

PARTIE V

Actions de recherche partagée

33

Détermination d'indices pluvieux de perturbations d'hiver sur le Sénégal, entre 1989 et 1991, par une combinaison de données radiométriques et de mesures pluviométriques

AMADOU THIerno GAYE et SIMÉON FONGANG

*Laboratoire de physique de l'atmosphère et d'océanographie côtière (LPA),
École nationale supérieure universitaire de technologie (ENSUT),
Université Cheikh Anta Diop, B.P. 5085, Dakar-Fann, Sénégal;
téléphone : +221 25-93-64; télécopieur : +221 25-93-64; CÉ : gaye@lpa.ensut.sn*

Résumé

Ce travail a pour but de déterminer des indices de précipitations d'hiver sur le Sénégal. On a utilisé des images Météosat ISCCP B2 (*International Satellite Cloud Climatology Project*) dans le canal infrarouge (IR). Les champs pluviométriques ont été réalisés à partir des données de pluies journalières sur 20 stations synoptiques et climatologiques du Sénégal pour les mois de novembre, décembre, janvier, février et mars entre 1989 et 1991. Les champs pluviométriques sont représentés sous forme d'images avec le logiciel *Triskel* à partir de cartes d'isohyètes. Les isolignes sont obtenues par « krigage ». On effectue un seuillage à seuil variable des images afin d'extraire de la structure générale chaque type de nuage particulier. Ces images seuillées sont ensuite corrélées aux champs pluviométriques. On met ainsi en évidence les structures du jet subtropical (JST) intense pour des températures inférieures à 263 K. C'est à ce seuil que les premières traces de pluies ont pu être observées. Mais les nuages les plus pluvio-gènes sont détectés autour de 233 K. On note ainsi un lien entre l'occurrence de pluies et la présence de nuages froids sur la bande du jet. Plus celle-ci est large, plus le champ pluviométrique est étendu. La pluie est d'autant plus intense que la bande est épaisse. Une statistique élémentaire sur les images montre qu'un écart constant de 17,5 °C entre la moyenne et le minimum de température radiative représente un indice de précipitation produit par les nuages froids accompagnant le JST.

1. Introduction

Le long épisode de sécheresse qui sévit en Afrique sahélienne a engendré ces derniers temps un intérêt particulier pour les phénomènes météorologiques intéressant cette sous-région. Dans cette partie du continent les précipitations interviennent en majorité pendant la période de juin à octobre. Elles correspondent à une importante pénétration du flux de vapeur d'eau humide, la mousson, sur le continent (LAMB, 1985). Par contre en hiver, quand la ZCIT (Zone de Convergence Intertropicale), zone de maximum de convection, est la plus au sud, des pluies de faible intensité sont générées par la rencontre de masses d'air atlantique chaud et humide transporté en altitude par le jet subtropical (JST) et de masses d'air froid d'origine polaire. Le contact des deux types de masses d'air entraîne aux altitudes moyennes et supérieures la formation d'importantes masses nuageuses sur le continent pouvant occasionner des perturbations pluvio-orageuses. L'objectif de ce travail est de définir les liens entre les paramètres les plus pertinents dans l'occurrence de ces précipitations d'hiver appelées pluies de « heug » au Sénégal. Pour cela, on détermine des indices de perturbations par une combinaison de données radiométriques et de mesures pluviométriques. Ceci nécessite une étude des corrélations entre l'intensité du JST estimée sur l'image satellitaire Météosat par la largeur de la bande et par le pourcentage de pixels froids et le champ pluviométrique. Nous présentons d'abord la zone d'étude, les données et la méthode utilisée. Ensuite, dans une seconde partie, nous discutons des résultats obtenus.

2. Méthodologie

Les phénomènes sur lesquels porte le travail sont d'échelles spatiales différentes. La zone d'étude devra donc être suffisamment large pour couvrir toutes les dimensions spatiales des phénomènes à étudier tout en conservant une bonne résolution. Nous considérons la zone d'étude comprise entre 10° et 30° de longitude ouest et entre 3° et 20° de latitude nord. Cette zone permet de cerner la partie du JST et de la ZCIT qui nous intéresse.

Pour établir les caractéristiques hydrologiques des nuages représentant le JST et étudier les variations temporelles des champs de luminance, nous utilisons les images du canal infrarouge (10,5-12,5 mm) de format ISCCP B2 (SCHIFFER and ROSSOW, 1983) du satellite Météosat. Les images B2 sont échantillonnées à 3 heures d'intervalle avec une résolution spatiale de 30 km au point subsatellitaire. Elles sont constituées de 416 lignes et de 416 pixels. Nous n'utilisons ici que les images B2 de 12 TU pour éviter les variations importantes d'ensoleillement. Calibrées et normalisées, ces images peu encombrantes permettent une exploitation climatologique (DESBOIS *et al.*, 1988). Les images B2 utilisées couvrent les mois de janvier, février, mars, novembre, décembre de la période 1989-1991. La dynamique est inversée c'est-à-dire que les comptes numériques les plus élevés correspondent aux éléments les plus froids. La loi de calibration est donnée par une relation linéaire entre réflectance satellitaire R et compte numérique C :

$$R = \text{FAG} \beta (C - C_0)$$

Le facteur $\text{FAG} \beta$ de calibration IR, est fourni dans les rapports de calibration donnés par l'European Space Operation Centre (ESOC) de l'Agence spatiale européenne (ESA) et C_0 est le compte numérique de visée de l'espace.

La réflectance estimée est convertie en température radiative à l'aide de tables de la fonction de Planck et de la réponse spectrale du radiomètre fournie dans le rapport de calibration. D'autre part, à partir de données pluviométriques journalières des stations synoptiques du Sénégal, on a construit les champs pluviométriques. Le mode d'interpolation utilisé dans la réalisation des champs est le « krigage » par autocorrélation. Il s'agit d'une méthode d'interpolation linéaire qui calcule l'autocorrélation entre points du champ et donne une estimation sans biais en minimisant la variance.

La bande de JST apparaît sur l'image satellitaire (fig. 1) comme un accolement et une combinaison de plusieurs types de nuages situés à des niveaux différents :

- nuages de glace (cirrus, cirro-stratus) qui sont des nuages élevés à sommet froid; on les repère au cœur du jet, c'est-à-dire dans les zones de vent maximum;
- nuages bas (strato-cumulus) qui se repèrent sur les bords du JST; le sommet de ces nuages bas est plus chaud que celui des cirrus et le flux de vapeur d'eau d'origine océanique favorise leur formation;

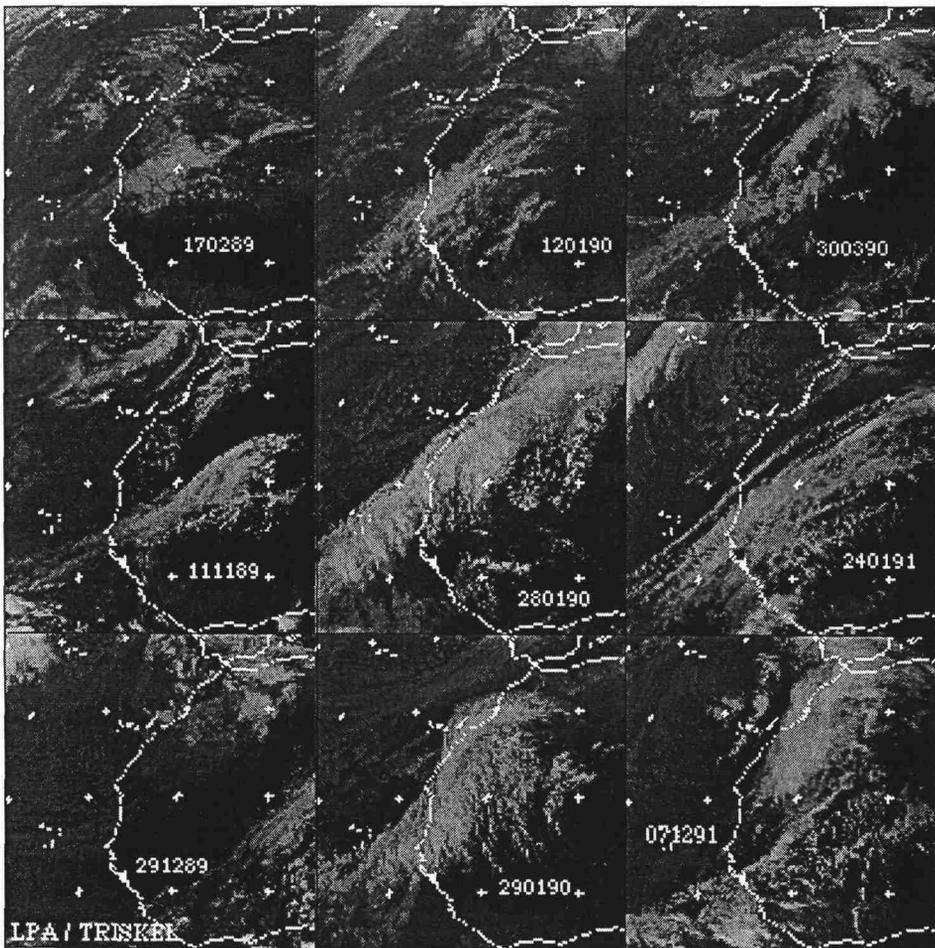


Figure 1. Série d'images IR Météosat ISCCP B2 sur la zone d'étude pendant des situations pluvieuses d'hiver boréal durant la période 1989-1991 (longitude -40° O, 5° E; latitude 0° N, 40° N)

- nuages cumuliformes (cumulus et cumulonimbus);
- nuages moyens (altocumulus et altostratus); l'abondance de la vapeur d'eau disponible favorise la transformation de l'altocumulus, à développement vertical, en cumulonimbus à base élevée siège de manifestations pluvio-orageuses (DE FELICE et VILTARD, 1976).

En Afrique sahélienne, le seuil de 233 K a été considéré par plusieurs chercheurs comme satisfaisant pour séparer les nuages pluvio-gènes des nuages non pluvio-gènes (ARKIN, 1979). Pour observer les nuages pluvio-gènes, nous avons donc choisi le seuil de 233 K souvent utilisé dans les algorithmes d'estimation de la pluie. Ce seuillage consiste à représenter par leur valeur réelle les pixels plus froids que le seuil de température choisi et les autres par zéro. Le seuil de 263 K a été choisi pour mettre en évidence la structure du JST intense. Nous combinons les données radiométriques ainsi traitées avec le champ pluviométrique pendant les jours de pluie. La faiblesse des quantités de pluie ne nous permet pas d'utiliser des algorithmes d'estimation de la pluie. Nous optons alors pour des techniques de détection de la pluie. La méthode utilisée doit permettre de distinguer selon la nature des nuages l'absence de pluie, les traces de pluie ou la pluie dans une zone.

3. Résultats et discussion

Le seuillage à $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a mis en évidence les situations de JST intense. En effet nous considérons que, pour la période considérée, toutes les images seuillées à $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ sur lesquelles la bande de jet apparaît nettement correspondent à une activité importante du JST. Ce courant aérien de haute altitude (200 à 100 hPa) se caractérise en hiver, quand il est intense, par une ligne de fortes vitesses de vent (60 à 75 m/s). Il subit des variations saisonnières d'intensité très marquées. En hiver lorsqu'il est proche de l'Équateur, il entraîne dans son mouvement SO-NE des amas nuageux de la ZCIT, ce qui permet son renforcement. La force du jet dépend aussi beaucoup des contrastes thermiques entre masses d'air polaire et tropical. Ces contrastes thermiques sont renforcés par les descentes d'air froid polaire vers les basses latitudes tropicales.

