 1. Protocole de pluies simulées appliqué sur les six échantillons de surface

Averse	Séquence	État du sol	Intensité (mm/h)	Durée (min)	Pluie appliquée (mm)
1	a	Sec	20	15	5
	b	Humide	40	15	10
	c	Humide	80	15	20
2	a	Ressuyage de 24 h	30	20	10
	b	Humide	60	15	15
3		Ressuyage de 24 h	120	10	20

2.2.3. Résultats des mesures d'infiltration

Le protocole décrit ci-dessus a été appliqué de façon systématique dans les campagnes de simulation de pluies qui ont été réalisées sur un large ensemble des sites en Tunisie. Les résultats de plus de 500 pluies sur 160 parcelles forment une masse d'information qui est stockée dans la base de données DS-SIMUL, développée par la Direction des sols avec l'ORSTOM (MARTINI *et al.*, 1991). C'est de cette base que nous avons extrait les données d'infiltration utilisées dans cette étude. Ainsi, la figure 2 représente les coefficients d'infiltration obtenus sur chacun des types de surfaces étudiés, pour chacune des trois averses simulées.

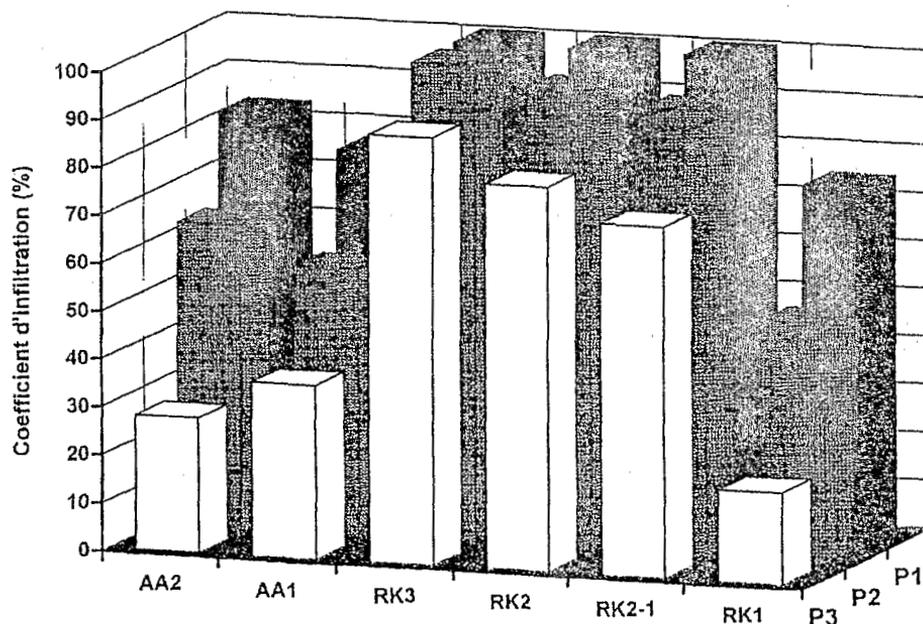


Figure 2. Coefficients d'infiltration observés sur les six échantillons de surface selon les pluies simulées appliquées P1, P2 et P3 (voir tab. 1)

De façon prévisible, les coefficients d'infiltration sur sol sableux (RK) sont globalement plus forts que ceux observés sur sol limoneux (faciès AA). On remarque en particulier que l'infiltration reste élevée même sous des averses de forte intensité (averse P3). Le faciès RK1 correspondant à un sol sableux très dégradé a un comportement hydrodynamique similaire au sol limoneux (AA1). D'une façon générale, les faciès dégradés présentent une infiltration plus faible, c'est d'autant plus net que l'intensité de l'averse est élevée.

