

## PARTIE V

# **Sécheresse et désertification**



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

RICHARD ESCADAFAL <sup>1</sup>, ROGER PONTANIER <sup>1</sup> et ABDERRAZAK BELGHITH <sup>2</sup>

<sup>1</sup> *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*

<sup>2</sup> *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.

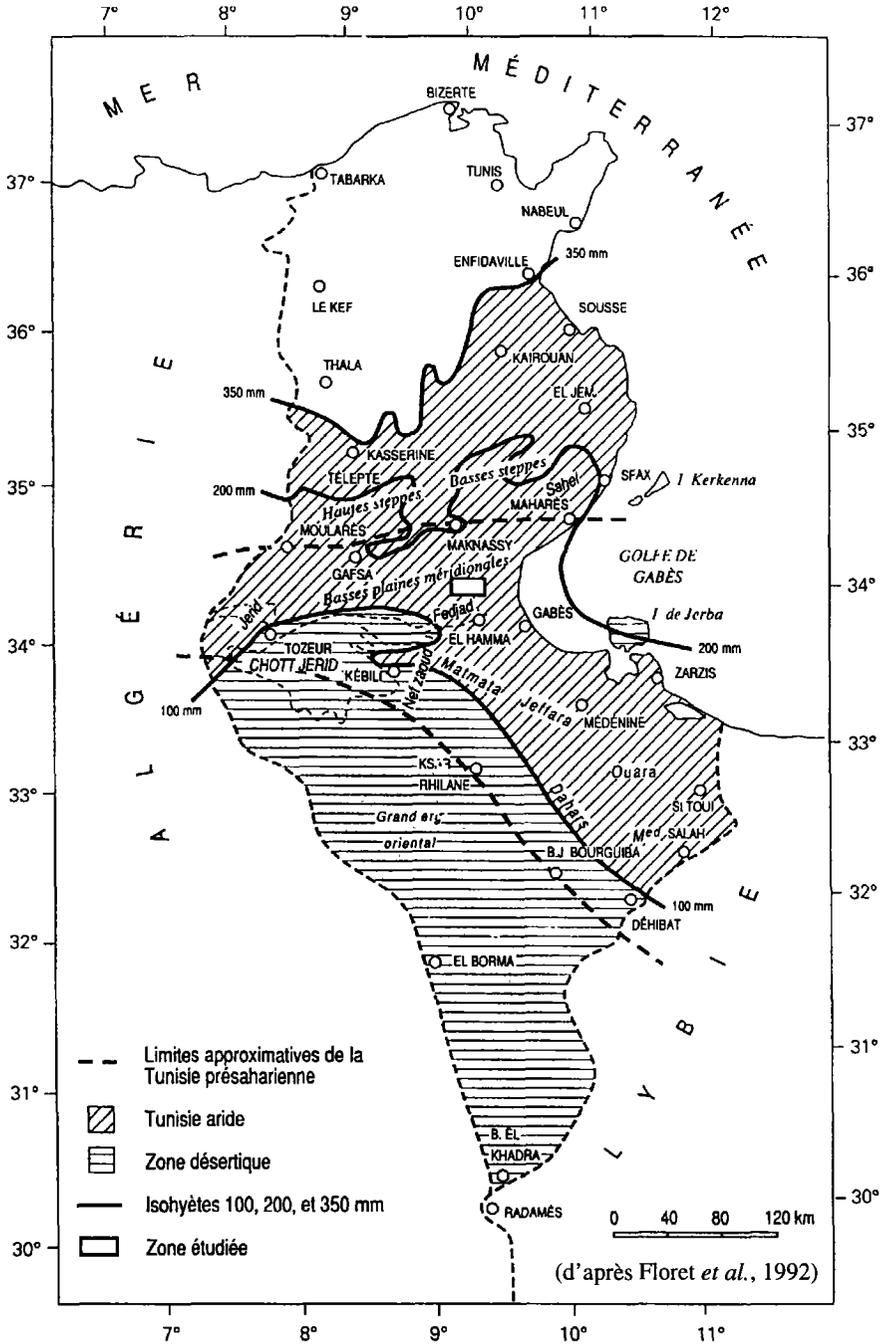


Figure 1. Carte de situation de la zone d'étude

## 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

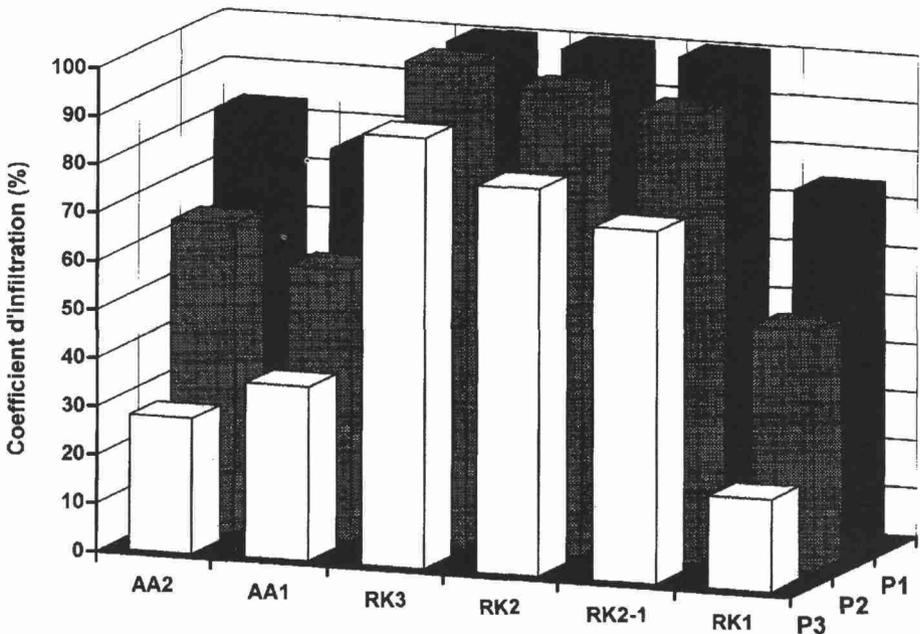
Trois averses simulant différents types d'événements pluvieux observés dans la région ont été successivement appliquées. Le tableau 1 résume les caractéristiques de ces averses, composées respectivement de trois, puis de deux, puis d'une phase d'intensité pluviométrique constantes. Ce protocole est celui 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 1 100 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.

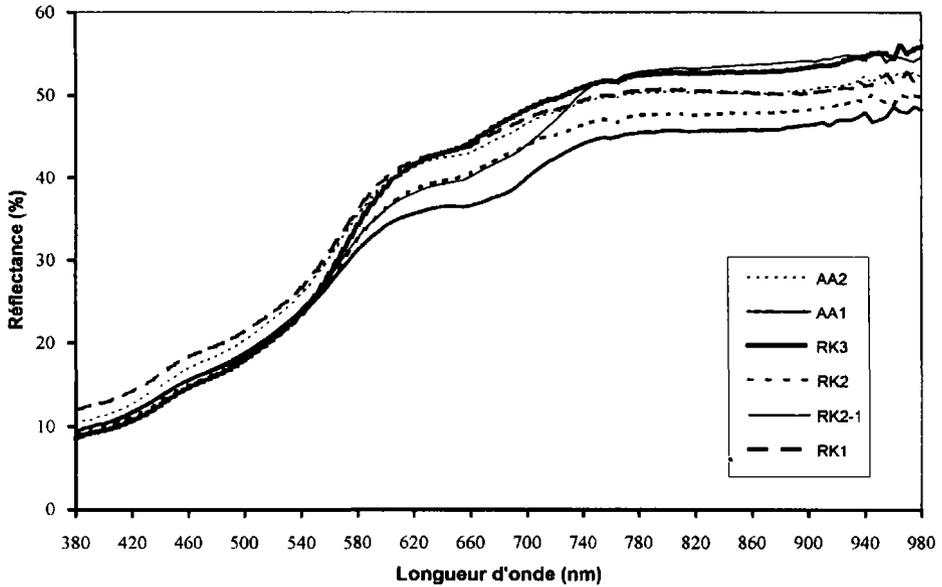


Figure 3. Courbes de réflectance spectrales obtenues avec le spectroradiomètre de terrain sur les six échantillons de surface

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'éclairement 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

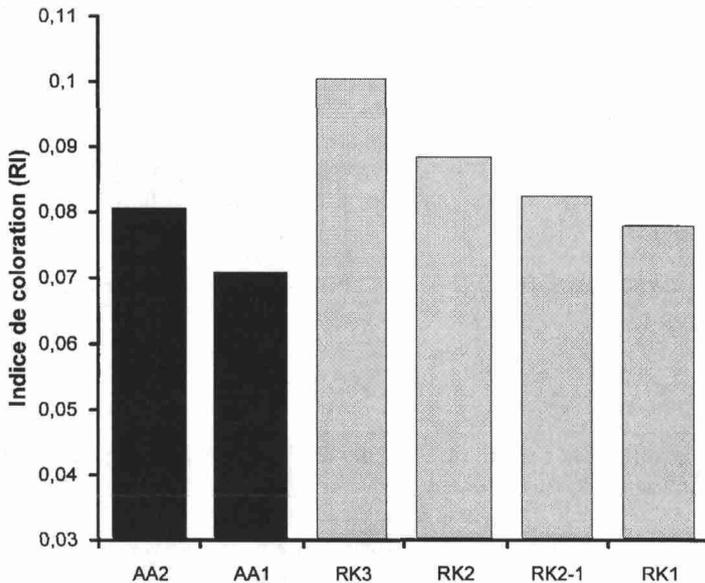


Figure 4. Indice de coloration des surfaces (RI) calculé dans les bandes du capteur HRV de SPOT (données simulées à partir des mesures spectroradiométriques)

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 PONTANIER, 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.
- ASSELINE, 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<sup>e</sup> 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.

## **Contribution de la télédétection et des mesures spectrales à l'étude de la désertification dans le secteur sahélien du Niger**

SALIFOU KARIMOUNE <sup>1</sup>, ANDRÉ OZER <sup>2</sup>, PHILIPPE TRÉFOIS <sup>3</sup> et ELS GOOSSENS <sup>4</sup>

<sup>1</sup> *Faculté de pédagogie, Université de Niamey, B.P. 10963, Niamey, Niger; téléphone : +227 73-33-44*

<sup>2</sup> *Laboratoire de géomorphologie et géologie du Quaternaire, Université de Liège, 7, Place du 20 Août, B-4000 Liège, Belgique; téléphone : +32 (41) 66-54-46; télécopieur : +32 (41) 66-57-00*

<sup>3</sup> *Laboratoire de télédétection aérospatiale, Section de cartographie, Musée royal de l'Afrique centrale, Tervuren, Belgique; téléphone : +32 (2) 769-54-26; télécopieur : +32 (2) 767-02-42*

<sup>4</sup> *Laboratoire de télédétection et d'aménagement des forêts, Université de Gand, Coupure Links 653, 9000 Gand, Belgique; téléphone : +32 (9) 264-61-08; télécopieur : +32 (9) 264-62-40*

### **Résumé**

Dans le cadre d'une recherche partagée de l'AUPELF-UREF sur la désertification, des recherches ont été entreprises dans la région de Zinder (Niger méridional) par les universités de Niamey, de Liège et de Gand et le Musée royal de l'Afrique centrale à Tervuren. Les objectifs poursuivis sont la mise en évidence, par télédétection, de la dégradation de la couverture végétale, d'une part, et le suivi de l'évolution des processus de déflation et de remobilisation des sables, d'autre part. Trois images MSS de 1973 et de 1976 et une image TM de 1987 ont été utilisées. Les traitements réalisés sont des calculs

d'indices de végétation et l'application de modèles de mélanges spectraux sur la base de données satellitaires préalablement corrigées pour les effets atmosphériques et rendues géométriquement et spectralement compatibles entre elles. L'application du modèle de mélange s'appuie sur des mesures radiométriques réalisées *in situ* lors d'une campagne sur le terrain au cours de laquelle des estimations du taux de couverture des couronnes d'arbres ont également été effectuées. Les traitements ont permis de relever, entre 1973 et 1987, une réduction de la couverture végétale qui, d'un état diffus, passe à une structure plus contractée, se localisant dans des sites refuges, dans les lits d'oueds et autour des mares. La déflation et les remaniements de sable se sont amplifiés aux abords des villages et autour des reliefs qui perturbent le transit éolien.

## 1. Introduction

### 1.1. Objectifs

De nombreux travaux de télédétection ont été consacrés à l'étude des changements environnementaux intervenus dans les régions sahéliennes à la suite de l'installation de la sécheresse. Souvent, par ces travaux, on analyse la dynamique de la végétation soit au cours de la saison pluvieuse, soit d'une année à l'autre afin de dégager, pour une série multidade, l'évolution de la biomasse (TUCKER *et al.*, 1986; TOWNSHEND and JUSTICE, 1986; JUSTICE and HIERNAUX, 1986).

L'étude sur deux ou plusieurs années des formations végétales sahéliennes, considérées globalement, fait davantage ressortir les déficits pluviométriques d'une année à l'autre et traduit mal la dégradation continue des milieux. Celle-ci ne peut être appréhendée que par l'analyse des formations ligneuses qui ont une sensibilité pluriannuelle, laquelle reflète mieux l'évolution de la couverture végétale à moyen terme (JACQUEMINET, 1990). C'est pourquoi, les images qui sont traitées dans ce travail sont seulement des images prises en saison sèche, au moment où, en dehors des zones de cultures maraîchères, l'activité chlorophyllienne est surtout le fait de la végétation ligneuse.

