

Suivi des zones d'inondation du delta intérieur du Niger

Perspectives avec les données
de basse résolution NOAA/AVHRR

Adama Mariko
Physicien

Gil Mahé
Hydrologue

Didier Orange
Hydrologue

Antoine Royer
Télé-détecteur

André Nonguierma
Télé-détecteur

Abou Amani
Hydrologue

Eric Servat
Hydrologue

L'utilisation des données satellitaires dans le suivi spatio-temporel de l'inondation prend une place de plus en plus importante dans beaucoup d'applications, notamment dans le domaine de la gestion des ressources naturelles. La variabilité de l'extension des zones inondées dans les plaines du delta intérieur du Niger joue un rôle essentiel dans la fluctuation des niveaux de productivité des ressources halieutiques, des pâturages et des cultures (Poncet et Orange, 1999). Un besoin réel d'optimisation de la gestion des ressources en eau pour ces différents secteurs d'activités de

l'agriculture, de l'élevage et de la pêche, qui conditionnent prioritairement le développement économique de la région, s'impose. Dans ce but, la caractérisation de l'inondation dans le delta est nécessaire en vue de la réalisation de cartes thématiques pour une aide à la gestion. Cette étude, menée à partir des données satellitaires NOAA/AVHRR acquises quotidiennement par le centre Agrhymet de Niamey et distribuées aux pays du Cilss¹ de façon décadaire, est effectuée en vue de pouvoir identifier en routine la dynamique spatio-temporelle de l'inondation du delta intérieur du Niger (au Mali).

Les zones inondées du delta sont caractérisées par la présence de surfaces variables dépendant de la dynamique des apports hydriques (pluies et écoulements) : des surfaces en « eau libre » (c'est-à-dire sans végétation à la surface de l'eau) ou des surfaces à « végétation inondée » (la végétation émerge au-dessus de l'eau). Au-delà de ces zones inondées, on trouve des sols couverts de végétations à densité très variable ou des sols nus. La végétation est toujours essentiellement de type herbacé. Ces surfaces présentent des comportements assez différents dans les domaines spectraux solaires et thermiques. L'eau libre ou en mélange avec la végétation, contrairement aux autres objets d'observation, se caractérise par des comptes numériques faibles dans le thermique. Quant à la végétation et à son pouvoir plus réfléchissant dans le proche infrarouge que dans le visible, elle se distingue des sols nus qui présentent un effet relativement contraire dans les mêmes domaines spectraux. C'est à partir de l'étude du comportement spectral de chacun de ces objets dominants dans le delta que nous allons essayer de réaliser une discrimination des types de surfaces inondées à partir des données satellitaires NOAA/AVHRR.

L'identification de ces objets par un simple examen visuel des compositions cartographiques colorées passe par la construction d'indices à partir de la décomposition des signatures spectrales des différents objets géographiques observés (Jackson, 1983 ; Townshend et Justice, 1986 ; Tucker et Sellers 1986 ; Justice et Hiernaux, 1986). On peut donner comme exemple l'indice NDVI² dont l'utilisation est maintenant très répandue pour visualiser le

¹ « Comité inter-Etats de lutte contre la sécheresse au Sahel » : Burkina-Faso, Cap Vert Gambie, Guinée Bissau, Mali, Mauritanie, Niger, Sénégal, Tchad.

² "Normalised difference vegetation index" (Jackson, 1983).

couvert végétal : ce sont d'ailleurs les cartes NDVI qui sont envoyées par le centre Agrhymet de Niamey dans les différents pays du Cilss. Les études sur l'évolution des milieux sahéliens à partir des mesures satellitales (Courel, 1984 ; De Wispelafre et Peyre de Fabrègues, 1991 ; Houssa, 1996 ; Mariko, 1999) ont permis de faire un pas dans la connaissance de leurs comportements spectraux. Si les indices connus permettent de mettre en évidence la présence d'objets simples comme l'eau, la végétation, les sols nus, leur utilisation reste encore très limitée pour l'identification d'objets complexes comme la végétation inondée, qui occupe plus de 70 % de notre zone d'étude.

Après une étude comparative des indices existants, de nouveaux indices sont développés dans cette étude pour assurer une meilleure cartographie du suivi spatio-temporel des surfaces en eau libre, végétation inondée, sols exondés nus ou couverts du delta intérieur du Niger au Mali.