2.3. Mesures spectroradiométriques

2.3.1. Dispositif de mesures

De nombreux instruments sont actuellement disponibles sur le marché pour réaliser des mesures du rayonnement réfléchi par les objets au sol, dans le domaine optique couvert par les satellites de télédétection. Pour cette expérience un spectroradiomètre portable modèle PSII a été utilisé (fabriqué aux USA par Analytical Spectral Devices, Colorado). Cet appareil compact et léger est constitué d'un câble à fibre optique captant la lumière à une extrémité et la conduisant à l'intérieur du boîtier de mesure, où elle est dispersée par un réseau sur une barrette de détecteurs. Un micro-ordinateur interfacé au-dessus du boîtier permet d'ajuster la durée de la mesure et d'enregistrer les valeurs numériques fournies par les détecteurs. La luminance spectrale des échantillons a été mesurée sur le terrain par temps clair, entre 10 et 15 h, d'une hauteur de 1 m de hauteur et en visée nadirale. Le champ de visée du capteur utilisé étant de 18°, la tache au sol a un diamètre de 60 cm environ. Les mesures ont été réalisées le long de transects dans chacun des échantillons de surface, à raison de 10 fois 3 mesures, selon un intervalle de 3 m. Le spectroradiomètre utilisé enregistre les valeurs de luminance en comptes numériques, mesurées sur 512 bandes entre 350 et 1100 nm (selon un pas de 1,4 nm). Les valeurs de luminance de chaque surface ont été obtenues en faisant la moyenne des 30 mesures. La réflectance spectrale a été calculée en divisant les valeurs de luminance obtenues sur les échantillons de surface par celles obtenues au-dessus d'une cible de référence (panneau de Halon réfléchissant le rayonnement incident à 99,6 %).

2.3.2. Résultats des mesures spectroradiométriques

La figure 3 représente les courbes de réflectance obtenues, rééchantillonnées avec un pas de 5 nm, pour une meilleure lisibilité et un lissage du bruit. De plus, ces valeurs de réflectance spectrales ont été convoluées avec les courbes de transmission des capteurs de satellites courants. Ce calcul permet de simuler les valeurs de réflectance des échantillons de surfaces, telles qu'elles seraient mesurées par les satellites (après correction des effets atmosphériques) et donc de tester l'efficacité des différents capteurs et de leurs canaux, du point de vue de la séparabilité spectrale. Le tableau 2 montre les valeurs obtenues dans le cas du capteur HRV de SPOT, auquel nous nous sommes particulièrement intéressés dans cette étude, car nous disposons d'un jeu d'images de ce capteur en mode multibande (XS) sur la région.

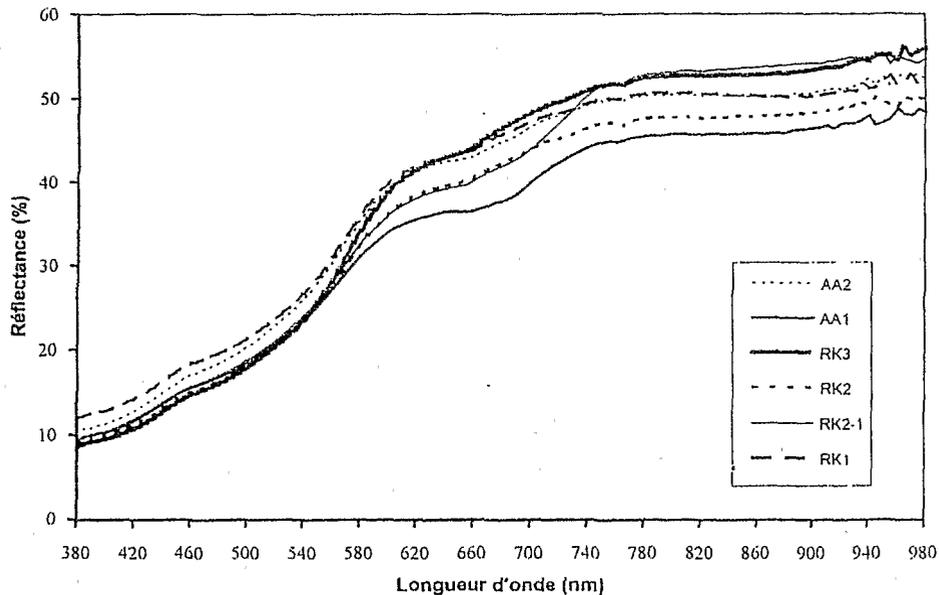


Figure 3. Courbes de réflectance spectrales obtenues avec le spectroradiomètre de terrain sur les six échantillons de surface

Tableau 2. Valeurs de réflectance des six échantillons de surface observées dans les bandes HRV de SPOT et indice de coloration RI (données simulées à partir des mesures spectroradiométriques)

	AA2	AA1	RK3	RK2	RK2-1	RK1
XS1	29,75	26,51	27,97	27,00	27,51	30,49
XS2	34,93	30,53	34,23	32,22	32,44	35,65
XS3	41,36	36,91	41,95	38,73	41,23	41,81
RI	0,080	0,070	0,101	0,088	0,082	0,078