Nous avons ainsi pu répertorier, suivant cette méthode par seuillage, 110 jours de JST fort pour les mois de janvier, février, mars, novembre, décembre des années 1989, 1990, 1991. Ces jours ne correspondent pas toujours à des situations de pluie. Pendant la même période, il y a eu 25 jours de pluie reçue au sol. Ces jours correspondent tous à des situations de JST fort. On voit donc que seuls 23 % des cas de JST fort aboutissent à une pluie estimable. La présence d'un jet fort ne garantit donc pas à elle seule l'obtention d'une pluie mesurable au sol. En effet les pluies de « heug » dépendent d'une combinaison de facteurs dynamiques tels le cisaillement du vent et les anomalies de la température de surface de la mer (TSM) et de facteurs thermodynamiques telle la quantité de vapeur d'eau (GAYE, 1994). Ce résultat signifie seulement que les nuages responsables des précipitations ont des sommets plus froids que $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Un seuillage à $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ permet de localiser les pixels potentiellement pluvieux. La combinaison des images avec le champ pluviométrique moyen journalier montre une bonne corrélation entre le champ pluviométrique (fig. 2) et la présence de nuages froids sur la bande représentant le JST (fig. 3). Les zones de maximum de pluviométrie visibles sur le champ correspondent sur l'image à des régions couvertes par la bande nuageuse. La figure 3 montre que les nuages convectifs générateurs de la pluie ne sont pas des amas isolés mais des structures prises dans la bande du JST. Plus la bande du JST est large, plus le champ pluviométrique est intense. L'intensité de pluie est aussi liée à l'épaisseur de la bande. Cette épaisseur peut être estimée par une évaluation

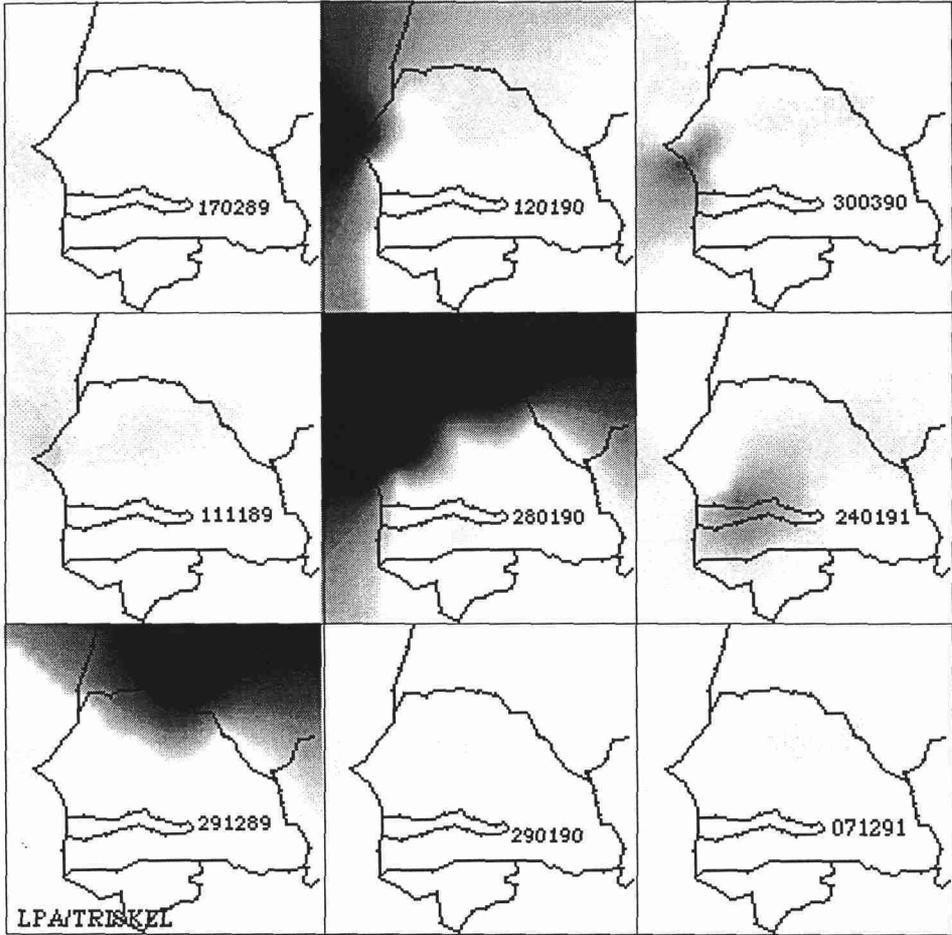


Figure 2. Représentation du champ pluviométrique lors de situations pluvieuses d'hiver boréal sur le Sénégal durant la période 1989-1991

de la densité de nuages froids.

Une statistique élémentaire des pixels d'images de perturbations nous donne les valeurs minimales T_{min} , maximales T_{max} et moyennes T_{moy} de la température radiative. La figure 4 représente ces paramètres en même temps que les variations de la température de brillance sur Dakar. On y remarque une variation quasiment en phase de T_{max} et de T_{moy} . L'écart absolu ETA entre T_{max} et T_{moy} est en moyenne constant. Nous l'utilisons alors comme critère pour distinguer les cas de pluie ou de non pluie. Un ETA petit correspond à une situation de non pluie. Cette situation découle aussi des valeurs assez élevées de T_{max} et T_{moy} . Cette faiblesse du gradient de température radiative est certainement le fait d'une faible convection, donc d'une faible valeur de température de surface et du gradient vertical de température. Les gradients verticaux et horizontaux de la vapeur d'eau atmosphérique

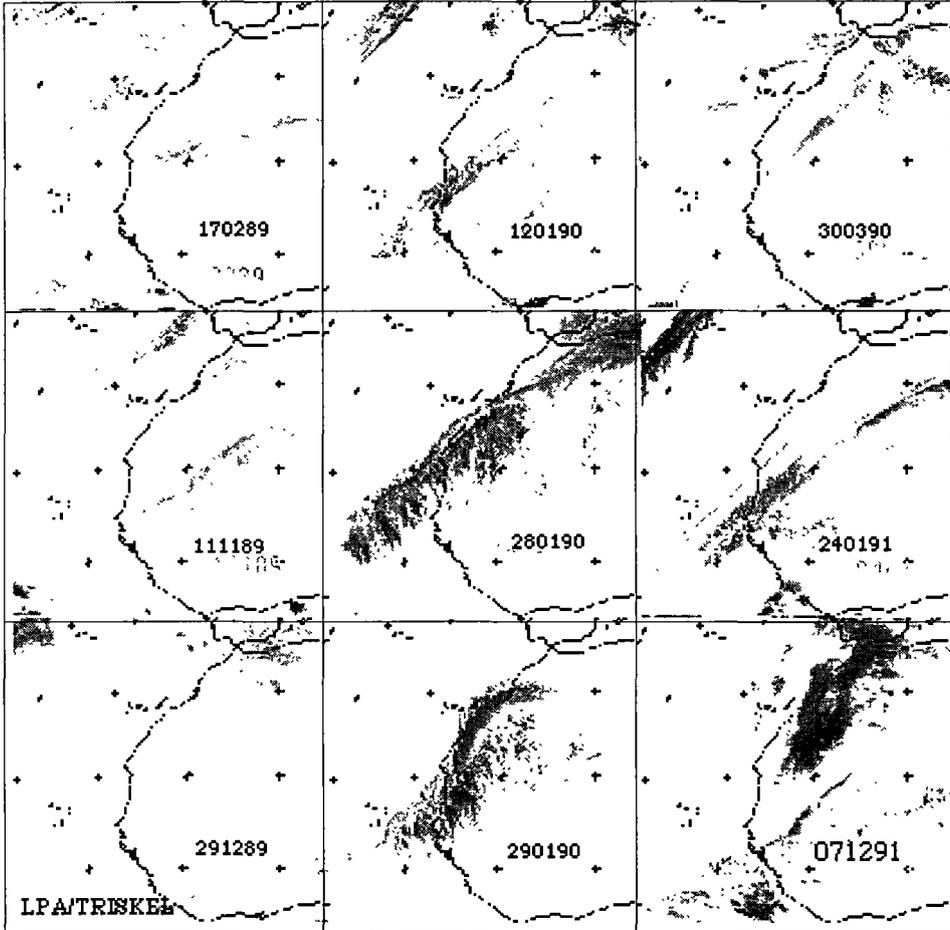


Figure 3. Série d'images IR Météosat ISCCP B2 de la zone d'étude seuillées à -40°C , pour des perturbations pluvieuses d'hiver boréal de la période 1989-1991

sont ainsi considérablement réduits. Le JST est alors affaibli. La relation étroite entre T_{max} et T_{moy} pendant les situations pluvieuses est bien représentée par le coefficient de corrélation ($R = 0,80$) illustré par la figure 5.

Les jours pluvieux sont caractérisés par un écart constant de 17°C environ entre T_{moy} et T_{max} . Cependant, nous ne pouvons distinguer les situations pluvieuses entre elles. Les écarts constatés suffisent à provoquer les quantités de pluie recueillies. Il existe une corrélation entre l'écart de température ETA et les quantités de pluie recueillies, du fait de l'accroissement de la quantité de vapeur d'eau transportée dans le flux du jet. La forte variabilité de la température sur Dakar, notée TDK sur la courbe (fig. 4), prouve l'impossibilité de tirer une information fiable à partir de valeurs ponctuelles de luminosité.

Les graphes de la figure 6 symbolisent la distribution des précipitations lors des événements pluvieux en fonction de T_{moy} (fig. 6a), de T_{min} (fig. 6b) et de T_{max} (fig. 6c).

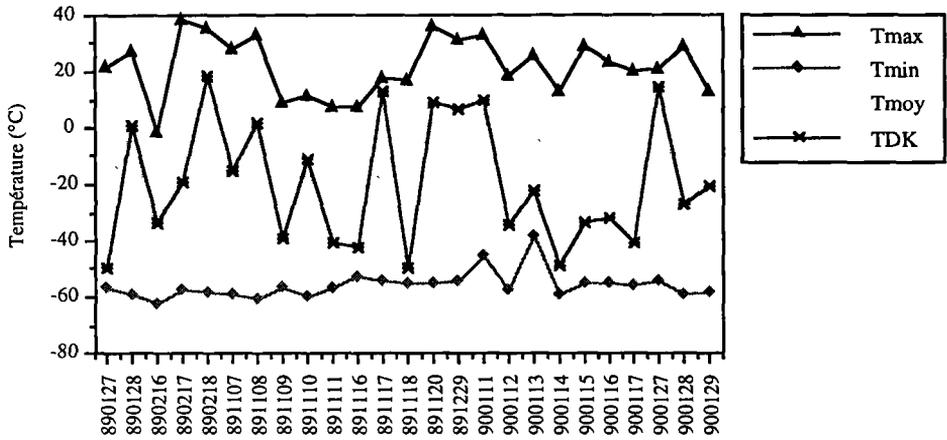


Figure 4. Variations de température radiative pour les situations de pluies d'hiver entre 1989 et 1991

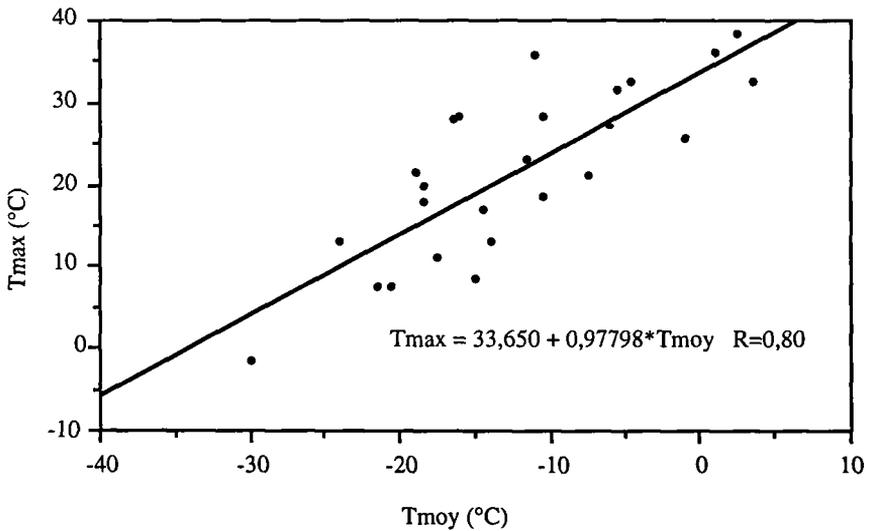


Figure 5. Corrélation entre la température moyenne sur la zone de l'étude et la température maximale