■ Le delta intérieur du Niger

Situé en zone sahélienne semi-aride, le delta intérieur du Niger est une vaste zone inondable d'environ 40 000 km² qui s'étire selon un axe SO-NE sur plus de 350 km, entre les parallèles 17° et 13° N, et les méridiens 2°30 et 6°30 O (figure I, hors texte). Il est parcouru par un réseau très dense et hiérarchisé de défluentés alimentés par le fleuve Niger et par son confluent le Bani qui le rejoint au droit de la ville de Mopti. La pluviométrie annuelle varie du sud au nord entre respectivement 600 et 300 mm par an (L'Hote et Mahé, 1996). Son inondation, chaque année entre juillet et décembre, est conditionnée essentiellement par les régimes hydrologiques du Niger et du Bani, avec plus de 90 % des apports en eau provenant des écoulements provenant de Guinée et du nord de la Côte d'Ivoire, et non par la pluviométrie locale (Mahé *et al.*, ce volume³). Le temps de propagation de l'onde de crue est très variable ; il est d'autant plus long que le maximum de crue est

³ Mahé G., Bamba F., Orange D., Fofana L., Kuper M., Marieu B., Soumaguel A., Cissé N., ce volume – « Dynamique hydrologique du delta intérieur du Niger (Mali) ». In : *partie 2*.

important (Olivry, 1995). Selon que les crues sont minimales ou maximales, le transfert de l'onde de crue d'une extrémité à l'autre du delta peut avoir une durée variant de 18 à 78 jours entre Ké-Macina et Diré. Les pertes en eau annuelles, dues essentiellement à l'évaporation, atteignent 47 % des entrées en période humide et seulement 32 % en période sèche, du fait de la réduction de la superficie inondée (Mahé *et al.*, sous-presse ; Orange *et al.*, ce volume⁴).

I Données et prétraitements

La disponibilité des images satellitales provenant du capteur AVHRR (*Advanced very high resolution radiometer*) du satellite NOAA₁₄ (*National oceanic and atmospheric administration*), en format brut à la station de réception d'Agrhymet de Niamey, offre l'opportunité d'un suivi de la dynamique d'inondation dans le delta intérieur du Niger au Mali. Quatre images prises en 1999 à différentes dates couvrant les grandes phases hydrologiques de l'inondation du delta ont été utilisées : le 22 février 1999 pour le début des basses-eaux, le 9 juin 1999 pour les très basses-eaux (période correspondant à la fin du cycle hydrologique précédent et au début des pluies), le 18 octobre 1999 pour le maximum d'inondation en zone amont du delta et le 1^{er} décembre 1999 pour le maximum d'inondation en zone aval du delta. De plus, les images ont été sélectionnées en fonction de la position relative du delta par rapport au nadir⁵ et de l'absence de nuages. La période d'étude couvre donc en partie les deux cycles hydrologiques 1998/99 et 1999/00, dans cette région le cycle hydrologique étant classiquement défini entre juin et mai de l'année suivante. Ces deux années correspondent à des crues moyennes, avec respectivement un débit annuel de 3 880 m³ s⁻¹ et 4 080 m³ s⁻¹ ; en 1999, le pic de crue a été atteint le 30 août 1999 avec 5 340 m³ s⁻¹.

⁴ Orange D., Mahé G., Dembélé L., Diakité C. H., Kuper M., Olivry J.-C., ce volume – « Hydrologie, agro-écologie et superficies d'inondation dans le delta intérieur du Niger ». In : *partie 2*.

⁵ Le nadir est la zone observée suivant la direction perpendiculaire au capteur.

La couverture nuageuse est souvent présente sur les images de la période correspondant à la montée des eaux du fleuve Niger (de juillet à septembre 1999) ; cela reste toujours un fort handicap au suivi de cette phase de l'inondation.