Les objectifs poursuivis par les recherches pluridisciplinaires entreprises dans la région de Zinder (Niger méridional), dans le cadre d'une recherche partagée de l'AUPELF-UREF sur la désertification, visent à cerner non seulement la dégradation de la couverture végétale, mais également d'autres processus qui vont de pair avec celle-ci, entre autres l'amplification des processus éoliens. En effet, ceux-ci engendrent des modifications géomorphologiques sur les modelés dunaires hérités des phases arides du Quaternaire supérieur et opèrent une ablation notable sur les horizons supérieurs de sols par ailleurs très pauvres.

Au cours de travaux antérieurs (KARIMOUNE *et al.*, 1993), nous avons mis en évidence, pour un territoire limité, par comparaison d'une image HRV de SPOT et de photographies aériennes numérisées, une forte dégradation de la couverture végétale entre le vol de 1958 et celui de 1975, ainsi que d'importants remaniements éoliens depuis 1975.

Dans la présente étape, le suivi de l'évolution de la désertification a été effectué grâce aux traitements de trois images MSS et d'une image TM de Landsat. La première image (MSS 202-51) a été prise le 11-03-1973, les deux suivantes (MSS 202-50 et 202-51) ont été acquises le 10-01-1976. L'image TM est une scène composée (188-50/51) du 04-01-1987. Les traitements réalisés sont le calcul d'indices de végétation et l'application de modèles de mélanges spectraux. Cette dernière technique permet de faire ressortir à la fois la dégradation du couvert végétal et les remaniements éoliens.

## 1.2. Cadre géographique

L'étude concerne la région située au sud et à l'est de la ville Zinder dans le Niger méridional (fig. 1). Elle couvre en latitude le secteur compris entre 13°20' N et 14°30' N. En longitude, elle s'étend, au sud du 14<sup>e</sup> parallèle, entre 9° et 10° E. Mais plus au nord, elle s'étire jusque 10°20' E. Ce territoire correspond au Damagaram occidental et central et au Koutous méridional. Il est caractérisé par une pluviométrie moyenne variant entre 575 mm au sud (moyenne établie sur la période 1938-1990, station de Magaria) et 263 mm au nord (moyenne de la station de Tanout calculée sur la période 1936-1990). Les formations végétales les plus caractéristiques sont, au sud, une savane arborée dont l'espèce la plus représentée est l'*Acacia albida* et, au nord, une savane arborée-arbustive où dominent *Acacia raddiana*, *Acacia seyal*, *Acacia senegal*, *Balanites aegyptiaca* (AUBREVILLE, 1949; LE HOUÉROU, 1979; DE FABREIGUES, 1980; KARIMOUNE *et al.*, 1993).

Du point de vue morphologique, les modelés dunaires hérités de phases arides du Quaternaire supérieur dominant le paysage (KARIMOUNE *et al.*, 1990, 1993). Leur susceptibilité aux processus éoliens actuels constitue une des principales formes de caractérisation de l'évolution de la désertification dans la région. Les remaniements des sables sur la partie sommitale des dunes suivent ou vont de pair avec la dégradation du couvert végétal, celle-ci ayant plus attiré l'attention. La mise en évidence de cet ensemble de processus de désertification, soit dégradation du couvert végétal et amplification des processus éoliens, a été réalisée grâce à la comparaison d'images diachroniques : MSS de 1973, MSS de 1976 et TM de 1987.

## 2. Techniques et méthodes

### 2.1. Travaux antérieurs et préparation de l'étape actuelle

Dans les travaux antérieurs (KARIMOUNE *et al.*, 1993), nous avons montré, grâce à la comparaison d'une image HRV (haute résolution visible) de SPOT du 22-11-1987 et de photographies aériennes de 1958 et de 1975 numérisées, l'importante réduction de la couverture végétale, surtout entre 1958 et 1975, et l'amplification des remaniements éoliens, notamment depuis 1975. Ces travaux ne concernaient qu'un territoire réduit, car une photographie de 1958 (au 1: 50 000) et une de 1975 (au 1: 60 000) avaient été numérisées par balayage. Nous avons donc envisagé d'étendre la méthode à des secteurs plus étendus et variés. L'acquisition de trois images MSS de 1973 et de 1976 ainsi que d'une image TM de 1987, nous a permis de poursuivre notre recherche dans cette voie. Cependant, il faut signaler ici que, comme mentionné plus haut, la dégradation de la couverture végétale a été sévère surtout au début de la sécheresse, c'est-à-dire entre 1968 et 1973. Or, les images satellitaires ne sont disponibles que depuis 1972, avec le lancement de ERTS devenu Landsat-1. Ceci constitue une limitation dans l'estimation des dégradations du paysage par rapport à des situations antérieures.

Pour se mettre dans une situation optimale de comparaison des images MSS et TM, qui ont des caractéristiques différentes quant à la position des bandes spectrales et la résolution spatiale, une campagne de mesures radiométriques *in situ* a été réalisée en vue de l'étalonnage des données. Une cinquantaine de mesures ont été réalisées avec un spectroradiomètre à haute résolution GER IRIS MARK V (995 canaux, 2 à 4 nm de résolution). Les signatures spectrales des principaux éléments du paysage ont été établies

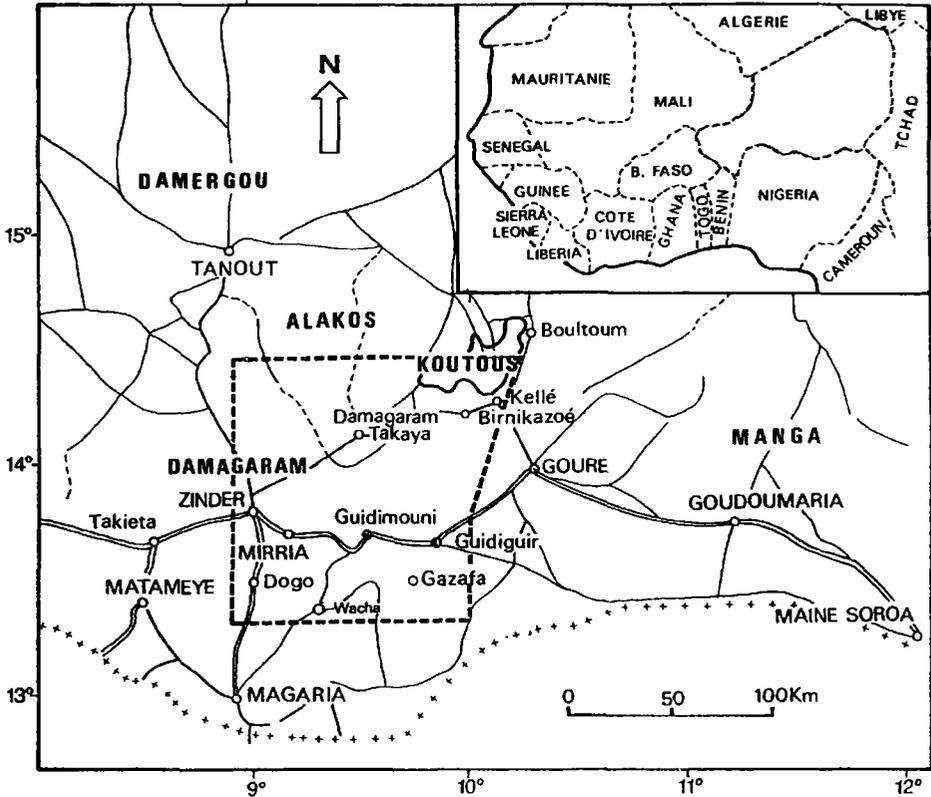


Figure 1. Localisation du secteur d'étude

à partir des mesures radiométriques effectuées sur le terrain : végétation verte et sèche, différents types de sable, dont les sables blancs remaniés, eau, affleurements rocheux (quartzite, grès, granites), grenailles et cuirasses latéritiques, glaçages. Les courbes de réflectance des sables ocre et rouges, ainsi que celles des grenailles latéritiques et des grès altérés sont marquées par une concavité de départ liée à l'absorption par les oxydes de fer, dans le visible et le proche infrarouge (KARIMOUNE *et al.*, 1992; TRÉFOIS, 1992).

Au cours de la même campagne, des estimations de taux de couverture des couronnes ont été effectuées. Ces taux très élevés dans les lits de certains oueds et autour des mares (de 60 à 80 %) ne dépassent guère 10 % dans la partie sud et tombent à moins de 5 %, voire même à 1 % dans le secteur nord. Même dans le sud mieux arrosé, les arbres sont rares sur les sommets des dunes qui correspondent à des champs abandonnés, colonisés par une végétation arbustive de *Leptadenia pyrotechnica*, indicatrice de l'épuisement des sols et de la dégradation des paysages.

## 2.2. Traitements

La première étape a consisté à superposer des images MSS sur la sous-scène TM dont le format et la taille des pixels ont été choisis comme référence. Ce choix a été dicté par le fait que l'image TM présentait une géométrie moins déformée que celle des images MSS.

La deuxième étape a consisté en un réétalonnage des données. Les valeurs physiques mesurées par les capteurs des satellites ont été calculées, utilisant les valeurs de luminance minimale et maximale pour les images MSS (ROBINOVE, 1982) et les gains et niveaux de sortie à entrée nulle donnés sur la bande CCT pour la scène TM. Ensuite, une correction atmosphérique (logiciel 5S, TANRÉ *et al.*, 1990) a été appliquée. Les paramètres pris en compte dans cette correction atmosphérique sont, entre autres, un climat tropical avec aérosol de type continental et une visibilité horizontale de 30 km. Ce dernier paramètre est, en fait, tout à fait arbitraire, ne correspondant pas aux données météorologiques précises du moment de l'acquisition des images.

Les valeurs physiques obtenues ont été ensuite recalées dans une fourchette de 256 niveaux de gris (TRÉFOIS *et al.*, 1992).

Sur la base des données réétalonnées, des compositions colorées (rouge : 4, vert : 3, bleu : 2, pour l'image TM et rouge : 6, vert : 5, bleu : 4 pour les images MSS) ont été réalisées; leur interprétation visuelle donne déjà des éléments d'appréciation des changements intervenus entre les trois dates de prise de vues.

Les indices de végétation, soit l'indice de végétation de la différence normalisée NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) et l'indice foliaire, ont été ensuite calculés pour les trois dates et superposés en une composition colorée où l'année 1973 est représentée en rouge, 1976 en vert, et 1987 en bleu (fig. 24-2, voir cahier couleur).

Cette démarche permet de mettre en évidence l'évolution de la couverture végétale. La dominance d'une couleur sur une partie de la zone étudiée traduit l'abondance de la végétation pour l'année à laquelle correspond la couleur considérée. Les secteurs où aucun changement n'est intervenu apparaissent en blanc et ceux où il n'y avait pas de végétation aux trois dates sont en noir.

Pour être dans des conditions optimales de comparaison, les histogrammes des images MSS ont été recalés sur celui de l'image TM. L'image TM ayant une meilleure résolution spatiale et radiométrique que les images MSS, elle semblait présenter, *a priori*, une meilleure dynamique. Aussi a-t-elle été prise à nouveau comme référence pour recalibrer les histogrammes des deux autres images. Mais ce traitement n'a apporté aucun changement dans la qualité des résultats.

L'étape suivante a été le calcul du modèle de mélange des spectres. Sur la base de la connaissance du terrain, les principaux éléments du paysage ont été identifiés sur les compositions colorées : végétation, sable fixé et sable remanié, cuirasse latéritique, eau, glaçages auxquels s'ajoute l'ombre. Le principe du modèle de mélange repose sur le fait que, dans les régions désertiques ou subdésertiques, déjà à l'échelle du pixel, la réponse spectrale correspond non pas à un seul élément du paysage, mais à la combinaison de réponses élémentaires où interviennent la végétation, différents types de sols, l'ombre, etc. Au contraire, les classifications et les calculs d'indices de végétation supposent qu'un élément unique du paysage correspond à au moins quelques pixels (SMITH *et al.*, 1990).

Le postulat de départ du modèle de mélange suppose que les principales variations spectrales à l'intérieur d'une scène sont le fait du mélange, en proportions variables, d'un petit nombre d'objets (SMITH *et al.*, 1990). La contribution à la réflectance globale, de chacun de ces éléments, considérés comme «termes extrêmes», est calculée, pour chaque pixel, par l'équation :

$$DN_b = \sum_{i=1}^n F_i \cdot DN_{i,b} + E_b \quad \left( \sum F_i = 1 \right)$$

où  $DN_b$  = compte numérique d'un pixel de l'image dans la bande b;  
 $F_i$  = fraction représentée par le terme extrême i;

$DN_{i,b}$  = réflectance du terme extrême  $i$  dans la bande  $b$ ;

$n$  = nombre des termes extrêmes;

$E_b$  = somme d'erreurs, dans la bande  $b$ , pour l'assiette de termes extrêmes utilisés (SMITH *et al.*, 1990).