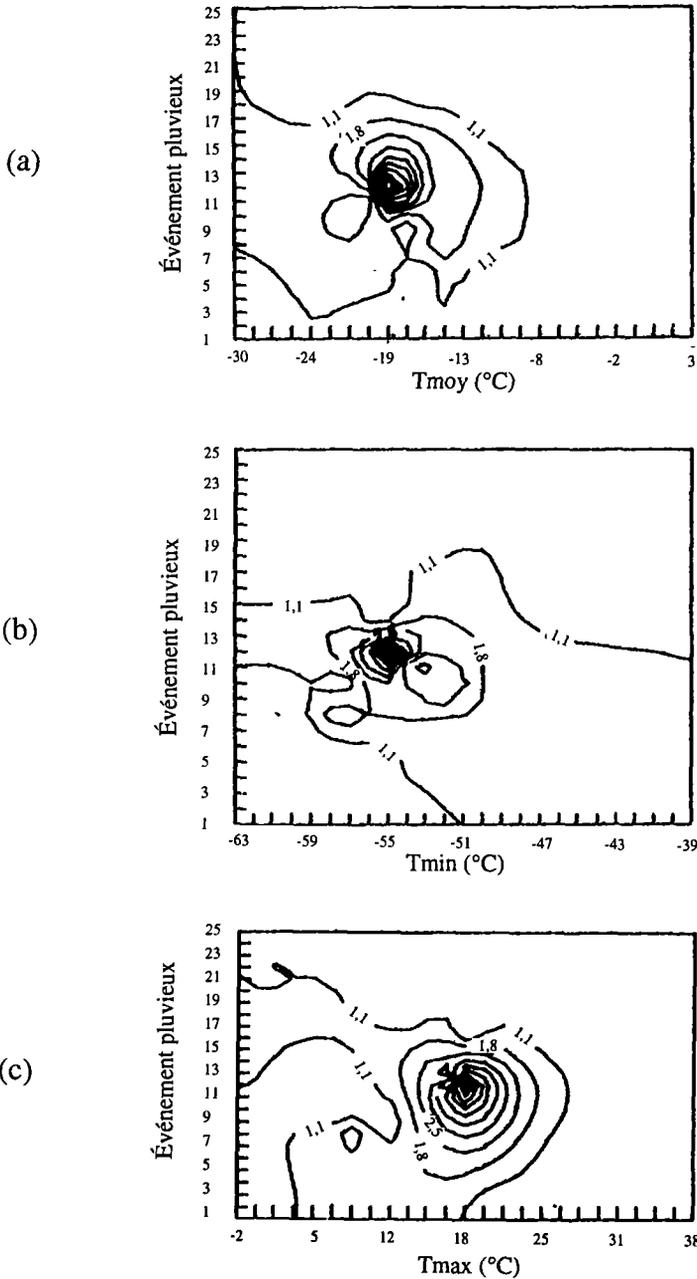


Figure 6. Répartition de la pluviométrie pour 25 événements de perturbations de la période 1989-91 en fonction de la température radiative : a) moyenne; b) minimum; c) maximum; les isolignes sont indiquées en mm par pas de 0,7 mm

T_{moy} correspond à de la pluie entre -22,5 °C et -12,5 °C, le maximum étant obtenu pour T_{moy} égale à -20 °C. T_{min} est un peu plus dispersée. Les premières traces de pluie apparaissent pour T_{min} = -40 °C. Jusqu'à T_{min} = -60 °C, on note encore de la pluie. Les valeurs de T_{moy} et T_{min} pour lesquelles une certaine quantité de pluie est recueillie, sont décalées entre elles. Ce décalage, ET_m, constitue un indice de précipitation produite par les nuages pluvigènes accompagnant le JST. Un petit ET_m traduit en effet une densité importante de pixels froids de nuages convectifs, donc une plus grande probabilité de pluie. La figure 6c fait ressortir clairement une concentration de la pluie autour de valeurs de T_{max} comprises entre 12,5 et 25 °C. T_{max} est donc une représentation de la température de surface. Le maximum de pluie est recueilli pour des valeurs de T_{max} autour de 17 °C.

4. Conclusion

Un seuillage à 263 K a été effectué pour mettre en évidence sur les images IR ISCCP B2 les structures du JST sur la zone d'étude. Le JST est intense pour des températures radiatives inférieures à ce seuil. Cette méthode de détection du JST a permis de montrer que les jours pluvieux sont des indicateurs des événements de JST fort. Mais la présence du jet ne garantit pas toujours l'occurrence de pluie au sol. Une bonne corrélation a été établie entre la présence de nuages plus froids que -40 °C et le champ pluviométrique. Nous avons également déterminé les intervalles de températures pour lesquels la pluie est obtenue. Les plus fortes pluies sont obtenues pour des températures de surface entre 12,5 °C et 25 °C. Elles proviennent de nuage de convection profonde ou de type cumuliforme. De faibles pluies résultant de nuages stratiformes sont enregistrées pour une température moyenne de -22,5 °C à -12,5 °C. Les écarts absolus entre T_{max} et T_{moy} de même que T_{min} et T_{moy} suffisent à envisager l'occurrence ou non de la pluie. Ils peuvent à cet effet servir d'indices de précipitation.

Ce travail devrait être systématisé jusqu'en 1995 pour confirmer les résultats obtenus. L'utilisation de données étalonnées du radar centimétrique de l'aéroport de Dakar permettrait d'améliorer la résolution spatiale des résultats sur le domaine couvert par le radar.

5. Remerciements

Ce travail a été effectué grâce au concours financier de l'AUPELF-UREF et de la Coopération française, que nous remercions ici. Nous remercions également l'Agence spatiale européenne pour les images B2, la Direction de la météorologie nationale du Sénégal et l'Agence pour la sécurité de la navigation aérienne en Afrique et Madagascar (ASECNA) pour les données pluviométriques, ainsi que l'ORSTOM pour sa collaboration en particulier avec le logiciel *Triskel* (DAGORNE, 1988).

6. Références

ARKIN, P. 1979. The relationship between fractional cloud coverage of high cloud rainfall accumulation during GATE over the B-scale array. *Monthly Weather Review*, n° 107, p. 1382-1387.

- DAGORNE, D., 1988. Traitement de données satellitaires à l'Antenne ORSTOM de Lannion. Le logiciel TRISKEL. Veille climatique satellitaire, n° 23, p. 17-22.
- DE FELICE, P. et VILTARD, A., 1976. Aérojet subtropical d'hiver et nuages associés. La Météorologie, VI^e série, n° 6, p. 223-225.
- DESBOIS, M., KAYIRANGA, T., GNAMIEN, B., GUESSOUS, S. and PICON, L., 1988. Characterization of some elements of the Sahelian Climate and their interannual variations of July 1983, 1984, 1985 from the analysis of Meteosat ISCCP Data. Journal of Climate, volume 1, n° 9, p. 867-904.
- GAYE, A. T., 1994. Dynamique et climatologie des perturbations d'hiver sur l'Afrique de l'Ouest entre 1931 et 1994. Thèse de docteur-ingénieur, École nationale supérieure universitaire de technologie, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 164 p.
- LAMB, P., 1985. Rainfall in subsaharan west Africa during 1941-83. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, n° 21, p. 131-139.
- SCHIFFER, R. A. and ROSSOW, W. B., 1983. The international satellite cloud climatology project (ISCCP) : the first project of the World climate research program. Bulletin of American Meteorological Society, n° 64, p. 779-784.

34

Étude de l'évolution du milieu naturel du delta du Danube

JULIAN C. BARBALATA ¹, ION IONESCU ² et IOAN NOAJE ²

¹ *Laboratoire de photogrammétrie, téledétection et SIG, Université de Moncton à Edmundston, 165, boulevard Hébert, Edmundston, Nouveau-Brunswick, Canada E3V 2S8; téléphone : +1 (506) 737-5236; télécopieur : +1 (506) 737-5373; CÉ : jbarbala@cuslm.ca*

² *Laboratoire de photogrammétrie et téledétection, Université technique de génie civil, 110, boulevard Lacul Tei, Bucarest, Roumanie; téléphone : +40 (1) 240-7330 (poste 188); télécopieur : +40 (1) 312-8793*

Résumé

Le système hydrographique du delta du Danube ainsi que de la zone côtière adjacente de la mer Noire présentent un intérêt scientifique et économique majeur. Ce système constitue la plus grande superficie de la Terre recouverte de roseau et représente en même temps l'habitat spécifique pour des espèces d'oiseaux sauvages uniques au monde. Dans la période 1960-1989, les aménagements agricoles, sylvicoles, piscicoles et les cannaies ont produit un grand déséquilibre écologique, influençant négativement le développement des réserves naturelles ornithologiques et forestières du delta du Danube. Après l'effondrement du communisme dans les pays de l'Europe centrale et de l'Est, considérant l'importance de préserver ce milieu naturel, le Gouvernement de la Roumanie a déclaré, en 1990 le delta du Danube comme réserve de la biosphère. Dans ce contexte, le but principal de cette étude a été de détecter les changements survenus dans le paysage du delta pendant les vingt dernières années en utilisant des méthodes photogrammétriques et de téledétection. L'accent a été mis sur la géomorphologie générale, sur les formations caractéristiques (levées alluviales, cordons littoraux, anciens cours d'eau) et sur l'évolution de la végétation. L'analyse diachronique d'images satellitaires, d'images photogrammétriques et de documents topographiques montre des changements importants au niveau des terres agricoles et boisées ainsi qu'au niveau des zones inondables.

1. Introduction

Les changements de l'environnement impliquent la mise en œuvre de nouvelles méthodes d'évaluation. Parmi ces méthodes, la télédétection présente un intérêt particulier, grâce à ses caractéristiques essentielles d'enregistrement et d'analyse. La télédétection, qui permet une vision globale des phénomènes, est en même temps le moyen d'étude privilégié pour contribuer à assurer une meilleure gestion de l'environnement. Les satellites d'observation de la Terre ont été fort utiles pour révéler les traumatismes régionaux ou continentaux et les données multitudes acquises nous ont informés sur des signes de dégradation de l'environnement dans plusieurs régions du monde. C'est dans ce cadre qu'a été entreprise une étude consacrée à l'évolution du milieu naturel du delta du Danube. L'utilisation des données satellitaires historiques MSS de Landsat, des données satellitaires à haute résolution HRV de SPOT et TM de Landsat, ainsi que des photographies aériennes à petite échelle, nous ont permis d'analyser les changements dans le paysage du delta du Danube au cours des vingt dernières années.

2. Cadre géographique

La superficie du delta proprement dit est de 4 152 km², dont la plus grande partie se trouve en territoire roumain (3 446 km², soit 82 %). La superficie de l'ancien golfe d'Halmyris, qui abrite aujourd'hui le complexe lagunaire Razim-Sinoe, est de 1 115 km², dont 863 km² sont occupés par des lacs. Les deux unités géographiques réunies totalisent 5 165 km², dont 732 km² (12,2 %) s'étendent sur la rive gauche du bras et du delta secondaire de Chilia, dans la Bessarabie du Sud. Les limites géographiques de l'espace deltaïque ainsi définies sont entre 44° 47' 30" (extrémité de la levée de Perisor) et 45° 37' 30" (rive du lac de Sasic en Bessarabie du Sud) de latitude nord, ainsi qu'entre 28° 44' 25" (bifurcation du bras Chilia) et 29° 46' (extrémité est du delta secondaire du bras Chilia, en Bessarabie) de longitude est. (fig. 1)

Selon l'avis de nombreux scientifiques roumains et étrangers (GASTESCU, 1992), l'origine du delta du Danube peut être placée dans le Pléistocène supérieur, quand, environ 13 000 ans A.A., le « cordon littoral initial » a commencé à se constituer dans la région centrale d'un golfe de la mer Noire; ce processus a duré jusque vers 9 500 A.A., quand ce cordon, qui correspond à l'axe central de l'alignement des cordons de Jibriceni, Letea, Caraorman et Crasnicol, avait fini par fermer le golfe pour en faire un liman. Sans rien perdre des traits classiques d'un delta, le delta du Danube pourrait être également décrit comme une étendue plate, soit une plaine alluviale en cours de formation, avec une très légère pente de l'ouest vers l'est (0,006 %), d'où surgissent, hauts de quelques mètres à peine, le champ de Chilia et la levée fluviale de Stipoc et les cordons littoraux de Letea et de Caraorman, couverts de forêts.

Par rapport au « niveau zéro » d'altitude de la mer Noire, 20,5 % du delta se trouve au-dessous et 79,5 % au-dessus de ce repère. Les zones dont la hauteur varie entre 0 et 1 m d'altitude sont prédominantes (54,5 %) par rapport à celles dont la hauteur se situe entre 1 et 2 m (18 %). Les reliefs les plus importants se trouvent sur les cordons littoraux de Letea (12,4 m) et de Caraorman (7 m) et les grandes dépressions appartiennent aux bras du fleuve : 39 m pour le bras de Chilia, 34 m à Tulcea, 26 m pour le bras de Sfintu Gheorghe et 18 m à Sulina. La profondeur des dépressions lacustres n'excède jamais 3 m, à l'exception toutefois du lac de méandre Belciug, qui a 7 m de profondeur. L'altitude moyenne du delta est de +0,52 m.