Chaque image brute, nommée "*local area coverage*", doit subir un pré-traitement qui consiste en une correction radiométrique sur les cinq canaux spectraux AVHRR (tableau 1) pour les calibrer en utilisant les coefficients de dérive des capteurs au cours du temps et une rectification géométrique de ces cinq canaux en plate carrée à partir d'une image de référence NOAA déjà géoréférencée. A la fin de ce processus de pré-traitement, on obtient alors neuf canaux correspondant aux 5 canaux précédents additionnés de 4 nouveaux pseudo-canaux créés :

- les canaux 1 et 2 en compte numérique ;
- les canaux thermiques 3, 4 et 5 en compte numérique pouvant être transformés en température ;
- le pseudo-canal 6 correspondant à l'indice de végétation (NDVI), calculé à partir des comptes numériques des canaux 1 et 2 ;
- le pseudo-canal 7 étant l'angle zénithal satellitaire ;
- le pseudo-canal 8 étant l'angle zénithal solaire ;
- le pseudo-canal 9 étant la valeur absolue de l'angle azimutal.

Dans cette première étude, nous nous sommes intéressés à la partie sud du delta intérieur du Niger, appelé delta amont et correspondant géographiquement à la partie du delta située en amont du lac Débo. La fenêtre d'extraction, indiquée en figure III (hors texte), est constituée de 146 x 217 pixels d'environ 1 km de résolution, soit une superficie de 31 682 km².

■ Tableau 1
Caractéristiques des canaux spectraux AVHRR
du satellite NOAA₁₄.

Domaine spectral	Canal spectral AVHRR	Dénomination	Sources de radiation	Propriétés de surface
visible (VIS)	Canal 1 : 0,58 – 0,68 μm	B1	Solaire	réflectance
proche infrarouge (PIR)	Canal 2 : 0,725 – 1,1 μm	B2	Solaire	réflectance
moyen infrarouge (MIR)	Canal 3 : 3,55 – 3,93 μm	B3	Solaire, thermique	réflectance, température
thermique infrarouge (TIR)	Canal 4 : 10,3 – 11,3 μm Canal 5 : 11,5 – 12,5 μm	B4 B5	Thermique	température

I Discrimination des zones inondées

Etude comparative des indices

De nombreuses méthodes de délimitation des surfaces en eau libre sur les images satellitales existent dans les différents domaines réflectifs, thermiques et micro-ondes actives. Pour mémoire, on peut citer : l'analyse visuelle couplée à l'analyse spectrale en milieu sahélien (Thiam et Ovtracht, 1998), la méthode de seuillage appliquée à l'histogramme (McFeeters, 1996 ; Verdelt, 1996) et le rapport des canaux (Rigal, 1989 ; Wald, 1990 ; McFeeters, 1996). Par ailleurs, les méthodes d'ajustement spectral et de modélisation des pixels mixtes (Bajjouk *et al.*, 1998 ; Drake *et al.*, 1999) offrent de nouvelles possibilités de délimitation d'entités géographiques en milieux inondés. Enfin, d'autres règles de discrimination, basées sur de simples expressions logiques (Richard et Jia, 1999), ont également été utilisées pour la cartographie. Toutes ces méthodes s'appuient sur l'analyse des signatures spectrales des objets, signatures liées à la nature des objets observés et aux caractéristiques des capteurs satellitales utilisés. Ces dernières dépendent de plusieurs facteurs tels que la résolution spatiale et le domaine spectral.

Dans le cas de notre étude sur le delta intérieur du Niger, la difficulté va résulter en la distinction entre les surfaces d'eau libre, les surfaces de végétation sur sols secs et les surfaces de végétation sur eaux. En vue de parvenir à une discrimination satisfaisante, quelques indices rencontrés dans la littérature sont testés et confrontés à des indices que nous avons construits sur la base des caractéristiques de la signature spectrale des objets que nous désirons distinguer. Les indices sélectionnés sont présentés en tableau 2.

Sur les images de juin et décembre, les indices retenus sont appliqués en vue de tester leurs possibilités et limites dans l'identification des différents paysages du delta pour deux périodes extrêmes du cycle hydrologique annuel du fleuve Niger. Afin de suivre la dynamique spatio-temporelle de l'inondation du delta et la mise en place de son couvert végétal, nous recherchons à discriminer : les zones d'eau libre, les zones d'eau recouvertes par la végétation, les zones de végétation sur sols secs et les zones de

sols sans végétation (classiquement appelés sols nus). Sur les images en niveaux de gris, dans la zone habituellement exondée, la distinction entre sols couverts et sols nus se fait difficilement ; nous les avons donc groupés ici sous le terme de sols exondés. Le tableau 3 donne la caractérisation des spectres en niveaux de gris et en valeur positive ou négative du compte numérique par rapport à la moyenne le long d'un profil ouest-est, noté A-B en figure II (hors texte), ce qui permet d'avoir une description qualitative du comportement spectral des objets géographiques observés en fonction du temps et selon les indices choisis. Les images en niveaux de gris et les signatures spectrales correspondantes sur le profil A-B sont données en figure II (hors texte).