3. Application au suivi des changements : premiers essais sur images HRV

3.1. Indice de coloration

Les courbes de réflectance spectrale obtenues sur les six échantillons de surface étudiés suivant la technique décrite ci-dessus apparaissent sur la figure 3. La réflectance des surfaces y varie principalement en amplitude : les surfaces sont plus ou moins réfléchissantes. Parmi les critères radiométriques des surfaces, la «brillance» est effectivement utilisée depuis longtemps, par exemple dans l'interprétation de niveaux de gris sur des photographies aériennes en noir et blanc. Cependant, ce paramètre est particulièrement sensible aux effets de variations des conditions d'éclairage, ce qui rend les valeurs obtenues à différentes dates délicates à interpréter en termes d'évolution temporelle des surfaces.

Mis à part ce premier critère de «brillance», les courbes de réflectance peuvent être aussi caractérisées par des critères de forme. Si elles ont ici des allures monotones croissantes comparables, on remarque cependant que la pente générale des courbes varie d'un échantillon de surface à l'autre. Même dans le cas des bandes relativement larges des données satellitaires, telles celles du HRV, les variations de cette pente peuvent être détectées par un calcul basé sur le rapport entre les deux bandes visibles XS1 et XS2. Ainsi, nous avons utilisé l'indice de coloration, RI, défini comme la différence normalisée entre les valeurs obtenues dans les bandes vertes et rouges, soit XS1 et XS2 dans le cas du HRV (ESCADAFAL and HUETE, 1991a). Cet indice, qui varie comme la pente de la courbe de réflectance, a été appelé «indice de coloration», car il est d'autant plus élevé que les sols sont plus colorés (plus précisément, il est corrélé avec la saturation de la couleur des sols; ESCADAFAL *et al.*, 1989; ESCADAFAL, 1993). Comme on s'y attend pour des rapports de canaux, l'indice RI est de fait relativement peu affecté par les conditions d'éclaircissement et de visée (ESCADAFAL and HUETE, 1991b).

Sur la figure 4 apparaissent les valeurs d'indice RI, calculées à partir des valeurs de réflectance dans les bandes XS, mesurées au sol sur les six échantillons de surface étudiés. Des différences notables apparaissent entre les échantillons de surfaces, montrant en particulier une diminution de l'indice RI entre la steppe sableuse en bon état (RK3) jusqu'à la steppe dégradée (RK1).

3.2. Combinaison de trois dates

Pour réaliser un essai d'application de cet indice à des données satellitaires, nous avons utilisé trois images HRV que nous disposons sur la zone, acquises respectivement en juin 1987, juin 1991 et juin 1992. Pour permettre l'intercomparaison des données, après

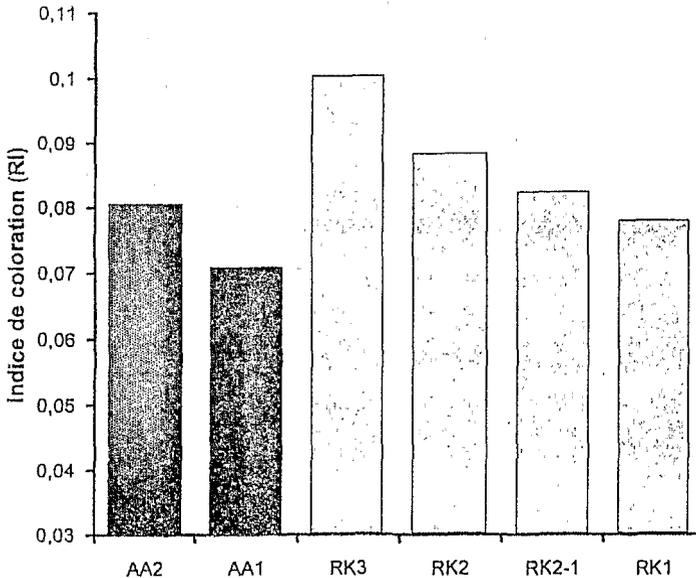


Figure 4. Indice de coloration des surfaces (RI) calculé dans les bandes du capteur HRV de SPOT (données simulées à partir des mesures spectroradiométriques)

correction géométrique, une correction atmosphérique simplifiée a été réalisée en soustrayant de chacun des canaux utilisés un niveau de comptes numériques attribué à la diffusion atmosphérique, tel que les pixels «sombres» (de compte numérique minimal) aient la même valeur dans les deux canaux de chacune des trois images (fixée ici à 10 comptes numériques). Cette correction est loin d'être absolue, mais elle permet de réaliser facilement des rapports de canaux où les effets d'«offset» sont minimisés (CRIPPEN, 1987).