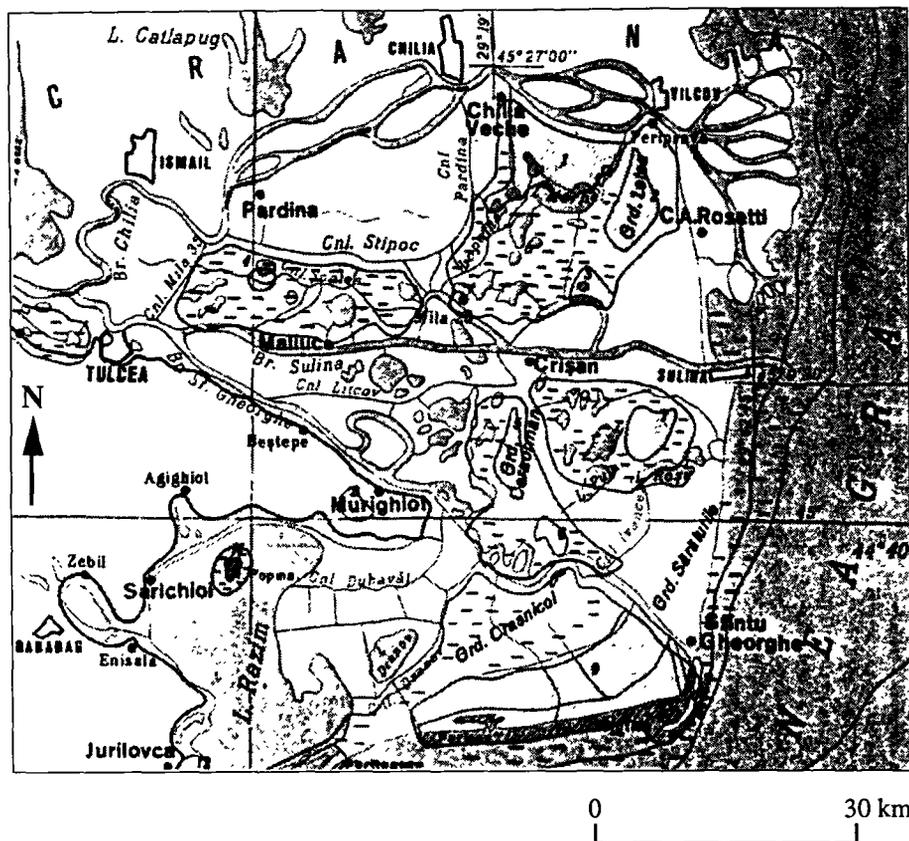


Figure 1. Delta du Danube

3. Matériel et méthodes

3.1. Matériel

Pour réaliser ce projet, des données MSS de Landsat-2 (1975 - 1981), TM de Landsat-5 (1984) et HRV (XS) de SPOT (1986 - 1993) ont été utilisées. Les caractéristiques de ces données sont présentées sur le tableau 1. Les traitements numériques de ces images ont été effectués dans un environnement basé sur un micro-ordinateur Unitek EISA 486-DX-50 avec 32 mégaoctets de RAM et 5,35 gigaoctets de mémoire sur les deux disques durs du système. La partie des traitements concernant l'application des méthodes photogrammétriques numériques a été effectuée avec le logiciel *Desktop Mapping System* (version 3.1) sur des photographies aériennes à l'échelle du 1: 30 000, numérisées avec le scanner *Scanjet II C* de Hewlett-Packard. La partie des traitements de base des images satellitaires a été effectuée avec le logiciel *EASI/PACE* (version 5.2) de PCI et, finalement, pour les sorties sur l'imprimante couleurs *DeskJet 560 C* de Hewlett-Packard on a utilisé le logiciel *Idrisi* pour Windows.

Tableau 1. Caractéristiques des données satellitaires utilisées

	24-07-1975	05-06-1981	28-06-1984	27-05-1986	27-04-1993
Satellite	Landsat-2	Landsat-2	Landsat-5	SPOT -1	SPOT-1
Capteur	MSS	MSS	TM	HRV-2	HRV-2
Mode d'acquisition	Multibande				
Bande	1,2,3,4	1,2,3,4	1,2,3,4,5,6,7	1,2,3	1,2,3
Trajectoire/ Rangée	195/029	195/029	180/029	98/259	98/259
Résolution (m)	79 x 79	79 x 79	30 x 30	20 x 20	20 x 20
Rectification* (pixel)	± 0,475	± 0,837	± 0,813	± 0,391	± 0,275

* Erreur quadratique moyenne après correction géométrique

Les corrections géométriques des images ont été appliquées sur la base d'un réseau de points de contrôle déterminé à partir des mesures d'aérotriangulation effectuées sur le restituteur analytique Wild Aviolyt BC2 (BARBALATA, 1988, 1993).

Des photographies aériennes prises dans les années 1978 et 1980 à l'échelle du 1: 30 000 et du 1: 40 000, ainsi que des cartes topographiques à l'échelle du 1: 50 000 ont également été utilisées.

Enfin, une campagne de terrain (1991-1993), effectuée par les chercheurs roumains, a permis de recueillir les données nécessaires pour dresser une carte thématique et valider la plupart des interprétations.

3.2. Méthode

La détection des changements à l'aide de données multibandes implique des traitements préliminaires, des classifications et des procédures spécifiques de type postclassification (ALLUM and DREISINGER, 1987; HILL and STURM, 1991; JENSEN *et al.*, 1995).

3.2.1. Traitements préliminaires

Pour assurer la comparabilité des données radiométriques multitudes, il a fallu ramener les données MSS et TM à la résolution spatiale de l'image de référence du HRV (XS).

À cause des résolutions différentes de ces capteurs, 80 m pour MSS, 30 m pour TM et 20 m pour HRV (XS), les données ont été soumises à un suréchantillonnage de 4 x 4 pour MSS et de 1,5 x 1,5 pour TM. Les étapes suivantes sont l'amélioration des contrastes et la sélection de points d'appui. Les 35 points qui représentent des objets invariants ont servi au calcul des fonctions de transformation géométrique représentées par des polynômes du 3^e degré. Ces transformations correspondent à l'ajustement des images suréchantillonnées sur l'image de référence HRV (XS) d'avril 1993. Étant donné que les coordonnées obtenues après les transformations ne correspondent pas à un pixel précis, il a été nécessaire d'appliquer une convolution cubique. Cette fonction d'échantillonnage, qui utilise une approximation bicubique de 16 voisins les plus proches du pixel concerné, permet de modéliser l'image localement par une surface polynomiale (DEFOURNY, 1994). À la fin,

on obtient des plans spectraux qui vont coïncider parfaitement au niveau de chaque pixel, avec l'image de référence. La précision de ces transformations varie selon les images utilisées. Les erreurs moyennes quadratiques pour chaque scène rectifiée sont présentées au tableau 1. On constate sur ce tableau que les précisions varient de $\pm 0,275$ à $\pm 0,837$ pixels. L'image représentée par la figure 34-2 (voir cahier couleur) est une composition couleur infrarouge rectifiée selon les principes énoncés plus haut. L'image est le résultat de l'application des traitements suivants : 1) étalement par la méthode d'égalisation des histogrammes; 2) création de l'image composite à partir des 3 canaux les plus décorrélés dans le cas de l'image TM et à partir des 3 canaux spécifiques de HRV (XS); 3) rééchantillonnage par convolution bicubique.

Cette composition colorée met très bien en évidence les caractéristiques géomorphologiques du delta du Danube. On distingue clairement les différents états du sol en fonction du degré d'humidité, notamment les étendues de grande humidité, représentées par les eaux courantes, les lacs, les eaux turbides et stagnantes, les restes des anciens méandres et les terrains marécageux. On distingue ensuite les étendues d'humidité modérée et faible, représentées par la structure parcellaire des terres agricoles et les sols sableux secs et nus. La composition colorée révèle également les principales formations morpho-hydrographiques représentées par les cordons littoraux, les levées fluviales, les plaines continentales, les bras, les ruisseaux et les chenaux.

Un problème rencontré par l'utilisation des images historiques pour des fins d'analyse diachronique est représenté par la variation de l'angle d'incidence du Soleil, la variation dans les conditions atmosphériques et d'humidité. Il y a aussi des facteurs qui affectent les valeurs de luminance des pixels, comme les différences de données de calibration des détecteurs appartenant aux différents systèmes de capteurs, la variation de l'angle d'incidence du Soleil, et la variation de la distance Soleil-Terre. Normalement, les données multidates doivent être normalisées pour réduire la variation des valeurs de luminance et les ramener aux conditions spécifiques de l'image de référence. À cause du manque d'informations concernant les caractéristiques atmosphériques et la réflectance bidirectionnelle des objets, nous avons adopté un modèle de correction qui tient compte des données de calibration du détecteur et des caractéristiques astronomiques, atmosphériques et d'angle de phase appartenant à la scène de référence (HRV).

Le calage radiométrique a été effectué sur des objets invariants et pseudo-invariants (CHAVEZ, 1989) : lacs, zones urbaines (Sulina, Sf. Gheorghe, Dunavat), portions du fleuve Danube, sablières sur la côte de la mer Noire, pour un total de 15 objets. La normalisation des images MSS et TM a été faite par l'application d'une équation de régression linéaire à chaque bande spectrale de type $y = ax + b$. Les résultats de la normalisation sont représentés par les coefficients de calage a et b , ainsi que par les coefficients de corrélation r (tab. 2). En analysant le tableau 2, on constate que le gain (coefficient a) associé à l'image HRV du 27 mai 1986 est minime, alors qu'il est significatif pour les images historiques MSS.

3.2.2. Classification

Une classification non dirigée (LEE and MARSH, 1995) pour l'image de référence a fourni 14 classes (fig. 34-3, voir cahier couleur). Les résultats ont été comparés avec les données de la campagne de terrain et finalement, après le regroupement des classes, une nouvelle classification dirigée de huit classes a été réalisée avec la méthode du maximum de vraisemblance (fig. 34-4, voir cahier couleur). Cette classification a servi pour la validation des classifications effectuées sur les images MSS et TM. On distingue sur l'image HRV (fig. 34-5, voir cahier couleur) les principales catégories morpho-hydrographiques :

Tableau 2. Paramètres des équations de régression du calage radiométrique

Date	Capteur	Bande	Coefficient a	Coefficient b	Coefficient r
24-07-1975	MSS	1	0,895	29,493	0,88
		2	0,638	26,572	0,86
		3	2,497	26,653	0,89
		4	3,415	30,451	0,79
05-06-1981	MSS	1	2,379	19,503	0,85
		2	2,034	12,705	0,89
		3	1,856	23,172	0,78
		4	3,697	25,005	0,89
28-06-1984	TM	1	1,175	28,505	0,86
		2	0,903	24,051	0,87
		3	1,305	31,015	0,87
		4	1,727	18,903	0,78
		5	1,503	21,441	0,89
		7	2,051	19,172	0,79
27-05-1986	HRV-1	1	0,468	34,754	0,89
		2	0,681	29,195	0,85
		3	0,611	25,288	0,87

- les cordons littoraux (8 %) qui occupent le côté est du delta et qui sont placés presqu'au travers des bras du Danube. Les principaux cordons littoraux sont représentés par les cordons Letea, Caraorman, Saraturile, Crasnicol;
- les levées fluviales (6 %) qui accompagnent les bras principaux et secondaires du fleuve et qui sont mieux représentées vers le sommet du delta, là où elles ont un aspect de plaines alluviales hautes de 2 à 5 m qui s'effilent vers la mer;
- les plaines continentales (3 %) qui sont formées de dépôts de lœss et qui sont représentées par la plaine de Chilia et par la zone centrale du cordon littoral de Stipoc;
- les terrains marécageux, couverts tantôt d'eau, quand le fleuve est haut, tantôt d'une végétation palustre, occupent dans leur état naturel environ 67,2 % de la superficie du delta, à une altitude qui varie entre -0,5 et 1 m;
- les lacs (8 %) qui remplissent les dépressions qui se trouvent au-dessous du niveau zéro à l'ouest (delta fluviale) et au-dessous du niveau -0,5 m à l'est (delta maritime) où ils forment des complexes lagunaires. Les lacs occupaient en 1964 une superficie de 31 260 ha, soit 9,3 % du territoire du delta. En 1990, après l'assèchement de certains d'entre eux au profit des terrains agricoles, leur superficie totale n'était que de 25 800 ha, soit 8 %. Les plus grands lacs du delta du Danube sont celui de Dranov (2 170 ha), le lac Rosu (1 445 ha), Gorgova (1 377 ha), Lumina (1 367 ha), Isac (1 101 ha), Merhei (1 057 ha) et Furtuna (977 ha);
- les bras, les ruisseaux et les chenaux principaux qui couvrent 5 % de la superficie, dont les bras totalisent 4 % à eux seuls.

Une description détaillée des classes est présentée à l'annexe 1.

3.2.3. Traitements de postclassification

Des études concernant le suivi des changements des caractéristiques de la végétation (TUCKER *et al.*, 1985; CIHLAR *et al.*, 1991; MARSH *et al.*, 1992) sont basées sur l'indice de végétation normalisé. La réflexion différentielle de la végétation verte dans le spectre du visible et de l'infrarouge proche du spectre électromagnétique constitue l'argument de base théorique pour l'application de cette méthode (KARIMOUNE *et al.*, 1993; WEBER *et al.*, 1993; WOLTER *et al.*, 1995). Dans le cas de données MSS, l'indice de végétation NDVI, s'exprime par la relation :

$$NDVI (MSS) = \frac{(CH4 - CH2)}{(CH4 + CH2)}$$

où CH2 = réflectance dans le canal rouge (0,6 - 0,7 μ m);

CH4 = réflectance dans le canal infrarouge proche (0,8 - 1,1 μ m).