Dans la présente étude, les termes extrêmes choisis sur la base du travail de vérité terrain et des mesures *in situ* sont : la végétation verte, les sables, la cuirasse, les glaçages et l'ombre.

Des images de mélanges spectraux ont ensuite été réalisées avec les termes extrêmes tirés des données satellitaires étalonnées, puis avec ceux mesurés sur le terrain et, enfin, à partir d'une régression image-terrain. Il est important de remarquer que ces termes, qui sont décrits comme des objets réels, sont définis dans le modèle par des valeurs spectrales, et déterminés par l'interaction du rayonnement électromagnétique avec les objets. À la résolution spectrale des capteurs des satellites, la relation objet-signature spectrale peut ne pas être univoque. La signature spectrale d'un sable rubéfié par les oxydes de fer présentera des caractéristiques intermédiaires entre celles d'un sable blanc et d'une latérite, ce qui ne correspond pas à la réalité minérale. Connaissant ces limitations, on exploitera les résultats du modèle de façon critique.

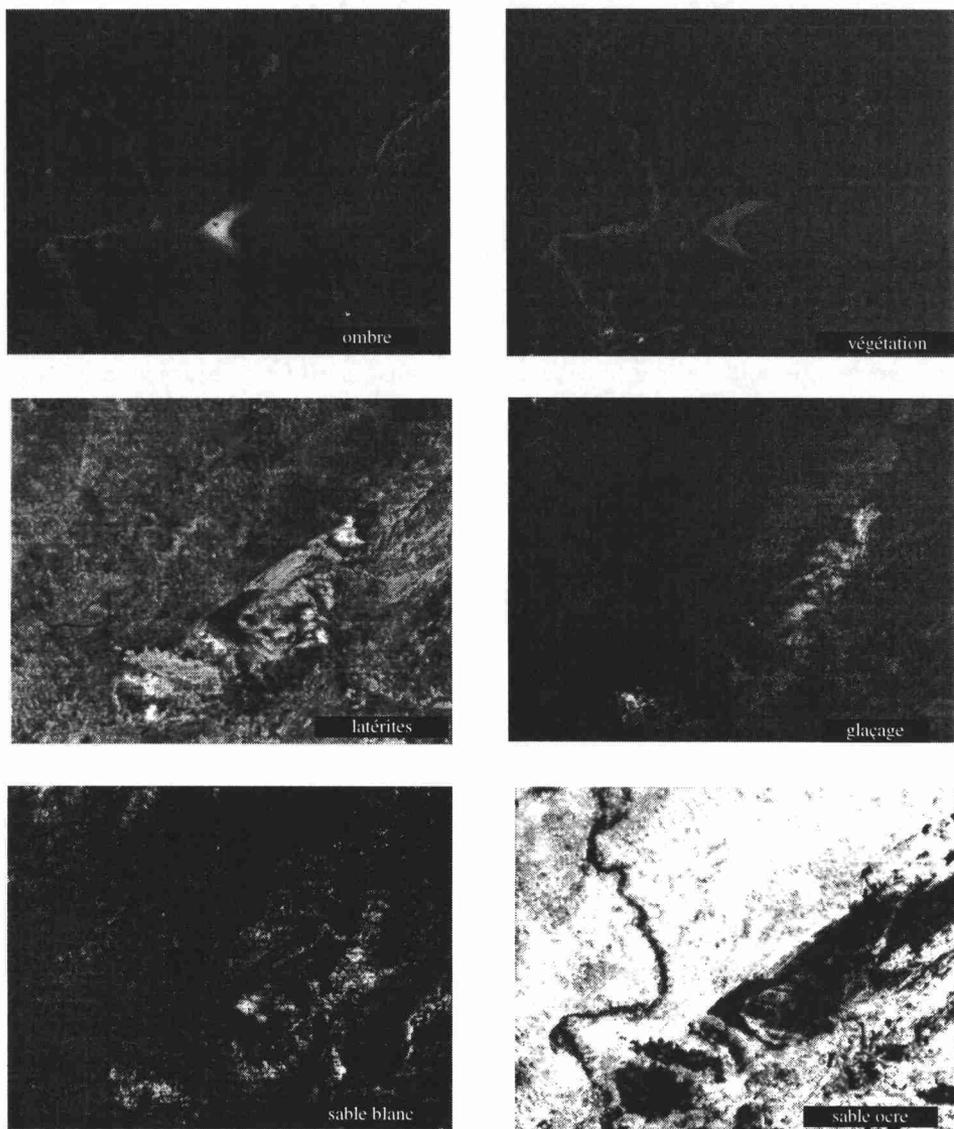
### 3. Résultats

Les images, réalisées à partir de mesures de réflectance de quelques éléments caractéristiques du terrain, comportent de nombreuses confusions, notamment entre cuirasses latéritiques et sables ocre. Malgré les corrections appliquées, il subsiste des différences entre le signal satellitaire et les mesures *in situ*, dues aux différences d'échelles de mesures (50 cm<sup>2</sup> *in situ*, contre 900 m<sup>2</sup> pour le satellite), aux conditions d'éclairage et à l'étalonnage absolu des capteurs et du radiomètre de terrain. Les résultats obtenus à partir des termes extrêmes extraits des régressions terrain-image donnent une bonne représentation de l'ombre, de la végétation, des sables ocre et des sables remaniés. Par contre, les latérites et les glaçages sont surestimés. Si, pour certaines parties couvertes par les latérites, on peut encore évoquer la coloration des sables, celle-ci ne peut tout expliquer, en particulier l'extension des cuirasses à des zones de végétation.

Les meilleurs résultats sont ceux réalisés avec des éléments caractéristiques choisis sur l'image. Dans ce cas, seuls les sables remaniés sont sous-estimés (fig. 3).

Cette méthode a ensuite été appliquée aux données MSS. Des compositions colorées ont été réalisées, pour les sites choisis, soit le sud-est de la ville de Zinder et le Koutous méridional.

Pour la région située au sud-est de Zinder, nous disposons des images aux trois dates, soit 1973, 1976 et 1987. La comparaison de compositions colorées de la latérite (R), de la végétation (V) et des sables (B) semble indiquer une légère augmentation de la proportion de la végétation entre 1973 et 1976 et, par contre, une certaine diminution des remaniements éoliens. Il faut souligner ici que la plus grande crise a eu lieu pendant la période sèche de 1972-1973 et qu'elle avait été précédée par une série d'années sèches avec le déficit pluviométrique le plus sévère en 1972. L'année 1976 a, au contraire, été précédée par deux années moyennes. En outre, la date de saisie de l'image de 1973 est plus tardive par rapport à celle de 1976 (11-03-1973 contre 10-01-1976). Ceci pourrait expliquer l'existence d'une végétation verte plus fournie et des remaniements éoliens moins importants en 1976 qu'en 1973.



**Figure 3.** Images de différents éléments du paysage obtenues à partir du modèle de mélanges spectraux (secteur SE de Zinder)

La comparaison de l'image de 1976 avec celle de 1987 fait ressortir une réduction de la couverture végétale. Celle-ci, qui était assez diffuse auparavant, se contracte et se concentre de façon quasi exclusive dans le lit des oueds et autour des mares où sa densité semble diminuer par rapport à la situation de 1976.

Quant aux sables remaniés, leur proportion s'accroît à nouveau, soulignant l'amplification des processus éoliens. Ces sables se localisent autour des villages ou dans le prolongement des couloirs entre les reliefs de quartzites, mais quelquefois aussi, sous le vent de ces reliefs.

Autour des villages, la végétation arborée et arbustive a été complètement détruite par une demande de plus en plus élevée en bois de chauffe. L'effet protecteur de la strate ligneuse y est donc quasiment nul. Par ailleurs, le piétinement excessif par les hommes et les animaux détruit la cohésion des sables, rendant ceux-ci plus susceptibles à l'activité éolienne. Les remaniements de sable dans le prolongement des couloirs entre reliefs sont dus au renforcement de la vélocité des vents suite à la diffuence que ceux-ci subissent à l'abord des obstacles (KARIMOUNE *et al.*, 1993). La faible protection des sols des crêtes dunaires, conséquence de la réduction du couvert végétal, provoque une efficacité accrue des processus éoliens. Dans le cas où les sables sont situés sous le vent des massifs, ils sont plus facilement balayés par les tourbillons qui naissent lorsque les courants éoliens franchissent ces obstacles. L'image du Koutous (fig. 24-4, voir cahier couleur) nous offre quelques exemples de cette évolution. En 1976, les sables remaniés sont localisés soit dans les lits des oueds, soit au débouché de ceux-ci, constituant ainsi des cônes au pied du plateau du Koutous, soit enfin, aux abords des villages. En 1987, la remobilisation des sables prend des proportions considérables. Les dépôts se généralisent au vent des reliefs, tandis qu'en position sous le vent, la déflation et l'érosion éolienne se remarquent à cause d'une structure longitudinale et effilée des sables résiduels. Cela va, bien entendu, de pair avec la réduction de la couverture végétale qui, en 1987, se concentre, ici aussi, dans les lits des oueds et autour des mares avec une densité moins élevée qu'en 1976.

#### **4. Conclusion**

En dépit de quelques confusions thématiques liées à la nature spectrale des variables utilisées, le modèle permet de dégager la proportion des principaux éléments du paysage et, ainsi de suivre leur évolution. La limitation principale est sans doute le nombre peu élevé des éléments pris en compte face à une réalité plus complexe du paysage. En outre, d'autres paramètres extrinsèques, comme la correction atmosphérique ou la sensibilité des capteurs, peuvent avoir joué un rôle limitateur dans la précision des résultats. Cependant, sur les deux sites la correspondance est frappante entre les indices de végétation, l'interprétation des compositions colorées simples, d'une part, et les images des résultats des modèles de mélanges, d'autre part, ce qui permet de penser que c'est là un moyen intéressant d'appréciation de l'évolution globale des phénomènes de désertification dans les régions sahéliennes.

Aussi, pensons-nous pouvoir étendre cette approche à d'autres secteurs de la zone d'étude afin d'aboutir à une cartographie plus exhaustive de la dégradation de la végétation et de ses conséquences dans la région de Zinder. On peut également envisager l'application de cette technique à d'autres régions du Niger où des images multidates sont disponibles. Ainsi arriverait-on à cerner, pour le Sahel nigérien, les zones les plus sensibles et envisager des mesures de protection et de gestion plus rationnelles de l'environnement.

#### **5. Références**

- AUBREVILLE, A. 1949. Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale. Société d'éditions géographiques et coloniales, Paris, 351 p.
- CHAVEZ, JR, P.S. 1989. Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper multispectral images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 55, n° 9, p. 1285-1294.

*Contribution de la télédétection et des mesures spectrales à l'étude de la désertification au Niger*

- DE FABREIGUES, B.P. 1980. La végétation. *in* Atlas du Niger, Éditions Jeune Afrique, Paris, p. 20-21.
- JAQUEMINET, C. 1990. Des indicateurs morphologiques pour mesurer le changement des milieux sahéliens à partir des images satellitaires à haute résolution. *in* LAFRANCE, P. et DUBOIS, J.-M. (réd.). Apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse. Collection Universités francophones - Actualité scientifique, Éditions AUPELF-UREF et John Libbey Eurotext, Paris, p. 129-144.
- JUSTICE, C. O. and HIERNAUX, P. Y. 1986. Monitoring the grasslands of the Sahel using NOAA AVHRR (National Oceanic and Atmospheric Administration; Advanced Very High Resolution Radiometer) data : Niger, 1983. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 7, n° 11, p. 1475-1497.
- KARIMOUNE, S., ALEXANDRE, J. et OZER, A. 1993. Suivi par télédétection, de l'évolution de la désertification dans la région de Zinder (Niger). *in* DUBOIS, J.-M., CAVAYAS, F. et LAFRANCE, P. (réd.). Télédétection appliquée à la cartographie thématique et topographique. Collection Universités francophones - Actualité scientifique, Éditions AUPELF-UREF et Les Presses de l'Université du Québec, Québec, p. 151-159.
- KARIMOUNE, S., OZER, A. et ERPICUM, M. 1990. Les modelés éoliens de la région de Zinder (Niger méridional). Étude de photogéomorphologie. Note préliminaire. *in* LAFRANCE, P. et DUBOIS, J.-M. (réd.). Apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse. Collection Universités francophones - Actualité scientifique, Éditions AUPELF-UREF et John Libbey Eurotext, Paris, p. 145-161.
- KARIMOUNE, S., OZER, A., TRÉFOIS, Ph. et GOOSSENS, E. 1992. Recherche par télédétection sur la désertification au Sahel (Niger). Communication présentée au «Workshop» de l'Association européenne de laboratoires de télédétection : Remote sensing and GIS integrated for the management of less favoured areas, Louvain-la-Neuve, Belgique, 29 juin-1<sup>er</sup> juillet 1992.
- LE HOUÉROU, H. N. 1979. Écologie et désertification en Afrique. *Travaux de l'Institut de géographie de Reims*, n° 39-40, p. 5-26.
- ROBINOVE, C. J. 1982. Computation with physical values from Landsat digital data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 48, n° 5, p. 781-784.
- SMITH, M. O., USTIN, S. L., ADAMS, J. B. and GILLEPSIE, A. R. 1990. Vegetation in deserts : I. A regional measure of abundance from multispectral images. *Remote Sensing of Environment*, n° 31, p. 1-26.
- TANRÉ, D., DEROO, C., DUHAUT, P., HERMAN, M., MORCRETTE, J. J., PERBOS, J. and DESCHAMPS, P. V. 1990. Description of a computer code to simulate the satellite signal in the solar spectrum : the 5S code. *International Journal of Remote Sensing.*, vol. 11, n° 4, p. 659-668.
- TOWNSHEND, J. R. G. and JUSTICE, C. O. 1986. Analysis of the dynamics of african vegetation using the normalized difference vegetation index. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 7, n° 11, p. 1435-1445.
- TRÉFOIS, Ph. 1992. Rapport de mission Damagaram-Mounio et Koutous (Niger). Janvier 1992. Document interne non publié, Laboratoire de télédétection aérospatiale, Section de cartographie, Musée royal de l'Afrique centrale, Tervuren, 25 p.
- TUCKER, C. J., JUSTICE, C. O. and PRINCE, S. D. 1986. Monitoring the grasslands of the Sahel 1984-1985. *International Journal of Remote Sensing.*, vol. 7, n° 11, p. 1571-1581.