Tableau 2

Formules des indices multispectraux :

NDVI : Normalized difference vegetation index ;

GREEN : canal vert ; RED : canal rouge ;

NDWI : Normalized difference water index ;

NIR : Near infrared ; J : indice de présence de l'eau ;

R_c : rapport de canaux ; IB_T : indice de brillance dans le thermique.

Indice	Type	Référence	Formulation retenue
$\text{NDVI} = \frac{(\text{NIR} - \text{RED})}{(\text{NIR} + \text{RED})}$	AVHRR	Rigal, 1989	$\text{NDVI} = (B2 - B1) / (B2 + B1)$
	AVIRIS	Bo-Cai, 1996	
	TM	Dale <i>et al.</i> , 1997	
$\text{NDWI} = \frac{(\text{GREEN} - \text{NIR})}{(\text{GREEN} + \text{NIR})}$	LANDSAT	McFeeters, 1996	$\text{NDWI} = (B2 - B1) / (B2 + B1)$
	MSS		
$J = \frac{(\text{IR} - \text{PIR})}{(\text{IR} + \text{PIR})}$	AVHRR	Rigal, 1989	$J = (B5 - B2) / (B5 + B2)$
R _c	AVHRR	cette étude	R _c = B4 / B2
IB _T	AVHRR	cette étude	$\text{IB}_T = \sqrt{[(B3^2 + B4^2 + B5^2) / 3]}$

L'indice NDVI obtenu à partir de la différence des canaux du visible B1 et B2 normalisée par leur somme (tableau 2) est un bon indicateur de la végétation. Cela tient au comportement spectral très contrasté de la végétation pour cette combinaison spectrale : la présence du couvert végétal se traduit par de fortes valeurs du NDVI largement supérieure à la moyenne (de l'ordre de 120 en compte numérique sur le profil A-B) (figure II, hors texte). Le couvert végétal apparaît dans la zone inondée de façon remarquable en couleur blanche sur les niveaux de gris. Ce blanc

est d'autant plus marqué que la végétation est dense. La zone exondée apparaît en décembre en gris blanc grâce à son taux de couverture végétale faible au niveau du pixel (de 1 km de côté). Les poches blanches au mois de juin seraient liées à la végétation précoce couplée à la présence des nuages sur l'image.

Les indices NDWI et J sont construits selon le même principe, à partir d'une différence normalisée entre respectivement les canaux B1 et B2, B5 et B2 (tableau 2). Ils présentent tous deux des comptes numériques plus élevés pour l'eau libre : le premier peut atteindre 0,3 et le second dépasse généralement 0,85 (figure II, hors texte). Notons qu'une faible température de surface correspond à un compte numérique faible dans le canal B5 ; par contre, l'absorption plus forte dans le proche infrarouge que dans le visible induit un compte numérique plus bas dans le canal B2 que dans le canal B1, d'où une valeur de l'indice J supérieure à celle du NDWI et des contrastes plus forts entre eaux libres et sols couverts de végétation (tableau 3). L'indice R_c présente l'avantage d'avoir de fortes amplitudes pouvant atteindre la valeur 20 au passage de l'eau libre (figure II, hors texte). Quant à l'indice de brillance dans le thermique, IB_T , les sols couverts ou nus se caractérisent par un compte numérique supérieur à 200 et les surfaces inondées (eau libre et végétation inondée) ont un compte numérique de l'ordre de 190 ; cette caractéristique fait de cet indice un bon indicateur des surfaces mouillées.