Finalement, l'indice NDVI a été calculé en fonction du degré d'absorption par la chlorophylle dans la bande rouge. Celle-ci est proportionnelle à la concentration de la chlorophylle dans les feuilles. L'indice NDVI a été calculé également en fonction de la réflectance dans la bande infrarouge proche. La réflectance de celle-ci est proportionnelle à la verdure des feuilles et aux caractéristiques de la surface. Une autre version de l'indice de végétation, sous le nom de *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI) (HUETE, 1988) a été calculée. Dans le cas des données MSS, la relation SAVI devient :

$$SAVI (MSS) = \left[\frac{(CH4 - CH2)}{(CH4 + CH2 + 0,5)} \right] \cdot 1,5$$

Pour certaines zones analysées, la comparaison entre les valeurs NDVI et SAVI a montré que les valeurs SAVI sont plus significatives pour le couvert végétal que les valeurs NDVI. Par conséquent, nous avons choisi l'indice de végétation SAVI pour caractériser l'état de la végétation dans le cas des données MSS (LEE and MARSH, 1995).

Comme dernière étape principale dans le cadre de l'analyse multirate sur la base des classifications des données NDVI et SAVI, nous avons appliqué une classification matricielle croisée qui s'est avérée très utile pour identifier les changements entre différentes dates. Les matrices résultantes nous ont permis d'obtenir pour les classes analysées : 1) sur la diagonale principale, le nombre de pixels, ou le pourcentage de pixels qui n'ont pas subi de changement entre les deux dates analysées; 2) au-dessus de la diagonale principale, le nombre de pixels, ou le pourcentage de pixels qui ont subi des changements positifs (augmentation); 3) au-dessous de la diagonale principale, le nombre de pixels, ou le pourcentage de pixels qui ont subi des changements négatifs (diminution).

4. Discussion et conclusion

Les résultats de cette étude nous montrent le potentiel des données historiques (MSS, 1975 et 1981), des données TM (1984) et HRV (1986 et 1993) et de leur intégration dans des analyses multirates, pour obtenir des informations viables concernant le suivi des changements dans le milieu naturel du delta du Danube sur une période approximative d'une vingtaine d'années.

Une attention particulière doit être réservée aux traitements préliminaires, car la qualité des analyses ultérieures dépend surtout, dans le cas des analyses diachroniques, de la prise en considération des caractéristiques des différents capteurs et des conditions atmosphériques spécifiques.

L'utilisation de l'indice de végétation SAVI, combinée avec l'analyse matricielle croisée, ont apporté des informations très utiles en ce qui concerne le pourcentage des changements de différentes classes de végétation des écosystèmes du delta du Danube. Les analyses détaillées et les résultats quantitatifs et qualitatifs sont présentés dans BARBALATA (1995).

5. Remerciements

Nous remercions tout particulièrement l'AUEP-UREF qui a financé totalement les travaux de recherche associés à cette étude.

6. Références

- ALLUM, J.A.E. and DREISINGER, B.R. 1987. Remote sensing of vegetation change near Inco's Sudbury mining. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 8, n° 3, p. 399-416.
- BARBALATA, J. C. 1988. Block triangulation at large scale using flight variant UMK camera photography. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 27, partie B11, p. 469-475.
- BARBALATA, J. C. 1993. Integration of the Aviolyt BC2 Analytical Stereo-Plotter into CARIS Geographic Information System. *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 17, n° 3, p. 239-242.
- BARBALATA, C.J. 1995. Étude de l'évolution du milieu naturel du delta du Danube par télédétection multi-temporelle. *Laboratoire de photogrammétrie, télédétection et SIG, Université de Moncton, N.-B., rapport n° 12, 80 p.*
- CHAVEZ, P. S. 1989. Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper Images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 55, n° 9, p. 1285-1294.
- CIHLAR, J., ST.-LAURENT, L. and DYER, J. A. 1991. Relation between the normalized difference vegetation index and ecological variables. *Remote Sensing of Environment*, n° 35, p. 279-289.
- DEFOURNY, P. 1994. Évaluation et suivi de la végétation ligneuse en région tropicale sèche. *in F. Bonn (réd). Télédétection de l'environnement dans l'espace francophone. ACCT/ Presses de l'Université du Québec, Sainte-Foy, p. 247-264.*
- GASTESCU, P. 1992. *Le delta du Danube*. Ed. DTM, Bucaresti, Romania.
- HILL, J. and STURM, B. 1991. Radiometric correction of multitemporal Thematic Mapper data for use in agricultural land-cover classification and vegetation monitoring. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 12, n° 7, p. 1471-1491
- HUETE, A.R. 1988. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, vol. 25, p. 295-309.
- JENSEN, J.R., RUTCHEY, K., KOCH, M.S. and NARUMANALI, S. 1995. Inland Wetland Change Detection in the Everglades Water Conservation Area 2A Using a Time Series of Normalized Remotely Sensed Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 61, n° 2, p. 199-209.

Étude de l'évolution du milieu naturel du delta du Danube

- KARIMOUNE, S., ALEXANDRE, J. et OZER, A. 1993. Suivi par télédétection de la désertification dans la région de Zinder (Niger). in J.-M. Dubois, F. Cavayas et P. Lafrance (éd.). *Télédétection appliquée à la cartographie thématique et topographique*. Édition AUELF/Presses de l'Université du Québec, Sainte-Foy, p. 151-159.
- LEE, C.T. and MARSH, S.E. 1995. The Use of Archival Landsat MSS and Ancillary Data in a GIS Environment to Map Historical Change in an Urban Riparian Habitat. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 61, n° 8, p. 999-1008.
- MARSH, S.E., WALSH, J.L., LEE, C.T. and HUTCHINSON, C.F. 1992. Comparison of multi-temporal NOAA-AVHRR and SPOT-XS satellite data for mapping land-cover dynamics in the West African Sahel. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 13, n° 16, p. 2997-3016.
- TUCKER, C.J., VANPRAET, M.J., SHARMAN, M.J. and ITTERSUM, G. VAN, 1985. Satellite remote sensing of total herbaceous biomass production in the Senegalese Sahel : 1980-1984. *Remote Sensing of Environment*, vol. 17, p. 233-249.
- WEBER, C., HIRSCH, J. et SERRADJ, A. 1993. Cartographie d'une forêt spécifique à partir de données satellitaires TM de Landsat et HRV de SPOT : la forêt alluviale de la Robertsau. in J.-M. Dubois, F. Cavayas et P. Lafrance (éd.). *Télédétection appliquée à la cartographie thématique et topographique*. Édition AUELF/Presses de l'Université du Québec, Sainte-Foy, p. 273-282.
- WOLTER, P.T., MLADENOFF, D.J., HOST, E. and CROW, T.R. 1995. Improved Forest Classification in the Northern Lake States Using Multi-Temporal Landsat Imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 61, n° 9, p. 1129-1143.

Annexe 1

Classe : eaux courantes

Le Danube et ses bras : Chilia, ramifié et plein d'îlots, est le plus jeune, le plus long (120 km) et le plus vigoureux des trois bras. Il laisse passer 58 % des eaux et des alluvions du fleuve. Au cours de son évolution, il a formé plusieurs deltas secondaires, le premier dans la dépression de Pardina, le second tout près de la localité de Chilia Veche et le troisième, qui est en cours de formation, au-delà de Periprava. Le bras de Sulina a été préféré par la Commission Européenne du Danube, qui a entrepris d'amples études à cet effet, pour la navigation maritime. Dans ce but, entre 1862 et 1902, on a corrigé ses méandres et on a approfondi son lit. Sa longueur s'est par conséquent réduite de 92 km à 63,7 km, et le volume d'eau et d'alluvions a augmenté de 9 %, au détriment du bras de Chilia. À cause des alluvions déposées à l'embouchure du bras, on a dû récemment creuser un canal qui avance peu à peu dans la mer pour protéger la navigation; sa longueur actuelle est de moins de 10 km. Sfintu Gheorghe, long de 108,2 km, est le plus ancien des bras du Danube. Six de ses grands méandres ont été corrigés ces dernières années, ce qui l'a réduit à 69,7 km. Avant l'embouchure, le bras bifurque et le nouveau bras, placé à droite par rapport au bras Sfintu Gheorghe, bifurque à son tour dans deux bras secondaires, Garla de Mijloc et Garla Turceasca. Les deux finissent par déboucher dans un golfe appelé la baie de Sfintu Gheorghe, formé par l'apparition en 1897 et le développement ultérieur des îles Sacalin, qui ont actuellement une longueur de 19 km.

Classe : eaux stagnantes

L'écosystème des eaux stagnantes, où la première place est occupée par les lacs et ensuite par les petits bras secondaires et les chenaux boueux, se caractérise par une flore riche, submergée et flottante dont on remarque surtout *Myriophyllum* et *Ceratophyllum* qui sont des plantes submergées, mais en régression suite à l'eutrophisation de l'eau, des nénuphars (*Nymphaea alba*, *Nuphar luteum*)

des *Trapa natans*, *Alisma plantago*, *Sagittaria sagittifolia*, qui sont des plantes flottantes à racines qui se développent aux bords des lacs, des *Lemma*, *Salvinia natans*, *Stratiotes aloides* et *Spirogyra*, qui sont des plantes flottantes sans racines et ayant des effets négatifs sur la productivité biologique des eaux.

Classe : terrains marécageux et inondables

Dans l'écosystème des terrains marécageux et inondables (des cannaies et des « plaur ») domine une végétation émergée où prédominent le roseau (*Phragmites communis*) et, vers les levées fluviales, la masette (*Tipha latifolia*, *Tipha angustifolia*), le carex (*Carex dioica*, *Carex stricta*), le jonc des tonneliers (*Scirpus radicans*, *Scirpus lacustris*), les iris jaunes (*Iris pseudocorus*), la menthe des marais (*Mentha aquatica*), la saule cendrée (*Salix cinerea*), etc. Il faut absolument mentionner à l'intérieur de cet écosystème la formation de « plaur », sorte d'île flottante formée de rhizomes entremêlés qui sert de sol à une formation végétale où dominent le roseau et les herbes. Les cannaies se forment, en général, autour des lacs et des complexes lacustres qu'ils envahissent à la longue.

Classe : levées fluviales et cordons littoraux

Dans l'écosystème des levées, l'élément de base est la levée fluviale. Les levées fluviales, jadis le royaume des saules, ont été défrichées et plantées de peupliers du Canada. Il y a quand même des boqueteaux de saules (*Salix alba*, *Salix fragilis*, *Salix pentandra*, *Salix rubra*, *Salix cinerea*) à côté du Peuplier blanc (*Populus alba*) et de quelques variétés d'arbrisseaux. Les cordons littoraux de Letea et de Caraorman dont le sol est sablonneux, sont des dunes couvertes de forêts de chênes autour desquels se sont enroulées des lianes, ce qui leur donne l'aspect d'une forêt subtropicale. Sur le cordon littoral de Letea, les dépressions formées entre les dunes sont couvertes de forêts, sous forme de boqueteaux, nommées hasmace. Le spectre floral est constitué d'arbres tels le chêne (*Quercus robur*, *Quercus pedunculiflora*), le frêne (*Fraxinus angustifolia*, *Fraxinus pallisae*), l'orme (*Ulmus foliacea Ulmus*), le Peuplier blanc, le Grisard et le Peuplier faux tremble (*Populus alba*, *Populus canadensis*, *Populus tremula*); d'arbrisseaux comme l'Épine noire (*Prunus spinosa*), l'Aubépine (*Crataegus monogyna*), l'Églantier (*Rosa canina*), l'Épine-vinette (*Berberis vulgaris*), la Prunelle (*Ligustrum vulgare*), l'Argousier (*Hyppophae rhamnoides*), *Tamarix gallica* et de plantes grimpantes comme la Vigne vierge (*Vitis silvestris*), le Lierre (*Hedera helix*), le Houblon (*Humulus lupulus*) et *Periploca graeca*, une liane extrêmement intéressante, d'une longueur pouvant atteindre 25 m.

Classe : aménagements agricoles

Les écosystèmes des eaux stagnantes, des cannaies et des levées fluviales ont subi des modifications majeures dues à la construction d'enceintes destinées aux cultures agricoles, aux plantations sylvicoles et aux établissements piscicoles, dont la superficie remontait, en 1991, à 100 700 ha, soit environ 30 % de la superficie totale du delta. Les aménagements qui ont totalement changé le paysage du delta ont été faits à Pardina (27 000 ha), Sireasa (7 500 ha), Carasuhat (2 800 ha) et Murghiol-Dunavat (2 500 ha).

Classe : aménagements sylvicoles et piscicoles

Les aménagements sylvicoles (Păpădia 2 000 ha, Rusca 1 200 ha, Carasuhat 680 ha, Murighiol 400 ha) et les aménagements piscicoles ont également abouti à la modification des écosystèmes naturels par les lotissements et les travaux de régularisation du régime hydrologique. On envisage de réintégrer les aménagements qui sont prouvés inefficaces, dans le régime hydrologique naturel (Holbina I, Holbina II, Dunavat II et Popina).