# 25

## Détection et classification automatique de maladies forestières

MOHAMMED KHAMADJA <sup>1</sup>, ATILLA BASKURT <sup>2</sup> et  
ROBERT GOUTTE <sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Institut d'électronique, route d'Ain El Bey, 25000 Constantine, Algérie;  
téléphone : +213 (4) 68-09-99; télécopieur : +213 (4) 69-60-81*

<sup>2</sup> *Laboratoire de traitement du signal et ultrasons, Institut national des sciences  
appliquées de Lyon (INSA), bât. 502, 69621 Villeurbanne cedex, France;  
téléphone : +33 72-43-82-27; télécopieur : +33 72-43-85-26*

### Résumé

L'objet de ce travail est de présenter une méthode automatique d'analyse et de caractérisation d'images, en vue d'une classification ultérieure, à partir de données multibandes. Cette méthode est basée sur la mesure de la réflectance foliaire d'un couvert végétal. En effet, l'allure de la réponse spectrale d'une forêt est différente, selon que les arbres la constituant sont sains ou malades. Les films infrarouges couleurs, qui ont la propriété de détecter cette différence, particulièrement marquée dans les bandes de 600 à 700 nm et de 700 à 900 nm, en plus d'un pouvoir de résolution très élevé, sont utilisés pour étudier les couverts végétaux. La classification se fait à partir des histogrammes bidimensionnels. Ces derniers sont calculés soit à partir des canaux bruts, soit à partir de la combinaison linéaire de ces derniers. Les résultats obtenus sont satisfaisants puisque, dans l'ensemble, ils sont conformes à ceux donnés par la photo-interprétation visuelle.

## 1. Introduction

En télédétection, les atteintes de l'état sanitaire des zones boisées, peuvent se traduire au niveau de la texture des houppiers (pertes de feuilles ou d'épines) et de la réflectance moyenne du couvert végétal; cette dernière est fonction principalement de l'évolution de la réflectance de la feuille et de l'apparition du tronc ou des branches.

Les modifications texturales du houppier peuvent être mises en évidence par des méthodes dites structurelles (TOMITA *et al.*, 1979; HARALICK *et al.*, 1973; HARALICK, 1979), qui sont fondées sur l'étude des primitives existant dans une image et les méthodes statistiques (HARALICK *et al.*, 1973; GALLOWAY, 1975) fondées sur l'étude des fréquences spatiales.

La réflectance foliaire fait l'objet de la présente étude. En effet, l'allure spectrale de la courbe de réflectance des arbres est différente selon que ces derniers sont sains ou malades. Cette différence détectée par le film infrarouge couleur (IRC) est surtout marquée dans les bandes de 600 à 700 nm (où elle augmente pour l'arbre malade) et de 700 à 900 nm (où elle diminue).

La numérisation de l'image équivaut à mesurer, point par point, la densité du film dans la bande spectrale de chaque couche, c'est-à-dire indirectement l'énergie reçue dans le rouge, l'infrarouge et le vert lors de la prise de vue. Elle permet de mettre à profit cette différence de luminance de l'objet. Alors, en effectuant diverses opérations et transformations sur les différents canaux, on essaie de déterminer la meilleure combinaison caractérisant de manière biunivoque un type d'arbre, dans un état sanitaire donné. Cette approche permet ainsi d'identifier l'arbre et, éventuellement, la maladie qui le ronge, avec un taux d'erreur faible lors de la classification.

## 2. Réflectance foliaire

En analysant la courbe de réflectance (fig. 1), on constate qu'elle présente trois zones essentielles :

- une première zone, correspondant à la couleur verte (environ 550 nm) de réflectance, voisine de 18 %;
- une seconde zone, où la réflectance tombe plus bas que 10 % et qui correspond aux longueurs d'ondes comprises entre 600 et 700 nm;
- une troisième zone où la réflectance atteint des valeurs supérieures à 50 % et qui correspond aux longueurs d'ondes du proche infrarouge.

Cette analyse concerne les feuillus sains, mais c'est également l'allure générale pour les différents types d'arbres, aux valeurs de réflectance près. Ces courbes sont, par contre, modifiées pour les arbres malades. En effet, on assiste alors à un phénomène de balancier qui se traduit par une chute dans le proche infrarouge et une remontée dans les autres zones. En conclusion, l'utilisation du film IRC paraît appropriée pour la détermination de l'état sanitaire d'une zone boisée, à partir de la mesure de sa réflectance. Car en plus de son pouvoir de résolution assez élevé, (AGFA-GEVAERT, 1983), le film IRC a ses couches sensibles centrées à l'intérieur des trois canaux, rouge, infrarouge et vert, ce qui correspond aux trois longueurs d'ondes qui caractérisent le couvert végétal.

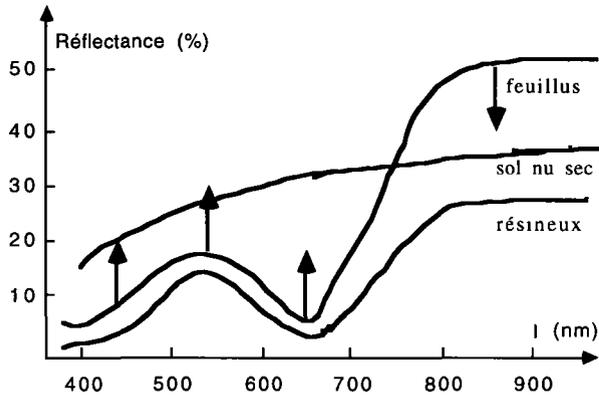


Figure 1. Courbes de réflectance foliaire d'un couvert végétal

### 3. Acquisition et traitement de l'image

La chaîne d'acquisition et de traitement de l'image se présente selon le schéma synoptique de la figure 2. Le flux lumineux, modulé par la réponse spectrale de l'objet, est intégré par l'émulsion photographique où il provoque des transformations chimiques (formation de l'image latente). Cela conduit, après développement, à une image qui traduit les différentes luminances de l'objet. L'émulsion photographique utilisée est un film IRC. L'image utilisée a été prise à l'aide d'un appareil photographique du type Hasselblad 24 par 36 mm, avec un objectif de 1 000 mm sur un film IRC et à une altitude de 500 m au-dessus du sol, dans le cadre d'une étude méthodologique pour la détection des maladies forestières. Elle nous a été fournie par l'Institut national de recherche agronomique (INRA) de Toulouse, qui en a assuré l'interprétation visuelle. La numérisation, dans les trois canaux (jaune, cyan et magenta), a été faite, à l'aide d'un microdensitomètre à tambour, à partir d'une diapositive de 63,5 x 60,5 mm avec un pas de 50 μm. Chaque pixel de l'image a été codé avec un mot de 8 bits. Pour chaque canal, ceci nous donne une dynamique de 256 niveaux de gris.

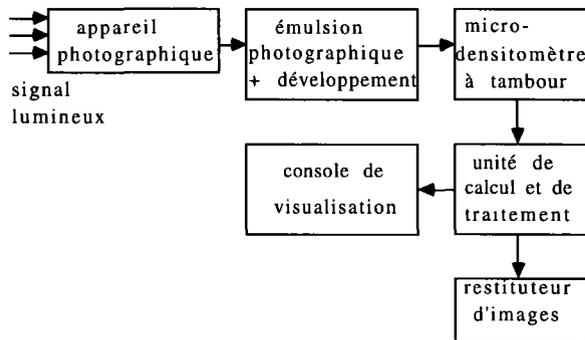


Figure 2. Schéma synoptique de la chaîne d'acquisition et de traitement de l'image

#### 4. Méthodes de caractérisation

La reconnaissance des types de végétation ou du degré de leur atteinte sanitaire est déduite de la relation entre ces types, ou ces états, et les données multispectrales associées. Les résultats, du point de vue numérique, sont donc des niveaux de gris accordés à chaque classe de terrain. Les deux étapes d'une classification (SCHOWENGERDT, 1983; MEISEL, 1972) sont :

- la recherche des caractéristiques des classes auxquelles l'appartenance ou non des différents points de l'image est décidée;
- la classification des points de l'image.

Du fait de notre connaissance *a priori* de l'image, la méthode retenue pour la classification est la méthode supervisée. Les zones d'entraînement sont déterminées à partir :

- soit de la partition de l'histogramme bidimensionnel, calculé à l'aide des canaux les moins corrélés, pour la fenêtre étudiée; ceci permet d'avoir une idée sur le nombre de classes que la fenêtre contient puisqu'on associe à chaque nuage de points une classe; la détermination des zones d'entraînement se fait en traçant des rectangles à l'intérieur de chaque nuage (fig. 3a); on relève leurs limites sur chacun des canaux;

- soit du calcul de la valeur moyenne et de l'écart-type pour la fenêtre de l'image; on délimite la zone étudiée, à l'aide de la console de visualisation, puis on choisit un ensemble de niveau de gris homogène (ce qui caractérise en principe un même type d'arbre ou de maladie); on calcule la moyenne et l'écart-type pour la zone sélectionnée, qui permettent de tracer les rectangles (fig. 3b) devant servir comme zone d'entraînement.

Une fois les zones d'entraînement déterminées et testées, on effectue la classification sur l'ensemble de l'image. Le programme utilisé permet de distinguer jusqu'à 15 classes différentes.

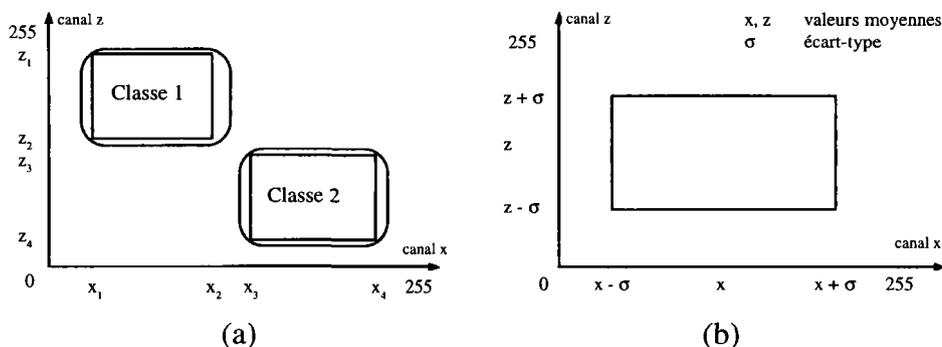


Figure 3. Méthodes de détermination des zones d'entraînement : a) histogramme bidimensionnel; b) valeur moyenne et écart-type

## **5. Résultats**

Des fenêtres, contenant des éléments connus (différents types d'arbres, clairières, niveau de maladie, etc.) ont été sélectionnées.

Notre méthode a été mise en oeuvre, en utilisant premièrement l'histogramme bidimensionnel avec les canaux magenta et cyan, pour la séparation entre :

1- zone boisée et clairières : l'histogramme, donné par la figure 4a, montre l'existence d'au moins deux classes différentes; la classification à partir de ces deux nuages est présentée sur la figure 5a;

2- types d'arbres et l'ombre : les résultats sont donnés sur la figure 4b pour l'histogramme où on distingue trois classes et sur la figure 5b pour la classification; il y avait effectivement des épicéas et des sapins en plus de l'ombre;

3- arbre malade et arbre sain : il s'agissait de différencier entre arbres, d'un même type celui qui est sain de celui qui est faiblement défolié et de celui qui est complètement défolié ou mort. Ces deux derniers ont été mis, apparemment dans la même classe, puisque l'histogramme (fig. 4c) ne montre que trois classes; la classification est présentée sur la figure 5c.

Dans un deuxième temps, la méthode du calcul des critères d'appartenance (moyenne et écart-type) a été utilisée avec un succès similaire à celui de la première méthode.