Sur les images en niveaux de gris (figure II, hors texte), le NDWI apparaît comme un bon indicateur des eaux libres (couleur blanche) le long des axes majeurs et des lacs Débo et Wallado, tant en période de basses-eaux que de hautes-eaux. Le R_c et le J présentent en période de hautes-eaux des résultats semblables avec un meilleur contraste de l'interface « eau libre / sol exondé » sur le plan spectral. En période de basses-eaux, le contraste entre la plaine d'inondation et les anciens sols exondés reste bien marqué sans qu'il soit possible d'établir de façon précise au sein de la plaine d'inondation l'interface « sol couvert / sol nu », l'ensemble étant blanchâtre. Enfin l'indice IB_T se révèle être un très bon indicateur de la présence d'eau apparaissant en noir. Cependant, la confusion « eau libre / végétation inondée », voire sols humides, au mois de décembre paraît totale ; au niveau spectral, cet ensemble apparaît sous forme d'anomalie négative avec un fond plat ponctué de quelques remontées qui correspondent à des zones exondées d'extension limitée.

Par conséquent, les indices testés mettent en évidence de façon plus ou moins nette les différents objets pris isolément. Mais aucun ne permet de se prononcer sur la présence de l'objet complexe : végétation inondée. Son identification nécessitant l'apport de plusieurs indices à la fois est examinée dans le paragraphe suivant à partir d'une analyse de compositions colorées.

Tableau 3

Etude comparative des indices testés en niveaux de gris (NG) et en compte numérique (CN) de la réponse spectrale entre une image d'inondation minimale (juin 1999, fin de saison sèche) et une image d'inondation maximale (décembre 1999, fin de la période de hautes eaux).

NG : niveaux de gris (b : blanc ; n : noir ; g : gris ; gn : gris à noir ; nm : niveau moyen) ;

CN : niveaux du compte numérique par rapport à la moyenne (+ : supérieur ; - : inférieur).

Objets	9 juin 1999								1 ^{er} décembre 1999					
	Plaine d'inondation						Sols exondés		Plaine d'inondation				Sols exondés	
	Eau libre		Sols couverts		Sols nus				Eau libre		Végétation inondée			
Indices	NG	CN	NG	CN	NG	CN	NG	CN	NG	CN	NG	CN	NG	CN
NDVI	n	-	b	+	G	-	g et b	- et +	n	-	b	+	gb	nm
NDWI	b	+	n	-	B	+	g	+	b	+	n	-	gb	nm
J	b	+	b	+	B	+	Gn-gb	-	b	+	gn	-	g	-
R _c	b	+	b	+	B	+	Gn-gb	-	b	+	gn	-	gn	-
IB _T	n	-	gb	+	Gb	+	g	+	n	-	n	-	gb	+

Analyse de la composition colorée

Les indicateurs qui nous ont semblé les plus pertinents, eu égard aux objectifs fixés, sont IB_T, NDVI et R_c. Ils ont servi à l'élaboration de l'image en composition colorée : cette image couvre toute la zone du delta intérieur du Niger (de Ségou à Tombouctou) (figure III, hors texte), à la différence des images présentées précédemment en niveaux de gris qui ne couvraient que le delta amont correspondant à la plaine d'inondation proprement dite du delta (comme indiqué par la fenêtre d'extraction en figure III, hors texte).

L'indice de brillance (IB_T), très bon indicateur de la présence de l'eau (par ses faibles valeurs) et des sols secs (par ses fortes valeurs), est affecté au rouge. L'indice de végétation (NDVI), naturellement affecté au vert, est l'indice le mieux indiqué pour le suivi du couvert végétal aussi bien sur les surfaces inondées qu'exondées. L'indice R_c , comme montré ci-avant, présente une meilleure discrimination de l'interface « eau libre / sol » que le NDWI, avec un rapport qui varie généralement du simple au double d'où le choix de cet indice R_c ; il est affecté au bleu et représente l'eau libre.

A partir de cette composition colorée, les objets géographiques alors identifiables dans le delta sont :

- *eau libre* : elle apparaît en bleu foncé au nord et permet de distinguer les bras du fleuve divaguant entre les cordons dunaires, les plaines ou prairies d'inondation et les lacs périphériques très importants pour la régulation hydrologique du delta (Orange *et al.*, ce volume) ; sur la partie amont du delta, l'eau libre est visible sur les parties limitrophes des zones de végétation, et correspond probablement aux zones nouvellement conquises par les eaux ; l'absence de la coloration bleue au niveau du Bani serait liée à la faiblesse de la largeur du cours d'eau par rapport à la résolution du capteur NOAA/AVHRR ;