35

Suivi spectral des rizières dans le delta du fleuve Rouge (Viêt-nam) à l'aide de mesures spectroradiométriques et d'indices de végétation : appui à la compréhension des images satellitaires

NGUYEN XUAN DAO ^{1†}, ABDERRAZAK BANNARI ², PHAM VAN CU ¹,
FERDINAND BONN ², JUDITH COULOMBE-SIMONEAU ²,
PIERRE LAFRANCE ² et PATRICK CLICHE ²

¹ *Centre de télédétection et de géomatique, Institut de géologie, Centre national des sciences naturelles et de la technologie du Viêt-nam, Hanoi, Viêt-nam; téléphone et télécopieur : +84 (4) 835-14-93; CÉ : cu@ir-igl.ac.vn*

² *Centre d'applications et de recherches en télédétection (CARTEL), Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada J1K 2R1; téléphone : +1 (819) 821-7180; télécopieur : +1 (819) 821-7944; CÉ : cartel@courrier.usherb.ca*

[†] *Cet article est un hommage posthume à Nguyen Xuan Dao, décédé tragiquement au courant de l'été 1995.*

Résumé

Au Viêt-nam, les réformes économiques et agraires pourraient aboutir à une augmentation spectaculaire de la production de riz au cours de la décennie à venir. Dans cette optique, l'analyse des images multibandes de télédétection apparaît comme une technique bien adaptée pour le suivi de l'évolution de l'environnement des rizières et des superficies cultivées afin de prévoir la production. Pour mieux comprendre les interactions du rayonnement électromagnétique avec les différentes unités d'occupation du sol, nous avons entrepris d'étudier leurs profils spectraux à partir des mesures physiques au sol. Les

données utilisées dans la présente étude ont été recueillies lors d'une campagne de mesures radiométriques menée dans le delta du fleuve Rouge à l'aide des radiomètres CIMEL et Spectron. Quatre sites sont retenus ici, ils représentent : 1) un sol nu typique de la région, de couleur gris-rouge argileux; 2) une rizière à une semaine émergeant d'une lame d'eau, avec un taux de couverture de 7 %; 3) une rizière à quatre semaines avec un sol humide sans lame d'eau, avec un taux de couverture de 29 %; et 4) une rizière à six semaines qui montre un taux de couverture élevé (66 %). L'indice de végétation SAVI permet une bonne description du taux de couverture du riz à différents stades de croissance indépendamment de la lame d'eau. Le taux de couverture du riz est surestimé durant tous les stades de croissance par les indices NDVI et GEMI, alors qu'il est sous-estimé par le TSAVI en période immergée, ce qui en rend plus difficile l'interprétation des résultats et par conséquent les prévisions des récoltes.

1. Introduction

Classé au second rang des céréales mondiales, le riz constitue la base de l'alimentation et la principale source de revenus de la majorité des pays asiatiques qui en sont les gros producteurs. L'accroissement de production est indispensable, d'une part, pour nourrir les populations en expansion de ces pays asiatiques et, d'autre part, pour l'exportation qui est une source de devises étrangères. Au Viêt-nam, les réformes économiques et agraires pourraient aboutir à une augmentation spectaculaire de la production de riz au cours de la décennie à venir (EVENSON et DAVID, 1993). Dans cette optique, l'analyse des images multibandes de télédétection apparaît comme une technique bien adaptée pour le suivi de l'évolution de l'environnement des rizières et des superficies cultivées afin de prévoir la production. Comparativement aux méthodes conventionnelles comme l'analyse visuelle des photographies aériennes et les enquêtes sur le terrain, la télédétection a coûté deux fois moins cher pour le suivi de l'environnement des rizières en Australie (McCLOY *et al.*, 1987). Vis-à-vis de la télédétection, la caractéristique principale des rizières est leur hétérogénéité spatiale et spectrale due à la présence de l'eau, des algues, du riz et du sol, ainsi qu'au parcellaire très morcelé. Pour mieux comprendre les interactions du rayonnement électromagnétique (vecteur de l'information) avec ces différentes unités d'occupation du sol, nous avons entrepris d'étudier leurs profils spectraux à partir des mesures physiques au sol.

Dans le cadre d'un projet de recherche partagée pour la surveillance de l'environnement par télédétection et système d'information géographique (SIG) dans le delta du fleuve Rouge au Viêt-nam, une campagne de mesures radiométriques au sol a été réalisée à différents stades de croissance du riz. La réalisation de ce suivi doit s'appuyer sur l'examen des limitations propres aux techniques de télédétection (FERRARI et GRÉGOIRE, 1983) compte tenu de la réalité de terrain et des spécificités du secteur d'étude : dimension des parcelles qui est souvent inférieure ou égale à celle du pixel (HRV, TM, etc.), variations dans l'espace (sols, eau, végétation) et dans le temps (stades de croissance, conditions de submersion, etc.) (ANGLADETTE, 1966). Les unités d'occupation du sol envoient au satellite un signal mixte composé de luminances de la végétation combinées à celles du sol, de l'eau et de toute sorte de végétation aquatique plus au moins verte (algues, lemnaçées, etc.).

Ceci se traduit directement au niveau satellitaire par la présence d'un signal mixte dans un même pixel, ce qui cause un problème de compréhension de l'information reçue au capteur. La figure 1 illustre bien cette situation et montre le comportement spectral propre

à chacune des unités et du riz à différents stades de croissance. Un autre problème relève des conditions atmosphériques dans le delta qui sont défavorables presque durant toute l'année ce qui n'aide pas à faire des études multitudes. En effet, les rares images qui existent sur la région sont caractérisées dans la plupart des cas par un faible contraste (effet d'environnement) ce qui affecte par conséquent l'interprétation des résultats. De ce fait, afin de connaître le comportement spectral de chacune des variables de ce milieu, nous trouvons très pertinent, dans un premier temps, de travailler dans un cadre basé sur des mesures au sol dont on connaît *a priori* l'occupation. Cela devrait permettre de mieux connaître le comportement spectral des rizières à divers stades de croissance, de déterminer des points de référence invariants pour l'observation des changements de l'environnement dans le delta et, comme perspectives futures, d'établir un catalogue des signatures spectrales des principales unités d'utilisation du sol.

L'exploitation des données de télédétection peut être effectuée à l'aide d'un éventail important de démarches différentes. La démarche présentée dans le cadre de cette étude s'appuie sur la transformation d'une série de données spectrométriques en indices de végétation. Les résultats de ces mesures sont analysés dans l'espace spectral rouge/infrarouge proche, puis transformés par la suite en quatre indices de végétation différents (NDVI, SAVI, TSAVI et GEMI). Le potentiel de ces indices est analysé pour déterminer le taux de couverture du riz indépendamment du sol nu et de la lame d'eau dont la hauteur varie en fonction du cycle de développement et des conditions météorologiques (fig. 1). L'existence d'une relation entre l'indice de végétation et les paramètres du riz peut être utile pour l'établissement d'une typologie des rizières, d'une évaluation du taux de couverture et pour une compréhension de l'évolution du milieu.

2. Site d'étude

Le fleuve Rouge du Viêt-nam prend naissance en Chine et doit son nom à la couleur brique que prennent ses eaux en période d'inondation. Avec les villes de Hanoi et de Haiphong, son delta regroupe l'essentiel de la population et la moitié de l'activité économique du nord du pays et produit environ la moitié de la production nationale de riz. Les données utilisées

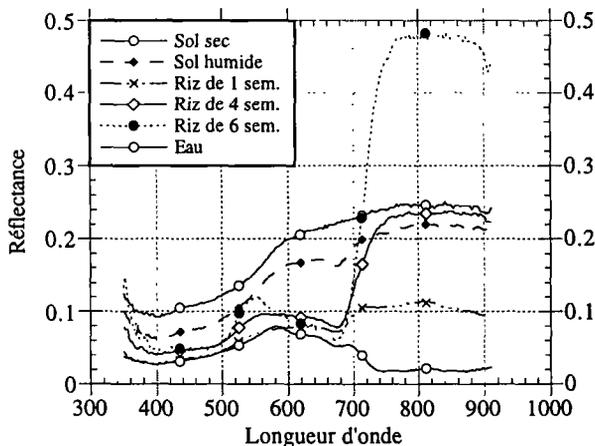


Figure 1. Comportement spectral du riz en fonction de la lame d'eau et du stade de croissance

traitement d'images à une classification par la méthode du maximum de vraisemblance des images ainsi obtenues dans les trois canaux du visible. Les taux de couverture résultants sont résumés sur le tableau 1.

3.2. Mesures spectroradiométriques

Les données utilisées dans cette étude impliquent un mélange spectral dû aux contributions du sol, de la végétation et de l'eau. Les mesures radiométriques ont été faites à l'aide d'un radiomètre portable de simulation du capteur HRV du satellite SPOT (CE-310 de CIMEL), ainsi qu'à l'aide d'un spectroradiomètre Spectron. Le CIMEL est doté de deux canaux dans le visible (vert et rouge) et d'un canal dans l'infrarouge proche, avec un champ de visée de 12°. Il mesure l'éclairement solaire incident au sol et la luminance dans chacun des trois canaux. Le radiomètre était placé à 2,5 m du sol en position verticale. La réflectance de la cible a été obtenue conformément à la méthode décrite par JACKSON *et al.* (1980) adaptée aux caractéristiques du radiomètre par l'utilisation d'une surface de référence lambertienne pour la normalisation des mesures. La réflectance de la cible est obtenue par la formule suivante :

$$\rho_{cible} = \frac{L_{cible}}{L_{réf}} \cdot \rho_{réf} \quad (1)$$

où ρ_{cible} = réflectance de la cible;
 $\rho_{réf}$ = réflectance de la surface de référence;
 L_{cible} = luminance de la cible mesurée par le radiomètre;
 $L_{réf}$ = luminance de la surface de référence mesurée par le radiomètre.

La réflectance bidirectionnelle dépend à la fois des angles d'éclairement et de visée. Cet effet bidirectionnel demeure négligeable dans notre cas puisque nos mesures ont été réalisées durant des intervalles de temps très courts et très rapprochés en gardant l'angle de visée constant dans une position verticale.

3.3. Passage des mesures aux indices de végétation

Malgré l'existence d'une quarantaine d'indices de végétation dans la littérature (BANNARI *et al.*, 1995), les rares travaux qui existent sur le suivi de l'environnement des rizières, utilisent souvent l'indice de végétation NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) développé par ROUSE *et al.* (1974). Cet indice permet la mise en évidence des stades de croissance du riz (MAHAMAN, 1991). Dans l'optique de minimiser l'effet des sols sur la détection des couverts végétaux, les indices SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*) (HUETE, 1988) et TSAVI (*Transformed Soil Adjusted Vegetation Index*) (BARET and

Tableau 1. Résultats des classifications

Stade de croissance	Taux de couverture du riz (%)	Remarques
1 semaine	7	Présence d'eau et d'ombre
4 semaines	29	Présence de sol nu humide
6 semaines	66	Présence d'eau

GUYOT, 1991) caractérisent bien le comportement spectral des couverts végétaux et du sol. Pour une gestion globale de l'environnement végétal à partir d'images satellitaires, PINTY et VERSTRAETE (1992) proposent un indice de végétation non linéaire le GEMI (*Global Environment Monitoring Index*). Ces quatre indices (NDVI, SAVI, TSAVI et GEMI), jugés pertinents pour la présente étude, sont retenus :

$$NDVI = \frac{(\rho_{PIR} - \rho_R)}{(\rho_{PIR} + \rho_R)} \quad (2)$$

$$SAVI = \frac{(\rho_{PIR} - \rho_R)}{(\rho_{PIR} + \rho_R + L)} \cdot (1 + L) \quad (3)$$

$$TSAVI = \frac{a(\rho_{PIR} - a\rho_R - b)}{\rho_R + a\rho_{PIR} - ab + 0,08(1 + a^2)} \quad (4)$$

$$GEMI = \frac{\eta(1 - 0,25\eta) - (\rho_R - 0,125)}{1 - \rho_R} \quad (5)$$

$$\eta = \frac{\left[2(\rho_{PIR}^2 - \rho_R^2) + 1,5\rho_{PIR} + 0,5\rho_R \right]}{(\rho_{PIR} + \rho_R + 0,5)} \quad (6)$$

- où
- ρ_R = réflectance moyenne dans le canal rouge;
 - ρ_{PIR} = réflectance moyenne dans le canal infrarouge proche;
 - a = pente de la droite des sols nus;
 - b = ordonnée à l'origine de la droite des sols nus;
 - L = facteur d'ajustement égal à 0,5.