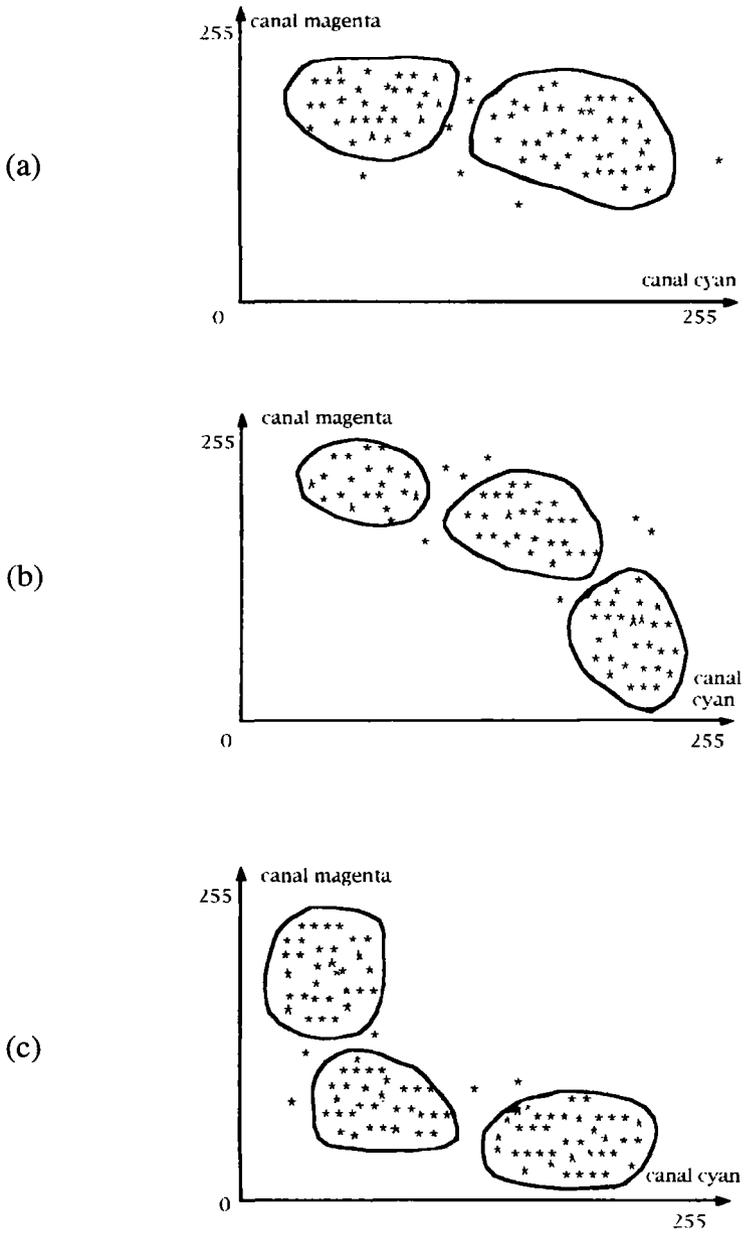
Dans le cadre de cette étude, des essais de caractérisation à partir des transformations des données spectrales, telles que l'amélioration du contraste, ont été effectués sur les données spectrales. Par ailleurs, d'autres essais, utilisant des combinaisons linéaires sur les données spectrales, ont été faits. Ces combinaisons linéaires consistaient en des calculs de différence et de rapport entre les différents canaux. Ces opérations avaient pour but de nous affranchir des variations de luminances de la cible.

On constate que, dans le cas de la différence entre canaux, l'histogramme donne un nuage très dispersé et donc ne permet aucune classification. Par contre, les rapports donnent un résultat pratiquement identique à celui effectué avec les canaux bruts.

## **6. Conclusion**

Les résultats obtenus sont satisfaisants puisqu'ils ont permis, dans l'ensemble, de faire la distinction entre les différentes composantes de l'image étudiée en accord avec l'interprétation visuelle. Cependant, cette méthode gagnerait à être améliorée afin qu'on puisse objectivement affecter, à chaque type d'arbre ou à un état sanitaire donné, une signature qui pourrait l'identifier sans équivoque. Il serait intéressant de pousser plus loin les investigations en ce sens :

- l'utilisation d'autres méthodes de classification et d'autres critères d'appartenance, beaucoup plus discriminants que ceux utilisés ici;
- l'utilisation de l'histogramme à trois dimensions apporterait certainement beaucoup plus d'information, en autorisant, une meilleure définition des zones d'entraînement;
- la caractérisation des états sanitaires des feuilles, en plus de la caractérisation globale du houppier, et la définition de critères de classification à partir des modifications texturales.

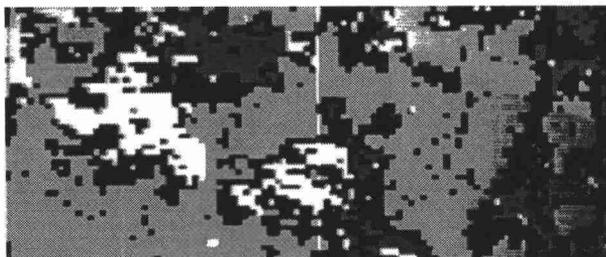


**Figure 4.** Histogrammes bidimensionnels : a) relatif à la fenêtre 1; b) relatif à la fenêtre 2; c) relatif à la fenêtre 3

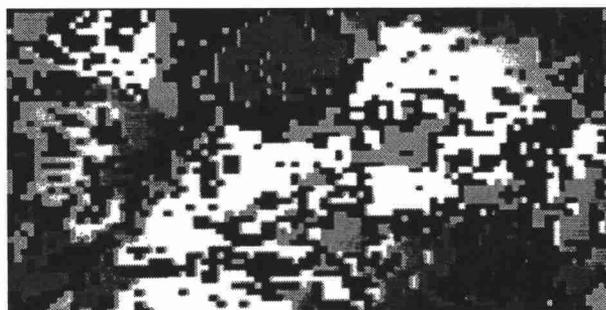
(a)



(b)



(c)



**Figure 5.** Résultat de classification : a) à l'aide de l'histogramme de la figure 4a (on y distingue 2 classes : la zone boisée et la clairière); b) à l'aide de l'histogramme de la figure 4b (on y distingue 3 classes : deux types d'arbres différents et l'ombre); c) à l'aide de l'histogramme de la figure 4c (on y distingue 3 classes : arbre sain, arbre faiblement défolié et arbre complètement défolié ou mort)

## **7. Références**

- AGFA-GEVAERT 1983. Technologie et notions élémentaires de sensitométrie. Notice d'utilisation, 20 p.
- GALLOWAY, M. M 1975. Texture to analysis using gray level run length. *Computer Graphics and Image Processing*, vol. n° 4, p.172-179.
- HARALICK, R. M., SHANMUGAN, K. and DISTEIN, I. 1973. Textural features for images classification. *IEEE Trans. Syst. Man and Cyber*, n° 3, p. 610-621.
- HARALICK, R. M. 1979. Statistical and structural approaches to texture. *Proceedings of IEEE*, n° 67, p. 786-804.
- MEISEL, W. S. 1972. *Computer-oriented approaches to pattern recognition*. Academic Press, New-York, 350 p.
- SCHOWENGERDT, R. A. 1983. *Techniques for image processing and classification in remote sensing*. Academic Press, New-York, 420 p.
- TOMITA, F., SHIRAI, Y. and TSUJI, S. 1979. Description of textures by structural analysis. 6<sup>th</sup> International Joint Conference Artificial Intelligence (IJCAI), Tokyo, p. 884-889.

## **La sécheresse de 1990-1991 et de 1991-1992 à Madagascar vue à partir des images infrarouges Météosat et les données conventionnelles**

SIMONE RANDRIAMANGA <sup>1</sup>, JEAN-PAUL LAHUEC <sup>2</sup>, DOMINIQUE DAGORNE <sup>2</sup>, JEANINE PENNARUN <sup>2</sup> et BERNARD GUILLOT <sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Unité d'enseignement et de recherche de géographie (UERG), Université d'Antananarivo, B.P. 907, 101 Antananarivo, Madagascar; téléphone : +261 (2) 318-04; télécopieur : +261 (2) 318-15*

<sup>2</sup> *Antenne ORSTOM, Centre de météorologie spatiale de Lannion, B.P. 147, 22302 Lannion, France; téléphone : +33 96-48-00-77; télécopieur : +33 96-05-67-37*

### **Résumé**

Les deux saisons des pluies de 1990-1991 et de 1991-1992, très déficitaires à Madagascar, sont présentées au moyen d'un catalogue d'images, réalisé à l'antenne ORSTOM de Lannion. Ces images sont issues d'un traitement de l'imagerie infrarouge Météosat dédié à la variation de la température de brillance maximum de surface. Leur interprétation montre que l'évolution des températures maximum de surface est étroitement corrélée aux variations de la pluviométrie et qu'il est possible de mettre en évidence les zones touchées par la sécheresse dans un contexte géographique et climatique très diversifié. En dernière partie, les mécanismes responsables de ces sécheresses sont analysés à partir des données météorologiques. Le déficit pluviométrique est dû à la persistance anormale de situations de type hivernal, impliquant le blocage de la Zone de Convergence Intertropicale sur l'extrême nord du pays.

## 1. Introduction

### 1.1. La zone d'étude

Localisé dans la zone chaude de l'hémisphère sud, Madagascar (fig. 1) est soumis à un régime de climat de type tropical caractérisé par deux saisons contrastées, l'une chaude et pluvieuse, et l'autre sèche et fraîche; de plus, ces saisons sont nuancées par des différences régionales. L'ouest plus sec et plus chaud contraste avec le centre, tempéré par l'altitude, et l'est de tendance subéquatoriale. Le nord, situé dans la zone de balancement de la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT), est nettement plus arrosé que le sud, situé dans une région balayée tout au long de l'année par les perturbations frontales méridionales (PFM) d'origine polaire et évoluant dans les latitudes tempérées. Pour la plupart, ces régions ont connu, de façon plus ou moins répétée, des phases de sécheresse parfois sévères et ce, à plusieurs reprises au cours de ces dernières décennies. Il s'agit d'une sécheresse caractérisée par un déficit marqué de la pluviométrie par rapport à la normale, se manifestant soit par un retard de la saison des pluies soit par l'insuffisance ou l'arrêt des précipitations durant des périodes plus ou moins longues (RATSIVALAKA-RANDRIAMANGA, 1982). Les conséquences en sont parfois catastrophiques et durement ressenties par la population, surtout dans le sud du pays. Elles se traduisent par des disettes ou des famines qui occasionnent de nombreuses pertes en vie humaine et en cheptel. Elles provoquent également une émigration temporaire à plus ou moins longue distance, ce qui désorganise la structure socio-économique régionale (RATSIVALAKA-RANDRIAMANGA, 1985). Tel fut le cas de la dernière phase sèche qui a provoqué une famine très sévère et remarquable dans le sud de Madagascar en 1992.

### 1.2. Objectifs

Le premier objectif de ce texte est de tester la pertinence d'une méthodologie couramment utilisée à l'antenne ORSTOM en matière de suivi des anomalies climatiques au Sahel (LAHUEC *et al.*, 1992). Depuis 1986, en effet, l'imagerie infrarouge Météosat est utilisée à des fins de suivi qualitatif et quantitatif de la saison des pluies en Afrique de l'Ouest. Ces applications s'effectuent dans le cadre d'un programme intitulé «Veille Climatique Satellitaire» (GUILLOT, 1985). Elles reposent principalement sur l'utilisation de deux fichiers dérivés de l'imagerie satellitaire infrarouge : la température de brillance maximum de surface des sols (TMAX) et le nombre d'occurrences de nuages à sommet froid définies par seuillage thermique à l'échelle du pixel Météosat (< -40 °C).

Ces fichiers de base sont régulièrement documentés depuis 1986 par période décadaire à l'origine, par période pentadaire depuis 1987. Cependant, jusqu'à présent, aucune application de la méthode impliquant une comparaison détaillée des données satellitaires et des données de terrain n'avait été tentée en dehors de l'Afrique de l'Ouest. L'exemple de Madagascar se révèle donc être un test particulièrement intéressant dans la mesure où la grande île des mers du Sud offre des conditions géographiques et climatiques très différentes de la zone soudano-sahélienne, avec notamment des effets orographiques très accusés, des influences cycloniques ou de perturbations d'origine tempérée au sud, des effets côtiers, etc. Les conditions de sécheresse très sévères qui ont caractérisé les saisons 1990-1991 et 1991-1992 dans le sud de Madagascar facilitaient bien entendu le choix de la période la plus appropriée au test d'application.