Par chaque image nous avons calculé un canal contenant les valeurs de RI, défini ci-dessus. Puis, ces néo-canaux correspondant à l'indice de coloration à chacune des trois dates ont été affichés simultanément en bleu, vert et rouge, formant une composition colorée. La figure 23-5 (voir cahier couleur) montre un extrait de cette image où apparaissent les variations temporelles de l'indice de coloration des surfaces. Sur cette imagerie qui couvre environ 10 par 10 km, les zones sombres (noires) correspondent aux surfaces qui ont un indice de coloration faible à chacune des trois dates (surface de couleur pâle des sols limoneux dégradés, par exemple). Les zones très claires (blanches) représentent au contraire les surfaces d'indice de coloration élevé aux trois dates (surfaces sableuses, par exemple). Les couleurs jaunes, roses, bleues ou vertes qui apparaissent dans d'autres portions de l'imagerie correspondent aux zones où l'indice de coloration a varié d'une date à l'autre. Ainsi, à titre d'exemple, une surface qui a un indice de coloration élevé en 1987, puis plus faible aux deux autres dates, va apparaître avec une dominante bleue.

4. Discussion

Dans la région aride considérée, les résultats sous pluies simulées indiquent que l'infiltrabilité des sols diffère entre les deux écosystèmes étudiés. À l'intérieur de chacun d'eux, l'infiltrabilité diminue lorsque leur état de dégradation augmente, c'est particulièrement net dans le cas de la séquence des faciès RK3 à RK1. Parallèlement, cet état de dégradation se manifeste au niveau des courbes de réflectance spectrale dont la pente diminue, ce qui se traduit par une baisse des valeurs de l'indice de coloration. Ceci correspond à un changement de composition des matériaux pédologiques en surface. Sableux et rougeâtres au départ, sous l'effet de la dégradation, ces matériaux deviennent plus limoneux, avec une structure compacte et une couleur beige pâle, plus terne.

Cette variation de l'indice de coloration, qui correspond à des changements d'état des surfaces et donc d'état des milieux, peut être suivie par télédétection avec HRV de SPOT comme l'indique le premier essai de la figure 23-5 (voir cahier couleur).

5. Conclusion

Les résultats présentés ici montrent que, en attendant les données à haute résolution spectrale qui permettront de suivre des variations subtiles de la forme des spectres des surfaces, il est déjà possible de «télédétecter» des changements avec des critères simples comme l'indice de coloration. Ces changements observés depuis l'espace correspondent aussi à une évolution sur le plan écologique et, en particulier, à une modification de l'aptitude du sol à l'infiltration. La dégradation se traduit de fait par une augmentation du ruissellement potentiel des surfaces et donc de l'«aridité édaphique» du milieu (FLORET et PONTANIÉ, 1982). Dans ces cas favorables, il est alors envisageable d'interpréter l'imagerie satellitaire non plus seulement en classes d'état de surface (sableux, limoneux,

etc.) mais indirectement en termes de bilan hydrologique régional. La présente étude n'est cependant qu'un premier essai destiné à tester la faisabilité de la télédétection de différents types de faciès écologiques de la région sur la base de leur comportement spectral. Des travaux complémentaires seront nécessaires pour préciser les possibilités d'extrapolation de cette approche et ses limites. Le programme de «Veille satellitaire de la désertification» entrepris par le CNT apportera sa contribution à cet effort, sous la forme d'une base de données sur les propriétés spectrales des milieux naturels de la Tunisie aride et de méthodes de suivi à long terme par télédétection.