- *végétation inondée* : elle se reconnaît facilement par sa couleur vert olive tendant vers le cyan dans la partie nord ; cette variation de couleur dans la partie septentrionale du delta amont est probablement liée à l'importance des poches d'eau libre au milieu de la végétation inondée et/ou à l'importance des hauteurs d'eau pouvant atteindre quatre mètres, voire plus, dans cette zone contre quelques dizaines de centimètres vers le sud ;

- *sols couverts* : ils prennent une coloration jaune vers le nord ; il s'agit essentiellement de formations herbeuses ponctuées d'arbustes épineux, peu développées, sur des sols dunaires ; vers le sud, la coloration de plus en plus verte témoigne de l'abondance de la végétation à cette époque (décembre 1999) ;

- *sols nus* : rougeâtres à oranges, ils n'apparaissent dans le delta que sur une petite bande exondée d'extension Nord-Sud le long du mayo Dembé, un défluent du Niger dans l'axe Mopti-Youwarou ; ce sont des formations alluvionnaires le long des berges, des bourrelets de berges et des levées ; dans la partie septentrionale de la zone, les sols sont d'anciennes dunes de sables fixes ou récentes de direction nord-est.

Evolution du front d'inondation

Pour décrire l'évolution du front d'inondation, une séquence de quatre images colorées a été réalisée sur la même fenêtre d'extraction que les précédentes images en niveaux de gris. Cette séquence représente les 4 grandes phases du cycle hydrologique (figure IV, hors texte). L'image de février, prise presque à la fin du cycle hydrologique 1998/99 (allant de juin à mai), correspond à une phase de vidange intensive de la plaine d'inondation. Puis les trois autres images – juin, octobre et décembre – visualisent respectivement les phases d'assèchement, de montée des eaux et d'inondation maximale de la crue.

Le fleuve Niger est la principale source d'approvisionnement en eau du delta, la pluie n'apportant que 5 à 10 % du volume d'eau (Mahé *et al.*, ce volume). Aussi la mise en place de la végétation et des zones d'eaux libres matérialisent le temps de propagation de l'onde de crue dans le delta. Selon l'hydraulicité de l'année, la crue met 2 à 6 jours pour parcourir le tronçon Koulikoro-Ké-Macina à l'entrée du delta. A l'intérieur du delta, le temps de transfert de la crue entre les stations est assez variable (Picouet, 1999). Entre Ké-Macina et Mopti⁶, ce temps varie de 3 à 19 jours, le tronçon Mopti-Aka (à la sortie du lac Débo) nécessite 15 à 35 jours. Dans la partie amont, l'onde de crue met 2 à 14 jours entre Aka et Diré. Ces durées sont dépassées en année plus humide. De l'entrée du delta (Ké-Macina) à sa sortie (Diré), le temps de transfert varie, selon les estimations, de 18 à 78 jours pour Olivry (1995) ou de 30 à 73 jours pour Picouet (1999).

A partir d'une interprétation visuelle des images en composition colorée et de l'analyse des comportements spectraux le long du profil A-B, nous pouvons suivre l'évolution spatio-temporelle des différents objets précédemment décrits (figure IV, hors texte). Sur toutes les images, on note une pérennité des eaux (en bleu foncé) dans les lacs Débo, Wallado et Korientzé. Ailleurs, les eaux se font rares au mois de février à l'exclusion des lits du fleuve, de ses principaux défluent et très probablement des dépressions les plus profondes. Au mois de juin, toutes ces dépressions semblent se

⁶ Comprendre Mopti au niveau de la station hydrologique de Nantaka, 2 km à l'aval de Mopti.

vider totalement, le comportement de l'indice de brillance, devenu plat, semble en constituer un témoignage évident. Au mois d'octobre, l'eau s'installe de façon significative pour atteindre son niveau maximal en décembre visualisé par un débordement important au nord du delta amont sur le bord haut de l'image. L'allure du spectre IB_T en « fond de bateau » dominée par des valeurs faibles dénote l'extension de l'eau sous le couvert végétal.

Quant à la végétation essentiellement herbacée (en niveaux de vert à rouge), elle commence à se dégrader au mois de février suite au stress, à la sénescence et surtout au retour du cheptel (1 200 000 bovins, 3 730 000 ovins et caprins en 1992 ; MDRE, 2000). En juin, le couvert végétal disparaît ainsi en grande partie en laissant un sol alluvionnaire nu (marqué par un profil NDVI plat) à la coloration rougeâtre à jaune rosâtre sur les sols exondés du nord (indiquant une présence légère de végétation) et à la coloration violette dans la plaine d'inondation indiquant cette fois une présence probable d'humidité dans le sol. Au sud de la même image, les sols exondés paraissent verdoyants suite à l'effet combiné de la pluie, relativement précoce au sud, et de la présence de nuages perturbant le signal acquis. En octobre et décembre, la végétation reste abondante tant en milieux inondés qu'exondés.