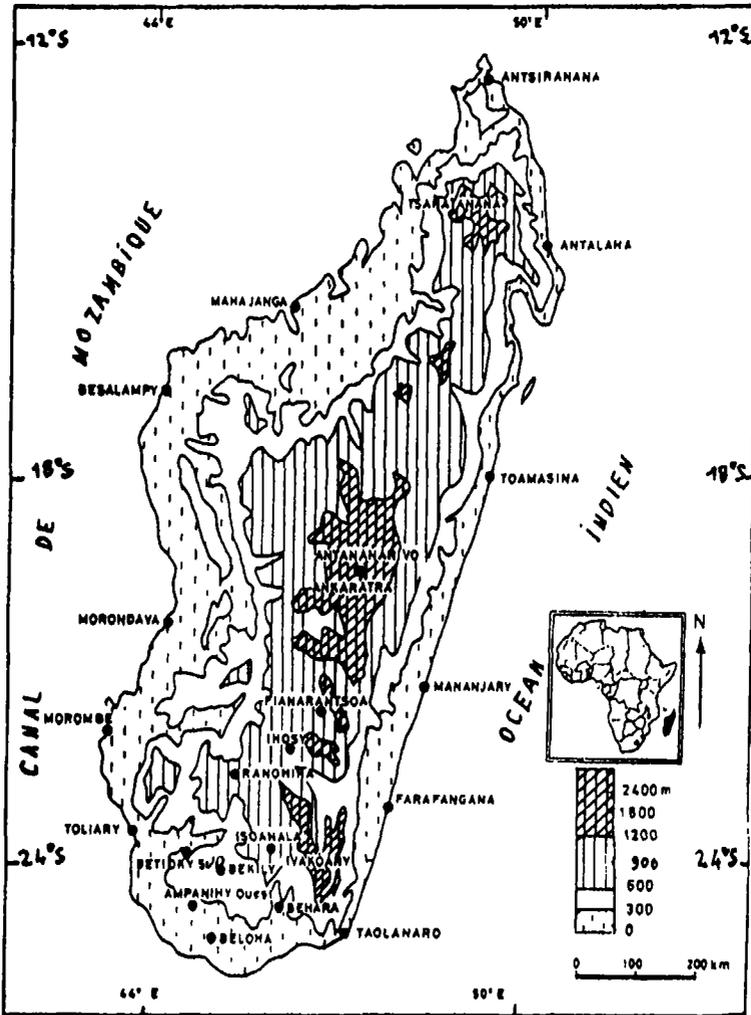


Figure 1. Localisation de la zone d'étude et des stations météorologiques

Malheureusement, il nous est impossible d'appliquer à Madagascar l'ensemble des techniques mises en oeuvre pour le suivi de l'hivernage en Afrique soudano-sahélienne. En effet, la limite sud de la zone traitée pour l'élaboration des fichiers d'occurrences de nuages à sommet froid passe aux environs de 18° S. Force est donc de se priver de l'utilisation combinée des images et de confier aux seules images de température de surface du sol le talent de révéler les aires touchées par la sécheresse. Cependant, avant de juger de la pertinence des images TMAX, il importe de présenter la sécheresse de ces deux saisons à travers un bref commentaire des relevés pluviométriques.

## **2. Caractérisation des saisons des pluies 1990-1991 et 1991-1992**

### **2.1. Les données utilisées**

Les observations ont porté sur les relevés pluviométriques des saisons chaudes et pluvieuses 1990-1991 et 1991-1992, qui ont été comparés aux données corrigées de la normale trentenaire 1931-1960 ou, à défaut, celles des périodes 1900-1930 ou 1900-1970 de 25 stations météorologiques, réparties dans les différentes régions climatiques de Madagascar (fig. 1). Mais la série pluviométrique n'a pas toujours été complète pour quelques stations du sud.

### **2.2. Les résultats de l'étude**

La saison pluviométrique 1990-1991 a été déficitaire pour les stations étudiées à l'exception d'Antsiranana et d'Antalaha. Il en fut de même pour 1991-1992. Paradoxalement, si la quantité de pluie enregistrée est déficitaire pour la plupart des stations, le nombre de jours de pluie n'a pas été affecté. Ceci est dû à la prédominance des pluies fines sur les grosses averses d'orage.

## **3. Méthodologie et données utilisées pour la télédétection de la sécheresse**

### **3.1. Élaboration des fichiers de température de brillance maximum de surface du sol**

L'acquisition des images Météosat est faite par le Centre de calcul du Centre de météorologie spatiale (CMS) de Lannion. Les traitements sont réalisés à l'antenne ORSTOM grâce à un ensemble de modules informatiques regroupés dans le logiciel TRISKEL.

L'idée originale consiste ici à s'intéresser, non pas à la «source» de la pluie (les nuages), mais à la «cible» (la surface du sol). Il s'agit en effet de mesurer l'impact de la pluie sur le sol à travers l'évolution de la température de surface. Dans les régions climatiquement contrastées comme celles qui nous intéressent, les variations de la température de surface du sol sont intimement liées à la variation du contenu en eau des sols et au comportement de la végétation. De manière générale et très schématique, les sols nus et secs se réchauffent et se refroidissent beaucoup plus vite que les sols humides recouverts de végétation active. Mettre en évidence les différences thermiques des sols revient donc à discriminer les zones sèches des zones arrosées. Dans la pratique opérationnelle, la mise en évidence des différences de température passe par la réalisation de «synthèses thermiques» pentadaires, obtenues par le calcul de la moyenne des TMAX de chacun des pixels des fichiers Météosat, pour cinq jours consécutifs. Le principe est d'obtenir pour la période incriminée un champ de luminances «claires», c'est-à-dire débarrassé de l'impact des nuages ou des aérosols. Un fichier résultat est documenté image après image, à partir d'un traitement qui ne retient que la température la plus chaude rencontrée au cours de la période sur chacun des pixels du plein disque Météosat. Le choix du paramètre de température de brillance

maximum de surface (TMAX), outre l'élimination quasi-totale des nuages, a aussi pour avantage de limiter les effets de l'absorption atmosphérique du signal par la vapeur d'eau.

La comparaison des cartes pentadaires permet ainsi de suivre l'installation ou le retrait de la saison des pluies, de repérer les enclaves sèches, ou de déceler les interruptions de saison des pluies. En bref, il est possible de suivre les péripéties de la saison des pluies dans toutes les «zones à risques» et ceci à l'échelle synoptique, moyennant, il est vrai, quelques précautions. D'autre part, l'absorption atmosphérique du signal infrarouge est importante dans le cas d'une atmosphère humide. Elle induit par conséquent un manque d'uniformité des mesures dans l'espace selon que l'atmosphère est très sèche ou très humide. Dans le cas de Madagascar, les effets de brise de mer et les entrées d'air maritime atténuent de quelques degrés la mesure de la température maximum de surface du sol du fait de l'apport d'humidité. En conséquence, les zones littorales (ou les zones de forêt dense) vont apparaître sur les images plus fraîches qu'elles ne le sont en réalité. L'utilisation des images «différences» permet cependant de s'affranchir en partie de cet inconvénient. En revanche, si dans une zone donnée, la couverture nuageuse reste présente pendant toute la pentade aux heures les plus chaudes de la journée, la valeur obtenue sera la température de surface maximum des nuages.

### **3.2. Les images satellitaires**

Les données numériques utilisées sont extraites des synthèses pentadaires «température de brillance maximum de surface» (TMAX) réalisées en routine par l'antenne ORSTOM de Lannion. Celles-ci sont utilisées pour l'élaboration de fichiers mensuels représentant la moyenne des températures maximales mesurées par le radiomètre de Météosat au cours des six périodes pentadaires, à la résolution du pixel. Grâce au logiciel Triskel, les images initialement en projection satellitaire et donc très déformées en raison de la position de Madagascar (en limite de la zone d'observation du satellite), ont été redressées en projection Mercator, puis «habillées» du trait de côte ainsi que de la localisation des principales stations du réseau synoptique. À partir des fichiers mensuels, quatre figures d'images ont été réalisées en considérant que la saison des pluies s'étend sur sept mois, soit du 1<sup>er</sup> octobre au 30 avril.

La figure 26-2 (voir cahier couleur) montre les valeurs moyennes saisonnières des TMAX pour cinq saisons des pluies successives : 1987-1988, 1988-1989, 1989-1990, 1990-1991 et 1991-1992.

La figure 26-3 (voir cahier couleur) met en évidence les écarts des valeurs de chaque saison par rapport à la moyenne des trois saisons : 1987-1988, 1988-1989, 1989-1990, considérée comme référence, ceci grâce à l'utilisation d'une palette de couleurs adaptée (même palette utilisée pour la figure 26-5). Les aires à anomalies positives, donc plus chaudes que la moyenne, et par conséquent moins arrosées, apparaissent dans des tons allant du vert au noir en passant par le bleu.

La figure 26-4 (voir cahier couleur) présente les valeurs des TMAX mensuelles des deux saisons 1990-1991 et 1991-1992 ainsi que les moyennes mensuelles interannuelles calculées d'après les données des trois saisons précédentes. Il est supposé au départ que ces trois saisons ont été plus humides que les saisons 1990-1991 et 1991-1992 dans le sud de Madagascar. En toute logique, on s'attend donc à des différences importantes entre les valeurs de températures mensuelles et les valeurs mensuelles interannuelles, les premières devant être plus élevées que les secondes en zones touchées par la sécheresse.

La figure 26-5 (voir cahier couleur) met précisément en évidence ces écarts à la moyenne des TMAX mensuels des saisons des pluies 1990-1991 et 1991-1992. Parallèlement

à la constitution des images, une procédure d'extraction des valeurs de températures aux stations a permis de dresser des tableaux de valeurs ponctuelles facilement comparables aux données pluviométriques, avec toutefois des réserves quant à l'utilisation des températures observées dans les stations littorales

### 3.3. Les données pluviométriques

À l'instar des informations ponctuelles aux stations, extraites des fichiers images, les données pluviométriques issues de la Direction de la météorologie et de l'hydrologie (DMH) d'Antananarivo à Madagascar ont été traitées sous forme de tableaux saisonniers et mensuels. De même, les écarts aux moyennes mensuelles interannuelles établies sur les trois saisons précédentes (1987-1988, 1988-1989 et 1989-1990), ont été calculés, ceci afin de permettre une confrontation directe avec les écarts de température. De ces nombreux tableaux, seuls trois sont publiés ici à titre d'illustration : pluviométrie saisonnière de 1990-1991 et de 1991-1992 (tab. 1), pluviométrie de novembre 1990 et de novembre 1991 (tab. 2), pluviométrie de janvier 1991 et de janvier 1992 (tab. 3).

## 4. Les saisons de pluie 1990-1991 et 1991-1992

### 4.1. Les moyennes saisonnières

La première remarque qui vient à l'esprit à la lecture des images de la figure 26-2 (voir cahier couleur) concerne la grande similitude entre les structures de répartition géographique des plages de température et la distribution des isohyètes interannuelles telles qu'elles apparaissent sur la carte publiée par CHAPERON *et al.* (1993). On reconnaît en effet sur toutes les images une bande orientale littorale caractérisée par des températures très fraîches, inférieures à 20 °C, limitée à l'ouest par un gradient très marqué, et qui se caractérise par une pluviométrie annuelle très élevée (> 2 000 mm). Il faut signaler également que cette limite ouest présente de nombreuses incursions qui se retrouvent sur les deux documents et qui correspondent à des massifs montagneux. Une des plus remarquables est certainement l'avancée des températures fraîches selon un axe NE-SO, au sud de la zone en direction de Bekily et qui marque la signature du massif de l'Ivakoany. De même au nord, le massif de Tsaratanana s'individualise très nettement. D'autre part, c'est affirmer une évidence que de dire que le Sud est bien plus chaud que le Nord ou que la bande orientale. De même, sur les deux documents, on remarque l'absence de gradient accusé sur tout le sud-ouest du pays. Cependant, sur chacune des images, une aire plus chaude se détache, délimitée par Betsioky et Isoanala au nord, par Ampanihy et Bekily au sud, ce qui laisse deviner qu'il s'agit d'une zone plus sensible que d'autres aux aléas climatiques.

Les images (fig. 26-2, voir cahier couleur) montrent que, dans le sud de Madagascar, les moyennes des températures de la saison 1991-1992 sont plus élevées que celles de la saison 1990-1991, elles-mêmes supérieures à la moyenne générale. En 1991-1992, l'aire précitée est celle qui présente l'écart de température le plus important (5-6 °C; fig. 26-3, voir cahier couleur). Cette région qui, selon toute logique, devrait avoir été très affectée par la sécheresse s'insère dans une bande d'écarts légèrement plus faibles (3-4 °C), limitée au sud et à l'ouest par la côte, au nord par la diagonale Morondava-Ihoay-Toalagnaro. Cette

**Tableau 1.** Madagascar : pluviométrie saisonnière de 1990-1991 et de 1991-1992, écarts à la moyenne de 1987-1990

Station	Saison 1990-1991 (mm)	Saison 1991-1992 (mm)	Moyenne 1987-1990 (mm)	Écart 1990-1991 (mm)	Écart 1991-1992 (mm)	Écart 1990-1991 (%)	Écart 1991-1992 (%)
Antsirana	1149,20	1340,10	1168,30	-19,10	171,80	-2	15
Antalaha	1884,40	2157,60	1706,90	177,50	450,70	10	26
Mahajang	1522,00	1661,00	1337,40	184,60	323,60	14	24
Besalamp	1244,10	1065,00	1183,20	60,90	-118,20	5	-10
Toamasin	2608,90	2615,60	2214,57	394,33	401,03	18	18
Antananar	801,70	1197,30	919,27	-117,57	278,03	-13	30
Moronda	900,10	inc*	741,40	158,70		21	
Mananjar	1751,70	2119,80	2106,27	-354,57	13,53	-17	1
Fianarant	909,40	904,70	1034,60	-125,20	-129,90	-12	-13
Morombe	353,20	67,70	292,83	60,37	-225,13	21	-77
Ranohira	625,00	inc	909,90	-284,90		-31	
Farafanga	inc	inc	1852,47				
Toliary	223,50	41,80					
Betioky-s	317,10	207,80	485,17	-168,07	-277,37	-35	-57
Isoanala	809,00	inc					
Bekily	541,90	276,70	676,20	-134,30	-399,50	-20	-59
Ejeda	416,20	inc	533,27	-117,07	-533,27	-22	
Ampanihy	inc	inc	413,77				
Behara	151,50	211,70					
Toalagnar	609,50	715,30	1119,60	-510,10	-404,30	-46	-36
Beloha	343,70	inc	476,80	-133,10		-28	

\* inc : donnée incorrecte

Source : Direction de la météorologie et de l'hydrologie (DMH), Madagascar

dernière ville présente d'ailleurs l'écart positif le plus faible (1 °C à 2 °C), au sein d'une aire qui s'étend vers le nord sur la partie centrale du pays, sans toutefois atteindre la capitale. Les écarts de température négatifs (-1 °C et -2 °C), c'est-à-dire synonymes d'une pluviométrie légèrement supérieure à la normale se situent au nord d'une ligne passant par Besalampy, Antananarivo et Farafangana.