6. Références

- ALBERGEL, J., CHEVALLIER, P. et LORTIC, B. 1987. D'Oursi à Gagara : transposition d'un modèle de ruissellement dans le Sahel (Burkina Faso), *Hydrologie Continentale*, vol. 2, n° 2, p. 77-86.
- ASSELIN, J., ESCADAFAL, R. et MTIMET, A. 1989. Étude expérimentale de la dynamique superficielle d'un sol aride Bir Lahmar, Sud tunisien. *Sols de Tunisie*, n° 14, p. 17-62.
- CASENAVE, A. et VALENTIN, C. 1989. Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. ORSTOM, Paris, 229 p.
- CRIPPEN, R. E. 1987. The regression intersection method of adjusting image data for band ratioing. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 9, n° 4, p. 767-776.
- ESCADAFAL, R. 1989. Caractérisation de la surface des sols arides par observations de terrain et par télédétection. *Études et thèses*, ORSTOM, Paris, 317 p.
- ESCADAFAL, R. 1993. Remote sensing of soil color : principles and applications. *Remote Sensing Reviews*, n° 7, p. 261-279.
- ESCADAFAL, R., GIRARD, M. C. and COURAULT, D. 1989. Munsell soil color and soil reflectance in the visible spectral bands of Landsat data MSS and TM. *Remote Sensing of Environment*, n° 27, p. 37-46.
- ESCADAFAL, R. and HUETE, A. R. 1991a. Improvement in remote sensing of low vegetation cover in arid regions by correcting vegetation indices for soil «noise». *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, Paris, 312, série II, p. 1385-1391.
- ESCADAFAL, R. and HUETE A. R. 1991b. Influence of the viewing geometry on the spectral properties high resolution visible and NIR of selected soils from Arizona. 5^e Colloque International «Mesures physiques et signatures en télédétection», Courchevel, France, 14-18 janvier 1991, European Space Agency, SP-319, p. 401-404.
- FLORET, C. et PONTANIER, R. 1982. L'aridité en Tunisie présaharienne. *Travaux et documents de l'ORSTOM*, Paris, 544 p. + annexes 100 p.
- FLORET, C., LE FLOC'H, E. et PONTANIER, R. 1992. Perturbations anthropiques et aridification en zone présaharienne. in *Le Floc'h, E., Grouzis, M., Cornet, A. et Bille, J. C. (éds.). L'aridité, une contrainte au développement. Caractérisation, réponses biologiques, stratégies des sociétés*. Collection Didactiques, ORSTOM, Paris, p. 449-463.
- FLORET, C., MTIMET, A. et PONTANIER, R. 1989. Régime hydrique et sensibilité à l'érosion des systèmes écologiques de la zone aride Tunisie. *Cahier ORSTOM, série Pédologie*, vol. 25, n° 1-2, p. 53-69.
- MARTINI, P., DEROUICH, M. C. et PONTANIER, R. 1991. Gestion et exploitation des données de simulation des pluies en Tunisie. *Direction des sols/ORSTOM, Étude spéciale*, n° 260, Tunis, 17 p.

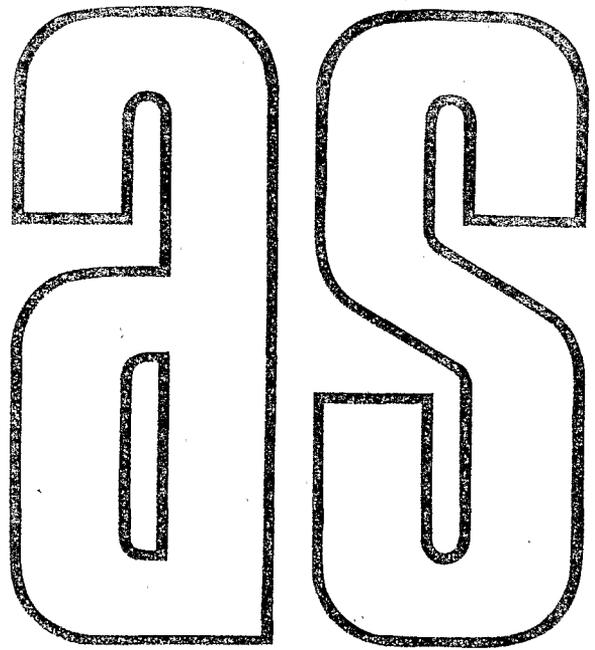
Sous la direction de

Jean-Marie M. Dubois

Mohamed Rached Boussema

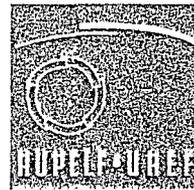
François Boivin

Pierre Lafrance



actualité scientifique

TELÉDÉTECTION
DES RESSOURCES
EN EAU



Actes des Journées scientifiques
de Tunis
1993

AUFELF



Presses de l'Université du Québec