4. Analyse et discussion des résultats

Dans l'espace spectral bidimensionnel rouge/infrarouge proche, nous constatons que les classes de riz à différents stades de croissance se distinguent très bien l'une de l'autre et aussi des classes de sols sec et humide (fig. 3). Nous remarquons que le comportement spectral permet de déterminer la densité du riz à un moment donné de sa croissance. Le riz à 6 semaines se distingue nettement des autres classes par sa forte réponse spectrale dans l'infrarouge proche. Quant au riz d'une semaine, sa signature se situe près de l'origine de la droite des sols. Elle est fortement influencée, d'une part, par l'effet de la lame d'eau qui absorbe sélectivement dans le rouge et l'infrarouge proche et, d'autre part, par celui du sol sous-jacent. Théoriquement, les signatures des sols nus secs et humides doivent être confondues avec la droite des sols, mais nous remarquons qu'elles s'en écartent un peu du fait que la réflectance dans l'infrarouge proche est légèrement accentuée à cause de la couleur gris-rouge du sol. À la lumière de ces constatations, nous pouvons dire que l'information spectrale contenue dans les canaux rouge et infrarouge proche permet une bonne discrimination entre les classes de sol et de riz à différents stades de croissance. Par conséquent, les indices de végétation dérivés à partir de ces deux canaux devraient pouvoir servir à caractériser l'état des surfaces dans un environnement de rizières.

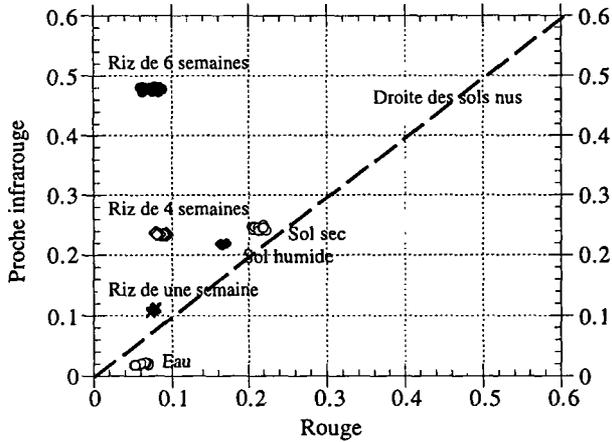


Figure 3. Caractérisation des différentes unités du sol dans l'espace spectral rouge/proche infrarouge

Pour chacun des sites d'étude, la figure 4 illustre bien la variation de la sensibilité entre les indices de végétation en fonction de différents taux de couverture du riz, du sol et de la lame d'eau. Dans le cas des sols nus, le TSAVI se caractérise par un comportement exemplaire du fait qu'il considère les paramètres de la droite des sols. Malgré l'ajustement du SAVI par rapport aux sols nus, il manifeste une faiblesse pour les couleurs claires de sols ce qui se traduit par une erreur quadratique moyenne de 8 %. Quant aux indices NDVI et GEMI, leur erreur de sensibilité aux sols nus est fortement significative, elle est de 13 % et 39 %, respectivement.

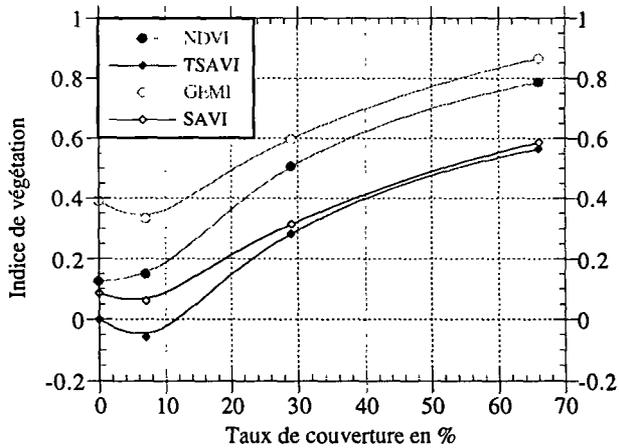


Figure 4. Sensibilité des indices de végétation aux taux de couverture du riz à différents stades de croissance

Par ailleurs, à cause de la présence d'eau pour le riz d'une semaine, l'absorption devient forte dans le rouge et l'infrarouge proche ce qui explique la forme concave des courbes de la figure 4. Pour le riz d'une semaine comme pour le riz de six semaines, la présence de l'eau affecte la précision du TSAVI. Les valeurs de celui-ci deviennent négatives (pour une semaine) ou faibles (pour six semaines). Par conséquent, il sous-estime le taux de couverture. En absence d'eau durant le stade de croissance de quatre semaines, le TSAVI s'approche de la réalité avec une erreur nulle.

En plus de leur sensibilité aux sols nus et à la lame d'eau, nous remarquons que globalement les indices NDVI et GEMI surestiment le taux de couverture. Durant tous les stades du cycle de développement, le taux de couverture est surestimé d'environ 14 % pour le NDVI et de 26 % pour le GEMI (tab. 2). Ceci fausse l'interprétation des résultats et par la suite les prévisions des récoltes.

Malgré sa sensibilité à la couleur du sol, le SAVI reflète une indépendance vis-à-vis la lame d'eau et estime le taux de couverture avec une bonne précision. Le tableau 2 montre une faible erreur moyenne sur cet indice et une excellente description du taux de couverture du riz à différents stades de croissance, en particulier en conditions immergées.

Tableau 2. Erreur sur l'indice de végétation en fonction du stade de croissance du riz

Stade de croissance	Erreur sur l'indice de végétation (%)			
	D NDVI	D GEMI	D TSAVI	D SAVI
Sol nu	+13	+39	0	+8
1 semaine	+8	+26	-13	0
4 semaines	+22	+31	-1	+2
6 semaines	+13	+21	-9	-6
Erreur quadratique moyenne	14,9	30,0	7,9	5,1

5. Conclusion

L'évaluation du taux de recouvrement du sol par la végétation est une des premières étapes de la compréhension du paysage à l'aide des données de télédétection. Afin d'étudier le potentiel des indices de végétation dérivés de mesures radiométriques pour le suivi de l'environnement d'une rizière, nous les avons confrontés aux taux de couverture du riz à différents stades de croissance déterminés par classification à partir des photographies numérisées. L'indice de végétation SAVI dérivé à partir des mesures radiométriques permet une bonne description du taux de couverture du riz à différents stades de croissance indépendamment de la lame d'eau. Le taux de couverture du riz est surestimé durant tous les stades de croissance par les indices NDVI et GEMI, alors qu'il est sous-estimé par le TSAVI en période immergée, ce qui en rend plus difficile l'interprétation des résultats et par conséquent les prévisions des récoltes.

Dans une étape ultérieure, nous utiliserons la méthode d'analyse des mélanges de spectres en vue de décomposer le signal en composantes propres à chacune des classes d'occupation du sol (SMITH *et al.*, 1994) en nous appuyant sur l'analyse des spectres complets obtenus à l'aide du spectroradiomètre.

6. Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le programme de recherche partagée de l'AUPELF-UREF qui leur a permis, non seulement de mener à bien cette recherche, mais aussi de s'en servir comme amorce pour un projet de plus grande envergure financé par le CRDI (Centre de Recherche et de Développement International).

7. Références

- ANGLADETTE, A. 1966. Le riz. Collection Techniques agricoles et productions tropicales. Maisonneuve et Larose, Paris, 930 p.
- BANNARI, A., MORIN, D., HUETE, A. R. and BONN, F. 1995. A Review of Vegetation Indices. *Remote Sensing Reviews*, vol. 13, p. 95-120.
- BARET, F. and GUYOT, G. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*, vol. 35, p. 161-173.
- EVENSON, R. et DAVID, C. 1993. Ajustement et technologie : le cas du riz. Études du Centre de développement de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE), Paris, p. 159.
- FERRARI, G. M. et GRÉGOIRE, J. M. 1983. Analyse de mesures radiométriques au sol sur le site rizicole de Tamani (Rép. du Mali) : influence de certains paramètres de rendement sur le comportement spectral. Actes du II^e Colloque international des signatures spectrales d'objets en télédétection, Bordeaux, France, Ed. INRA Publ., Les Colloques de l'INRA, n° 23, p. 193-200.
- HUETE, A. R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, vol. 25, p. 295-309.
- JACKSON, R. D., PINTER, P. J., PAUL, J., REGINATO, R. J., ROBET, J. and IDSO, S. B. 1980. Hand-held radiometry. U.S. Department of Agriculture Science and Education Administration, Agricultural Reviews and Manuals, ARM-W-19, Phoenix, Arizona, USA, 66 p.
- MAHAMAN, M. 1991. Applications de la télédétection aux bas-fonds rizières. Travail de fin d'études présenté en vue de l'obtention du titre d'ingénieur agronome - orientation génie rural, Unité d'hydrologie agricole, Département de génie rural, Faculté des sciences agronomiques de Gembloux, Belgique.
- McCLOY, K. R., SMITH, F. R. and ROBINSON, M. R. 1987. Monitoring rice areas using Landsat-MSS data. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 5, n° 5, p. 741-749.
- PINTY, B. and VERSTRAETE, M. M. 1992. GEMI: a non-linear index to monitor global vegetation from satellites. *Vegetation*, vol. 101, p. 15-20.
- ROUSE, J. W., HAAS, R. W., SCHELL, J. A., DEERING, D. W. and HARLAN, J. C. 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Greenwave effect) of natural vegetation. NASA / GSFCT Type III Final Report, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, USA, 164 p.
- SMITH, M. O., ADAMS, J. B. and SABOL, D. E. 1994. Spectral Mixture Analysis - New Strategies for the Analysis of Multispectral Data. in J. HILL and J. MÉGIER (eds), *Imaging Spectrometry - a Tool for Environmental Observations*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, p. 125-143.

Conclusions

JEAN-PAUL DONNAY

Laboratoire SURFACES, Université de Liège, Place du 20-Août, 7, 4000 Liège, Belgique; téléphone : +32 (4) 366-54-24; télécopieur : +32 (4) 366-56-93; CÉ : surfaces@geo.ulg.ac.be

1. Pourquoi la télédétection urbaine ?

Pour ses Sixièmes Journées scientifiques, le Réseau Télédétection de l'AUPELF-UREF a choisi le thème de la télédétection des espaces urbains et périurbains. Pour tâcher de tirer les conclusions de cette réunion scientifique, il est bon d'en rappeler les attentes et, en premier lieu, de préciser pourquoi il est permis de parler de télédétection urbaine, et en quoi elle se différencie des autres applications de la télédétection.

La télédétection urbaine trouve son originalité, sa richesse, mais aussi ses limites, dans sa totale dépendance vis-à-vis de la technologie et de la méthodologie, dans sa totale dépendance vis-à-vis des données exogènes, et dans sa totale dépendance en regard de la notion même d'urbanisation.

L'analyse des espaces urbains et périurbains requiert une échelle de travail supérieure à toutes celles sollicitées par les autres applications de la télédétection. Longtemps, la photographie aérienne, seule, s'est avérée capable de répondre, au moins partiellement, à ses aspirations. Il a fallu attendre les capteurs des satellites de seconde génération pour que la télédétection satellitaire, accédant à une résolution décimétrique, s'imisce timidement parmi les outils d'analyse du milieu urbain. La télédétection urbaine est donc subordonnée à la qualité de la résolution géométrique. Aussi, ses utilisateurs sont-ils contraints d'examiner et d'incorporer toutes innovations techniques (nouveaux capteurs numériques et nouvelles photographies satellitaires) et méthodologique (évaluation précise des résolutions effectives, intégration d'images à résolutions multiples, recours aux photographies aériennes numérisées, etc.), susceptibles d'améliorer les capacités d'analyse de la ville par télédétection.

La ville, et l'espace urbanisé d'une manière générale, sont le produit de l'action de l'Homme. Or, il est notoire que la télédétection ne rend compte que de certains caractères physiques et morphologiques, bien incapables de résoudre, seuls, la complexité urbaine. L'apport de données exogènes, les plus diverses, s'avère dès lors indispensable à l'analyse :

données humaines, bien sûr (démographiques, sociales, économiques ou juridiques), mais aussi données physiques (topo-climatologiques, géomorphologiques, pédologiques, etc.) dès que les conflits sur l'espace, entre la ville et son environnement naturel, doivent être analysés et solutionnés. Au problème de disponibilité, souvent précaire, s'ajoute la difficulté de combiner, de rendre compatibles et cohérents des ensembles de données que tout semble séparer, des unités de mesure aux modes de distribution spatiale.

Mais l'un des défis les plus importants auxquels la télédétection urbaine doit faire face est de définir précisément l'objet de son analyse : la ville, l'espace urbanisé, l'urbanisation. Urbanistes, géographes, architectes, démographes ou historiens définissent autant de terrains d'action et identifient des enjeux multiples, et parfois contradictoires : ici la préservation du plan et de la forme; là, le développement des fonctions; ailleurs, la maîtrise de la croissance, etc. La télédétection peut-elle être amenée à participer à toutes ces démarches, avec quelles chances de succès et à quel niveau de qualité ?