La saison 1990-1991 ne présente qu'une toute petite région à anomalie négative par rapport à la moyenne des trois saisons, entre Mahajanga et Antananarivo (fig. 26-3, voir cahier couleur). Cette anomalie est essentiellement à mettre au compte des températures de surface anormalement fraîches du mois de février 1991. Des écarts positifs moins accusés que ceux de la saison 1991-1992 (3 °C et 4 °C) sont notés sur une région délimitée par Behara, Bekily, Ranohira et Ihosy. Dans le reste du pays, l'image des écarts à la moyenne saisonnière indique des différences faiblement positives au sud d'une ligne passant par Besalampy, Antananarivo et Fianarantsoa, et une situation normale à faiblement positive au nord.

**Tableau 2.** Madagascar : pluviométrie de novembre 1990 et de novembre 1991, écarts à la moyenne de 1987-1989, et écarts à la moyenne de 1987-1989 des TMAX en °C

Station	Moyenne 1987-1989 (mm)	Novembre 1990 (mm)	Écart 1990 (mm)	Écart (TMAX) 1990 (°C)	Novembre 1991 (mm)	Écart 1991 (mm)	Écart (TMAX) 1991 (°C)
Antsirana	37,1	23,5	-13,6	-1,5	26,1	-11,0	-2,0
Antalaha	155,8	80,1	-75,7	-1,0	31,6	-124,2	0,5
Mahajang	26,6	23,3	-3,3	-2,0	18,4	-8,2	-2,0
Besalamp	48,1	36,0	-12,1	0,5	5,5	-42,6	2,5
Toamasin	195,0	82,5	-112,5	3,0	121,4	-73,6	1,0
Antananar	97,7	86,1	-11,6	-2,0	160,0	62,3	-0,5
Moronda	18,7	4,9	-13,8	-2,0	inc*	-18,7	0,0
Mananjar	172,5	53,4	-119,1	0,5	190,5	18,0	0,5
Fianarant	92,5	84,5	-8,0	2,5	111,1	18,6	3,5
Morombe	24,2	0,2	-24,0	-2,0	6,0	-18,2	2,0
Ranohira	91,7	151,4	59,7	3,5	45,9	-45,8	7,0
Farafanga	180,0	inc	-180,0	0,5	165,3	-14,7	2,0
Toliary	6,4	9,3	2,9	-2,5	0,0	-6,4	-1,5
Betioky-s	45,5	8,1	-37,4	6,0	21,3	-24,2	5,5
Isoanala	96,8155,	7,5130,4	21,3	5,0	120,2	11,1	5,5
Bekily	96,8	55,6	-41,2	4,0	32,5	-64,3	7,5
Ejeda	63,5	inc	-63,5	5,5	inc	-63,5	6,5
Ampanihy	40,2	0,0	-40,2	6,0	**	-40,2	7,0
Behara		20,5	20,5	5,0	24,5	24,5	8,5
Toalagnar	191,7	62,3	-129,4	4,0	12,8	-178,9	2,0
Beloha	39,4	21,8	-17,6	5,5		-39,4	8,0

\* inc : donnée incorrecte

Source : Direction de la météorologie et de l'hydrologie (DMH), Madagascar

#### 4.2. Comparaison des images mensuelles et moyennes mensuelles

Dans cette section, nous nous référons, d'une part, à la figure 26-4 (voir cahier couleur) qui montre la distribution des valeurs de températures de surface des deux saisons étudiées et des moyennes mensuelles interannuelles correspondantes et, d'autre part, à la figure 26-5 (voir cahier couleur), celle des écarts à la moyenne de ces mêmes TMAX mensuelles, et enfin à la vérité pluviométrique de terrain associée aux écarts de température par rapport aux moyennes mensuelles interannuelles (tab. 2, 3; à titre d'exemple).

À ce propos, il faut souligner que le fichier de stations obtenu comporte une majorité de villes portuaires. Compte tenu de l'imprécision de la localisation des stations inhérente à la «navigation Météosat» et au mode de calcul de la valeur de température obtenue par moyenne sur des valeurs de neuf pixels, il est bien évident que le résultat obtenu intègre

**Tableau 3.** Madagascar : pluviométrie de janvier 1991 et de janvier 1992, écarts à la moyenne de 1988-1990, et écarts à la moyenne de 1988-1990 des TMAX en °C

Station	Moyenne 1988-1990 (mm)	Janvier 1991 (mm)	Écart 1991 (mm)	Écart (TMAX) 1991 (°C)	Janvier 1992 (mm)	Écart 1992 (mm)	Écart (TMAX) 1992 (°C)
Antsirana	496,5	202,1	-294,4	3,0	181,5	-315,0	-1,0
Antalaha	357,4	394,7	37,3	1,0	297,8	-59,8	-0,5
Mahajang	517,2	122,0	-395,2	4,5	768,5	251,3	-1,5
Besalamp	371,5	211,9	-159,6	3,0	310,5	-61,0	-1,5
Toamasin	408,6	221,1	-187,5	2,0	272,2	-136,4	-2,0
Antananar	215,6	115,1	-100,5	4,5	410,7	195,1	-5,0
Moronda	311,1	127,4	-183,7	2,5	331,8	20,7	-0,5
Mananjar	366,1	241,7	-124,4	2,5	413,1	47,0	-1,5
Fianarant	346,3	89,5	-256,8	6,5	312,1	-34,2	-1,5
Morombe	107,6	77,0	-30,6	3,0	51,0	-56,6	1,0
Ranohira	195,8	73,8	-122,0	8,0	232,5	36,7	1,5
Farafanga	444,2	133,3	-310,9	4,0	438,9	-5,3	-1,0
Toliary	62,3	31,2	-31,1	3,0	11,0	-50,5	0,0
Betioky-s	113,9	118,5	4,6	4,0	45,2	-68,7	2,0
Isoanala	199,6	120,2	-79,4	7,0	220,2	20,6	2,0
Bekily	138,7	69,1	-69,6	6,0	92,5	-46,2	3,0
Ejeda	130,7	83,2	-47,5	5,0	inc*	-130,7	2,5
Ampanihy	188,3			5,0		-188,3	1,5
Behara		0,0	0,0	10,0	112,2	112,2	1,0
Toalagnar	223,8	106,5	-117,3	3,0	372,3	148,5	0,0
Beloha	186,2	22,8	-163,4	5,0		-186,2	2,5

\* inc : donnée incorrecte

Source : Direction de la météorologie et de l'hydrologie (DMH), Madagascar

non seulement la mesure du signal infrarouge sur des surfaces terrestres, mais aussi très vraisemblablement celle de surfaces océaniques. Les valeurs de températures aux stations maritimes n'ont donc pas la même signification que celles des stations de l'intérieur. Cette remarque fondamentale devait être faite avant d'aborder le commentaire proprement dit du déroulement des deux saisons des pluies 1990-1991 et 1991-1992.

La figure 26-4 (voir cahier couleur) est intéressante en ce sens qu'elle permet aisément de suivre l'évolution des températures maximales de surface de mois en mois et de les comparer aux moyennes interannuelles correspondantes. Elle permet donc de retracer sans difficulté les différentes péripéties des deux saisons des pluies.

La figure 26-5 (voir cahier couleur) complète la lecture de la figure 26-4 dans la mesure où les écarts de température sont quantifiés, ce qui autorise une régionalisation, voire une cartographie aisée de l'extension des phénomènes de sécheresse ou, au contraire, de pluviosité surabondante. Pour la commodité de l'exposé, nous utiliserons volontiers les

termes d'anomalie négative ou positive, avec cependant les «réserves d'usage» puisqu'une série de données moyennes sur seulement trois ans est loin d'être assez longue pour nous en conférer le droit. Le terme d'anomalie est donc à considérer comme synonyme d'écart et de différence à la moyenne.

À quelques variantes près, les scénarios des saisons des pluies 1990-1991 débutent de la même manière en octobre et en novembre. Les pôles de températures les plus élevées apparaissent au sud; les aires d'anomalies les plus fortes (7 °C et 8 °C) se trouvent décalées vers la côte sud, que ce soit en novembre 1990 ou 1991; le mois d'octobre 1990 est plus chaud que la moyenne sur la quasi-totalité du territoire; des anomalies négatives d'intensité et d'étendue variables apparaissent sur la partie nord. La vérité-terrain confirme bien que l'anomalie positive de températures est liée à un très fort déficit en pluies. Il serait fastidieux de reprendre toutes les informations contenues sur le tableau 3 qui viennent à l'appui d'une étroite corrélation entre les deux paramètres. Nous n'en extrairons donc que quelques exemples parmi les plus significatifs. En octobre 1991, par exemple, toutes les stations situées au sud de Mananjary sont très déficitaires par rapport à la moyenne sur trois ans; par exemple, huit stations sur dix situées au sud de Fianarantsoa n'ont bénéficié d'aucune pluie. Inversement, les températures nettement plus basses que la moyenne observées en octobre 1991 au nord de l'île sont à mettre au compte d'une pluviométrie anormalement élevée pour l'époque de l'année (177,88 mm contre une moyenne de 11 mm pour la période 1987-1989 à Antsiranana par exemple).

Les images des mois de décembre (fig. 26-5 [partie 2], voir cahier couleur) montrent à nouveau une très nette prédominance des tons jaunes et bruns, c'est-à-dire des valeurs de températures plus élevées que la moyenne. Cependant, la situation s'est quelque peu améliorée au sud de l'île, qui se caractérise par une mosaïque d'aires faiblement positives ou faiblement négatives en températures. Les anomalies les plus fortes apparaissent dans la région de Besalampy dont la pluviométrie est très révélatrice : 10,6 mm au cours de ce mois contre une moyenne de 206,2 mm. En décembre 1992, la zone la plus critique (excédent atteignant 8 °C en de nombreuses aires) s'étend le long du littoral depuis Morombe jusqu'à Toalagnaro. Seule la partie nord enregistre des températures plus faibles que la moyenne et synonymes d'excédents pluviométriques (Antsiranana et Antalaha).

Les mois de janvier 1991 et 1992 montrent une situation très contrastée. D'un côté, le mois de janvier 1991 présente les anomalies positives de températures les plus élevées et les plus généralisées de toute la séquence étudiée. D'autre part, des écarts de 10 °C, ce qui est considérable, apparaissent dans le sud de l'île; aucune tache verte déficitaire ne vient contrarier la suprématie des tons jaunes et rouges sur l'ensemble du territoire, c'est dire que toutes les stations dont nous possédons les données, à l'exception d'Antalaha (37 mm d'excédent), ont enregistré des pluies très déficitaires par rapport à la moyenne de janvier 1988-1989 et 1990. À l'inverse, le mois de janvier 1992 présente une large bande centrale de températures inférieures à la normale, ce qui en fait le mois le plus «vert» de la saison 1991-1992. Néanmoins, toute la zone sud, à l'exception d'une mince frange littorale sur la côte est, demeure en anomalie positive pour le quatrième mois consécutif.

En février 1991, la côte est est de nouveau concernée par un déficit pluviométrique. C'est plus particulièrement le cas de Behara, qui enregistre un écart de température positif de 6 °C. C'est aussi le cas de Toalagnaro, station maritime dont l'écart de température extrait des valeurs aux stations (+2 °C), traduit mal l'ampleur du déficit en pluies de 120 mm, alors que la moyenne sur trois ans est de 136 mm, tandis que son proche arrière pays affiche des écarts atteignant les 8 °C. La plus grande partie du pays présente une mosaïque d'aires normales faiblement négatives ou faiblement positives en température. Seule, la région de Mahajanga fait exception. Des températures basses y sont enregistrées

(<18 °C). Ceci résulte soit de la présence continue d'une couverture nuageuse dans les basses couches aux heures les plus chaudes de la journée soit à l'existence d'une séquence pluvieuse exceptionnelle. Les relevés pluviométriques tendent à confirmer la seconde hypothèse puisque 833 mm de pluie ont été mesurés à Mahajanga au cours de ce mois, contre une moyenne 1988-1990 de 300 mm.

En février 1992, l'extrême sud de l'île présente à nouveau les écarts positifs de température les plus élevés.

Les mois de mars et d'avril 1991, contrairement aux premiers mois de la saison, connaissent un développement très important des aires de températures inférieures à la moyenne 1988-1990 de ces mêmes périodes et qui correspondent à une pluviométrie retrouvée. Ce sont ces deux mois qui permettent à cette saison de se différencier de la saison des pluies 1991-1992.