On le constate, les domaines de préoccupations propres à la télédétection urbaine ne manquent pas. Les cercles scientifiques, la littérature spécialisée et les agences publiques, nationales et internationales, ont pris conscience du potentiel de la télédétection urbaine, ce qui s'est traduit en peu de temps par une multiplication de colloques, d'articles, de livres et de programmes de recherche appliquée. Il était donc pertinent, sinon urgent, d'évaluer l'implication du monde scientifique francophone dans ce courant de recherches, ce à quoi se sont efforcées de répondre ces Sixièmes Journées scientifiques du Réseau Télédétection de l'AUPELF-UREF.

2. Compte rendu des séances

Trois domaines d'application ont été privilégiés durant ces journées, à savoir : les techniques spéciales de la télédétection urbaine, les rapports de cette dernière avec l'urbanisme et la planification, sous des aspects tant physiques que sociaux et économiques et, enfin, la cartographie urbaine. Comme de coutume, la réunion a favorisé la multiplicité des expériences, présentées sous forme de conférences et d'affiches, et émanant d'un grand nombre de pays de la communauté francophone, du Nord, comme du Sud.

Les sessions relatives aux techniques spéciales ont montré que la télédétection urbaine pouvait tirer profit de méthodes d'analyse confirmées d'autre part, mais adaptées au milieu urbain. Les multiples exploitations des indices de végétation en constituent un bel exemple. Parallèlement, le recours à la numérisation par scanner rend aux photographies aériennes un rôle de premier plan en télédétection, soit à titre supplétif, soit intégrées à d'autres images, soit encore en tant que simulation de capteurs futurs à haute résolution. Comme on l'a signalé, la recherche d'une résolution géométrique optimale reste une constante en télédétection urbaine et elle a été soulignée à plus d'une reprise. On a constaté également l'utilisation de méthodes statistiques, sans doute familières, mais dont l'introduction en télédétection constitue une originalité. C'est le cas, par exemple, du modèle de potentiel et de l'analyse de correspondance. Enfin, la présentation de techniques nouvelles de diffusion et de distribution des données de télédétection urbaine, notamment par le réseau Internet, est venue compléter cette première catégorie d'exposés. Sans rien retirer de l'intérêt des communications présentées, il faut néanmoins remarquer l'absence de certains thèmes majeurs dont, pourtant, la littérature et d'autres colloques se sont fait récemment l'écho. C'est en particulier le cas de certaines méthodes de classification, telles que les méthodes bayésiennes, ou de l'usage de l'intelligence artificielle et de systèmes à base de connaissances.

Conclusions

Pour des raisons indépendantes des auteurs et des organisateurs, il a fallu déplorer l'absence de la délégation algérienne. Si ce regret est exprimé ici, c'est qu'une part essentielle des communications pressenties concernait, précisément, les techniques spéciales de télédétection urbaine : intégration de données optiques et radar, analyse de texture, segmentation, etc. Pour rendre justice à nos collègues algériens, et pour faire profiter le lecteur de l'originalité de ces méthodes, non discutées par ailleurs, le Comité de Réseau a souhaité faire figurer les textes de ces communications dans les pages de ces actes. Il reste, pourtant, que les participants aux journées ont manqué là, l'occasion d'une intéressante discussion méthodologique.

Comme on pouvait s'y attendre, les sessions consacrées aux applications de la télédétection à l'urbanisme et à la planification ont brillé par la diversité des thèmes abordés, tant sous forme de conférences, que sous forme d'affiches. La récurrence du thème de la délimitation des agglomérations urbaines par télédétection témoigne de son actualité et du degré opérationnel atteint, tantôt sur une base purement morphologique, tantôt en intégrant les données de recensement de population. Son importance a encore été soulignée lors de la présentation du vaste programme mené en la matière par l'agence de statistique européenne EUROSTAT. Dans le même ordre d'idées, on doit mentionner les approches originales menées dans les pays du Sud. L'identification des quartiers, la constitution de bases de sondage démographique, la mesure de la croissance urbaine sont autant de thèmes relevant sans doute de la même problématique, mais les discussions engagées sur ces thèmes font apparaître clairement des différences de concepts, sur lesquelles il y a lieu de s'interroger. De manière plus inattendue, mais particulièrement bienvenue, un certain nombre de communications ont abordé des aspects de planification physique liés, de près ou de loin, aux espaces urbains. La prise en compte de l'environnement naturel, y compris la géologie, dans les démarches de planification urbaine a ainsi été illustrée, mais le potentiel de la télédétection a aussi été démontré dans l'étude de la pollution atmosphérique des sites urbains. Pourtant, quelle que soit la diversité des thèmes discutés à l'occasion de ces sessions, on doit constater, ici encore, l'absence de préoccupations jugées par certains comme déterminantes pour l'avenir de la télédétection urbaine : les aspects normatifs et légaux de l'urbanisme, la standardisation des nomenclatures ou la modélisation des informations issues du traitement des images, en sont quelques exemples.

Le troisième domaine retenu pour ces journées était dédié à la cartographie urbaine. Par nature, le thème est hétérogène, puisqu'il incorpore des aspects strictement méthodologiques propres à la spatio-cartographie, à côté de considérations thématiques relevant de l'urbanisme et de la planification. En outre, c'est un thème qui s'exprime plus aisément par la voie d'affiches, au détriment parfois d'une discussion générale. Du point de vue méthodologique, on retiendra tout particulièrement les communications relatives à la fusion d'images à résolutions multiples pour la préparation de cartes satellitaires. La problématique de la mise à jour des cartes et de l'extraction d'informations cartographiques a également été débattue, en relation avec les notions d'échelle et de résolution. Cette discussion a d'ailleurs trouvé un prolongement intéressant dans l'exposé des bases de données géographiques à l'usage de cartes topographiques, établies par l'Institut géographique national belge. Quant à son exploitation thématique, la cartographie urbaine est essentiellement mise à contribution pour l'analyse diachronique, l'évaluation de la pression urbaine sur le milieu environnant et l'analyse de la croissance des agglomérations. Si les sessions ont été illustrées par un grand nombre de réalisations concrètes, sous forme de cartes et d'affiches, on remarque l'absence de toute référence à des thèmes tels que la réalisation d'orthophotocartes, l'extraction de réseaux ou la reconnaissance de formes. Il s'agit pourtant là, de sujets complémentaires aux questions abordées et impliquant une forte valeur ajoutée sur le plan méthodologique.

3. Les rapports Nord – Sud

La qualité et le nombre d'exposés et d'affiches, et le nombre de participants, plus de 130, ont confirmé l'opportunité du thème choisi pour ces sixièmes journées. On peut en déduire que les applications urbaines constituent l'un des axes de recherche privilégiés de la télédétection en communauté francophone. Malgré la relative jeunesse de la discipline, dix ans à peine, et les contraintes techniques et méthodologiques de son application, il faut souligner l'excellente répartition géographique des expériences illustrées. Pour chacun des thèmes abordés, des interventions significatives sont venues, tant des pays les plus développés, que des pays les plus défavorisés. On a pu constater, de part et d'autre, une bonne disponibilité des moyens techniques et, dans la plupart des cas, une bonne maîtrise des méthodologies mises en œuvre. Certes, la diffusion des outils de traitement d'image et de cartographie numérique se trouve favorisée par la banalisation de la micro-informatique. Il n'en reste pas moins que le succès de l'introduction de techniques et méthodes sophistiquées auprès d'un aussi grand nombre d'équipes, revient pour une bonne part à l'action du Réseau Télédétection de l'AUPELF-UREF, qui a toujours œuvré pour un transfert des technologies dans un constant souci de collaboration. La chose s'est encore confirmée à l'occasion de ces journées, où les communications présentées par des équipes mixtes, incorporant des laboratoires du Nord et du Sud, étaient nombreuses et d'une grande valeur scientifique.

Une chose en amenant une autre, on ne peut pas s'empêcher de souligner, sinon une contradiction, au moins une certaine dissension entre les approches de la télédétection urbaine au Nord et au Sud. Si les chercheurs utilisent le même matériel et les mêmes logiciels, il est clair qu'il existe des différences sur les concepts véhiculés, au Nord et au Sud, dans les analyses de l'espace urbain et périurbain. Est-on sûr que le chercheur, du Nord ou du Sud, imagine des réalités semblables lorsqu'il s'attache à étudier la ville ou le quartier, ou qu'il utilise les notions de logement ou de ménage ? Les villes, les administrations, les chercheurs du Sud, peuvent-ils envisager les moyens adéquats requis pour la mise en œuvre d'une opération de planification urbaine ? *A contrario*, les agences publiques, les consultants et les chercheurs du Nord, savent-ils encore ce que signifie les notions de dynamique et de croissance urbaines ? Existe-t-il une philosophie de l'urbanisme propre aux pays du Nord, et une autre, propre aux pays du Sud ? Ces questions sont largement débattues par les urbanistes et les aménageurs œuvrant dans le cadre de la coopération au développement. Il ne faudrait pas qu'aveuglés par la magie de l'outil, informatique et satellitaire, les utilisateurs de la télédétection du Nord et du Sud ignorent ce débat.

4. En guise d'évaluation finale

Le participant à ces journées et le lecteur attentif de ces actes se seront rapidement forgé une opinion sur le potentiel de la télédétection urbaine. Point de rencontre privilégié de technologies de pointe, de sciences pures et de sciences humaines, la télédétection urbaine force le dialogue, élargit et enrichit le débat. La diversité et la signification des sujets évoqués dans ces actes le démontrent indubitablement. Cela suffit amplement à justifier l'organisation de ces journées, mais, aussi, cela invite les membres du Réseau Télédétection de l'AUPELF-UREF à rester attentifs à l'évolution de cette discipline. C'est que tout n'a pas été dit, loin de là. Les nombreux points d'interrogation émaillant ce bref rapport de conclusion, laissent pendantes au moins deux questions, relevant de considérations distinctes. -

Conclusions

D'une part, on s'est étonné de l'absence aux journées de Liège de thèmes de recherches actuellement débattus par la communauté scientifique internationale. Comment faut-il traduire un telle absence ? De tels sujets de pointe sont-ils ignorés par la communauté francophone ? Il suffit de relever la nationalité des auteurs, publiant en langue anglaise, pour se convaincre du contraire. Les chercheurs francophones qualifiés pour débattre de ces thèmes sont-ils étrangers au Réseau Télédéttection de l'AUPELF-UREF ? On prétend que tous ont reçu l'information et qu'ils ont eu ainsi l'opportunité de participer aux journées scientifiques. Alors, il reste à convaincre une plus grande partie de la communauté scientifique de l'intérêt de diffuser l'information en langue française. Cela ne concerne pas tant les chercheurs eux-mêmes, que les comités, les fonds et autres autorités qui fixent les critères de qualité des curriculums scientifiques.

D'autre part, on s'est interrogé sur les différences de concepts couverts par les termes de villes, agglomérations, urbanisation, etc., entre le Nord et le Sud. Il est clair, qu'au-delà de la différence de concepts, il existe une différence d'enjeux considérables. Dès lors, ne faut-il pas envisager une approche de la télé-déttection urbaine distincte au Nord et au Sud ? Ne faut-il pas développer des méthodes d'analyse spécifiques ? La notion de transfert de technologies doit dépasser la fourniture de matériel et de logiciels et l'apprentissage de méthodologies de portée géographique restreinte. Cette perplexité interpelle toutes les formes de coopération entre le Nord et le Sud, et tout particulièrement les programmes de recherche communs élaborés par le Réseau Télédéttection de l'AUPELF-UREF.

Que l'on ne s'y trompe pas. Ces doutes ou ces remises en question sont à mettre à l'actif des Sixièmes Journées scientifiques du Réseau. Ainsi, outre le fait d'avoir largement rassemblé, pour la première fois, les spécialistes francophones de la télé-déttection urbaine et d'avoir assuré la diffusion de leurs connaissances, ces journées pourront-elles, peut-être, contribuer à l'amélioration de l'efficacité du Réseau et des échanges qu'il favorise.

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^e et 3^e 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 des milieux urbains et périurbains. Dans ce cadre, les données de télédétection représentent une source d'information importante. Les Sixièmes journées scientifiques du « Réseau Télédétection » de l'AUPELF-UREF ont permis de faire le point sur la télédétection des milieux urbains et périurbains. Techniques spéciales de télédétection urbaine, télédétection et urbanisme, statistiques urbaines, cartographie urbaine et actions de recherche partagée ... soit cinq rubriques et trente-cinq 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 : 50 \$ CAN • Prix préférentiel UREF : 25 \$ CAN



9 782920 021747 ISBN 2-920021-74-5