En effet, les mois de mars et d'avril 1992 donnent à nouveau une large prédominance aux aires à écarts de température positifs plus particulièrement accusés sur le sud du pays. Le déficit pluviométrique est une fois de plus largement confirmé à la lecture des relevés de pluie mensuels.

En conclusion de cette section, il faut bien admettre que les images infrarouges Météosat sont à même d'apporter une contribution positive au suivi des sévères anomalies pluviométriques de Madagascar, et cela malgré la diversité des contextes géographiques et climatiques. On rappellera simplement ici que ces images montrent que les sept mois de la saison 1991-1992 apparaissent en anomalie positive de température de surface, dans le sud de l'île, et que ce constat satellitaire est largement en harmonie avec l'analyse des relevés pluviométriques de terrain.

Il importe maintenant dans la dernière partie de cette étude de rechercher les causes de cette sécheresse exceptionnelle en durée et en intensité en nous fondant sur l'analyse des données météorologiques conventionnelles.

## **5. Les causes de la sécheresse**

### **5.1. Les données de référence**

Les références portent sur les cartes synoptiques quotidiennes de 12 h 00 TU établies aux heures chaudes de la journée, car les pluies tombent à Madagascar ordinairement en fin d'après-midi. Quatre niveaux d'altitude ont été considérés : la surface, 850, 700 et 500 hPa. Les radiosondages quotidiens d'Antananarivo à 12 h 00 TU ont été consultés, car Antananarivo est la station la mieux pourvue en matière de radiosondage. D'autre part, du fait de sa localisation, au centre de Madagascar, elle peut être soumise à tous les centres d'action pouvant influencer le temps. Les cyclones tropicaux du sud-ouest de l'océan Indien ont été suivis à partir des publications de la DMH d'Antananarivo.

### **5.2. La méthodologie de recherche**

La méthode utilisée repose sur l'étude statistique des données météorologiques, analysées et comparées aux données identifiées comme étant celles de la normale. La station de Toalagnaro a servi de référence (RATSIVALAKA-RANDRIAMANGA, 1986).

### **5.3. Les résultats des travaux**

#### **5.3.1. L'apport des cartes synoptiques**

À l'exception des mois de janvier 1992 et février 1991, pour lesquels le temps dépressionnaire domine, la situation isobarique de surface de type mixte est prépondérante en 1990-1991 et 1991-1992. Dans ce cas la zone dépressionnaire due aux basses pressions thermiques équatoriales ou aux cyclones tropicaux se localise dans le nord ou l'ouest de l'île. La zone anticyclonique due à l'anticyclone mobile (AMob) et à l'anticyclone de l'océan Indien (AOI) se localise essentiellement dans le sud et la côte centre et sud-est. Cette situation mixte se prolonge en altitude jusqu'à 850 hPa. La moitié nord de Madagascar est alors sous l'influence d'un centre dépressionnaire, la moitié sud sous celle d'un centre de haute pression dû à l'AMob ou au renforcement de l'AOI par l'AMob. À partir de 700 hPa la ceinture anticyclonique des hautes pressions subtropicales coiffe la plupart du temps Madagascar. À 500 hPa, la part des talwegs polaires, qui apparaissent épisodiquement dès 700 hPa, est aussi importante que celle des hautes pressions. En avril 1992 par exemple, Madagascar a été coiffé par la ceinture anticyclonique dans 47,3 % du temps; les talwegs polaires dans 47,3 % des cas, et dépressionnaires pour 5,2 %. On constate qu'une situation anticyclonique à tous les niveaux d'altitude caractérise le sud de Madagascar lors des saisons pluviométriques 1990-1991 et 1991-1992. Une telle situation n'est guère favorable à la pluie.

Bien que de faible épaisseur (850 hPa), l'AMob a été très actif pendant ces deux saisons pluviométriques. Centré en moyenne entre 33° à 41° S et 40° à 61° E, il projette une dorsale sur la côte SE après avoir glissé sur le sud de Madagascar. Cet anticyclone froid a souvent renforcé l'AOI et favorisé la persistance d'un temps sec dans le sud. Par contre, l'AOI a moins influencé le temps de 1990-1991 et 1991-1992, car il a été repoussé plus à l'est de Madagascar dans l'océan Indien. Cette situation est normale pour la saison des pluies. Mais, dès 850 hPa, l'AOI se retrouve au-dessus de Madagascar. Les perturbations frontales méridionales (PFM) déterminent une circulation d'ouest dans le sud de Madagascar, aussi bien en été qu'en hiver. Elles sont en général moins fréquentes au cours de la saison chaude et pluvieuse. En 1990-1991 et 1991-1992, leur fréquence a été plus élevée sauf en avril. Le passage de ces PFM est accompagné de pluies fines. Celles-ci ne suffisent pas à combler un déficit pluviométrique accentué dans le sud.

La Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT) a fluctué aux latitudes malgaches. Cependant, elle est restée dans une position très septentrionale ou n'a fait que frôler la côte NNO. En janvier 1992, elle a atteint par exemple 18° S dans une proportion de 7,4 % du temps pendant lequel elle a fluctué au-dessus de Madagascar. De même, 50 % du temps de février 1992 a été influencé par la ZCIT. Cette situation est presque normale, mais ce mois là, la ZCIT est restée à 46,30 % de ses fluctuations aux environs d'Antsiranana vers 12° S. Ceci est anormal pour la saison car, en janvier et en février, la position habituelle de la ZCIT se situe entre 15° S et 20° S (RATSIVALAKA-RANDRIAMANGA, 1982). Cette situation anormale a réduit considérablement l'apport pluviométrique habituel lié aux orages de fin d'après-midi de la saison chaude à Madagascar.

De plus, l'activité cyclonique qui eut lieu essentiellement dans le canal de Mozambique et dans l'océan Indien a été inférieure à la normale. Seuls 2 cyclones sur 9 habituels ont sillonné les latitudes malgaches tant en 1990-1991 qu'en 1991-1992.

### **5.3.2. L'apport des radiosondages**

L'observation des radiosondages d'Antananarivo à 12 h 00 TU indique la présence, en altitude, de deux masses d'air influençant le temps : l'air tropical maritime (Tm) est charrié par l'AOI ou par l'AMob. C'est l'alizé qui a marqué le temps de 1991-1992 bien plus que de coutume sauf en décembre, janvier et février. Cet alizé a subi un fort réchauffement à la base, fait tout à fait normal dans le cas actuel compte tenu de l'heure des observations. Il est constitué d'un air relativement instable et humide en surface, surmonté par un air stable et sec en altitude, tous deux séparés par une couche d'inversion localisée aux environs de 720 hPa en octobre, et novembre 1991, ainsi que 850 hPa en décembre 1991, et en janvier et avril 1992. Cette altitude peu élevée de la couche d'inversion a pour effet de réduire l'instabilité au sol, fait qui aurait favorisé la pluviogénèse. D'autre part, cet alizé a été sec, ce qui réduit encore plus les chances d'avoir des pluies.

L'air équatorial est épais et humide à tous les niveaux. Il est instable et n'a influencé qu'en partie le temps de décembre, janvier et février mois pendant lesquels il aurait dû être prépondérant. Cet air des basses pressions équatoriales ou des cyclones tropicaux est à l'origine des gros orages de mousson ou des trombes d'eau des cyclones. Mais ces derniers, moins nombreux ont très peu marqué le temps. De plus, ils ont épargné le sud. Il est donc permis de croire que le déficit pluviométrique enregistré est dû à la persistance anormale d'une situation de type hivernal qui se traduit par la prédominance d'un temps d'alizé actif, épais et stable sur Madagascar et plus particulièrement sur le sud pendant la saison chaude et pluvieuse. Ceci a pour conséquence de repousser la zone d'influence des centres d'action favorables à la pluviogénèse dans des latitudes plus septentrionales, d'où sécheresse. Des nuances régionales accentuent cette sécheresse faisant de la moitié nord de l'île une zone plus arrosée que la moitié sud. C'est dire que deux météorologies différentes déterminent le temps à Madagascar. Au nord, une météorologie tropicale génératrice de gros orages tropicaux, influence le temps par le biais de la convergence intertropicale et des cyclones. Au sud, il s'agit d'une météorologie des pays tempérés génératrice de pluies fines de type frontal sous l'influence des perturbations frontales méridionales (PFM) et des anticyclones mobiles (AMob).

## **6. Conclusion**

La sécheresse du sud de Madagascar en 1990-1991 et 1991-1992 s'inscrit dans un déficit quasi généralisé à l'ensemble du pays. Ses causes sont multiples : faible influence de la ZCIT, faiblesse des cyclones tropicaux et persistance d'un temps d'alizé.

Les images infrarouges Météosat sont en mesure de rendre compte des anomalies pluviométriques de Madagascar. Elles permettent de mettre en évidence les variations régionales d'intensité de la sécheresse ainsi que les différences entre la saison 1990-1991 et 1991-1992. Ces résultats quelque peu inespérés au début de l'étude, compte tenu de la complexité du contexte géographique et climatique de Madagascar, rendent envisageable la mise sur pied d'un suivi opérationnel. Celui-ci permettrait aux institutions intéressées de se préparer à d'éventuelles calamités, donc de prévoir des mesures d'aide appropriées.

En matière de télédétection, il conviendrait de poursuivre l'étude, en appliquant l'ensemble des techniques mises en oeuvre par l'antenne ORSTOM, pour le suivi de l'hivernage en Afrique de l'Ouest, à Madagascar. Il serait ainsi intéressant d'analyser les fichiers d'occurrences de nuages à sommet froid, qui ont manqué dans ces travaux, en

parallèle avec ceux de la température de surface du sol. Ce qui permettrait de mieux juger de la pertinence de la méthode appliquée au Sahel. Alors, un programme de suivi de la sécheresse, approprié à Madagascar pourrait être envisagé, à partir des données Météosat, aux fins de développement agricole, non seulement du Sud, mais de l'ensemble du pays.

## **7. Références**

- CHAPERON, P., DANLOUX, J. et FERRY, L. 1993. Fleuves et rivières de Madagascar/Ony sy renirano eto Madagasikara. Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération, ministère de la Recherche scientifique, ministère des Transports et de la Météorologie, monographie hydrologique 10, Éditions de l'ORSTOM, Paris, 874 p.
- GUILLOT, B. 1985. Veille Climatique Satellitaire. Revue trimestrielle, ministère de la Coopération, ORSTOM/Lannion, Météo France.
- LAHUEC, J.-P., CARN, M., LE MOIGNE, O. et DAGORNE, D. 1992. La saison des pluies 1991 en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne/Suivi à partir d'un catalogue d'image Météosat. Éditions Norois, Poitiers, t. 39, n° 155, p. 255-267.
- RATSIVALAKA-RANDRIAMANGA, S. 1986. Le climat de Fort-Dauphin et son impact sur l'homme et la végétation. Thèse de doctorat de 3<sup>e</sup> cycle de géographie, Université de Madagascar, 221 p., atlas, carte.
- RATSIVALAKA-RANDRIAMANGA, S. 1985. Recherches sur le climat de Toalagnaro. Madagascar/Revue de géographie, n° 1985-46, p. 47-67.
- RATSIVALAKA-RANDRIAMANGA, S. 1982. Exemples de périodes sèches estivales dans la décennie 1970 à Madagascar. Madagascar/Revue de Géographie, n° 1982-40, p. 95-97.









ACHEVÉ D'IMPRIMER EN FÉVRIER 1996  
SUR LES PRESSES DE  
L'IMPRIMERIE D'ÉDITION MARQUIS  
MONTMAGNY (QUÉBEC)



La collection *Universités francophones*, créée en 1988 à l'initiative de l'UREF, propose des ouvrages de référence, des manuels spécialisés et des actes de colloques scientifiques aux étudiants des 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> cycles universitaires ainsi qu'aux chercheurs francophones et se compose de titres originaux paraissant régulièrement.

Les auteurs appartiennent conjointement aux pays du Sud et du Nord et rendent compte des résultats des recherches et des études récentes entreprises en français à travers le monde. Ils permettent à cette collection pluridisciplinaire de couvrir progressivement l'ensemble des enseignements universitaires en français.

Enfin, la vente des ouvrages à un prix préférentiel destinés aux pays du Sud tient compte des exigences économiques nationales et assure une diffusion adaptée aux pays francophones.

Ainsi la collection *Universités francophones* constitue une bibliothèque de référence comprenant des ouvrages universitaires répondant aux besoins des étudiants de langue française.

**Un des problèmes des plus cruciaux des pays développés autant que des pays en développement est la gestion de leurs ressources en eau. Dans ce cadre, les données de télédétection représentent une source d'information importante. Les *Cinquièmes journées scientifiques du « Réseau Télédétection »* de l'AUPELF-UREF ont permis de faire le point sur la télédétection des ressources en eau. Bassins versants et érosion hydrique, eaux de surface et eaux souterraines, humidité des sols, littoral, sécheresse et désertification ... soit cinq rubriques et vingt-six textes produits par d'éminents auteurs de disciplines et d'origines géographiques très différentes. Une somme indispensable pour les étudiants comme pour les chercheurs.**

Prix Canada : 45 \$ CAN • Prix France : 210 FF • Prix préférentiel UREF : 60 FF



9 782760 508286

ISBN 2-7605-0828-5

59-4713-0