Cette lecture fonctionnelle de l'évolution des couleurs des images d'une période à l'autre montre que le comportement au niveau du pixel de la signature spectrale des objets eau libre (bleu), végétation (vert), sol exondé nu (rougeâtre à jaune rosâtre) et sol devenu nu de la plaine d'inondation (violet), établie en fonction des pseudo-canaux IB_T , NDVI et R_c , concorde avec l'évolution du front d'inondation observé sur le terrain.

Conclusion

Les indices développés à partir des données multispectrales basse résolution NOAA/AVHRR permettent donc de discriminer les différents objets géographiques composant le paysage de zones inondables et inondées, du type eau libre / végétation inondée / sol exondé couvert ou nu. L'association proposée ici présente l'avantage de pouvoir déterminer la présence de l'eau sous un

couvert herbacé dense en zone humide sahélienne, ce qui constitue un intérêt majeur. La composition colorée doit être élaborée à partir des pseudo-canaux suivants : l'indice de brillance dans le domaine thermique (IB_T) pour marquer le niveau d'humidité des sols, le NDVI bien connu pour sa mise en évidence du couvert végétal et le rapport R_c du canal 4 (dans le thermique) sur le canal 2 (dans le visible) pour visualiser l'eau libre. La combinaison de ces trois indices apparaît être un outil performant de cartographie pour le suivi de la dynamique spatio-temporelle de l'inondation dans le delta intérieur du Niger à l'échelle kilométrique, à partir des données NOAA. Ces résultats sont actuellement utilisés pour l'inventaire et la caractérisation de la dynamique saisonnière des ressources en eau de surface du delta intérieur du Niger au Mali.

Bibliographie

- Bajjouk T., Populus J., Guillaumont B., 1998 – Quantification of subpixel cover fractions using principal component analysis and a linear programming method: application to the coastal zone of Roscoff (France). *Remote Sensing of Env.*, 64 (2) : 153-165.
- Bo-Cai G., 1996 – NDWI, a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 53 (3) : 257-266.
- Courel M. F., 1984 – *Etude de l'évolution récente des milieux sahéliens à partir des mesures fournies par les satellites*. Thèse doct., univ. Paris-I, 407 p.
- Dale A. Q., Nina S.-N. L., Hong-lie Q., Wei Z., 1997 – Image characterisation and modeling system (ICAMS): a geographic information system for the characterisation and modeling of multiscale remote sensing data. *Scale in Remote Sensing and GIS* : 295-308.
- De Wispelafre G., Peyre de Fabrègues B., 1991 – *Evaluation et suivi des ressources par télédétection spatiale dans la région du sud-Tamesna. Etude thématique*. Rapport final (volume 1), IEMVT, ministère de la Coopération et du Développement, Paris, 93 p.
- Drake N. A., Mackin S., Settle J. J., 1999 – Mapping vegetation, soils and geology in semiarid shrublands using spectral matching and mixture modeling of SWIR AVIRIS imagery. *Remote Sensing of Environment*, 68 (1) : 12-25.
- Houssa R., 1996 – *Étude radiométrique des sols d'une zone sahélienne (programme Hapex-Sahel). Analyse multi-échelle : du laboratoire au satellite*. Thèse doct., univ. Strasbourg, 253 p.
- Jackson R. D., 1983 – Spectral index in N-space. *Remote Sensing of Environment*, 5 (5) : 999-1021.

- Justice C. O., Hiemaux P., 1986 – Monitoring the grasslands of the Sahel using NOAA AVHRRR data: Niger 1983. *Int. J. of Remote Sensing*, 7 (11) : 1475-1497.
- L'Hôte Y., Mahé G., 1996 – *Précipitations moyennes annuelles en Afrique de l'Ouest et centrale (période 1951-1989)*. Paris, Orstom, carte Orstom, échelle 1/6 000 000^e.
- McFeeters S. K., 1996 – The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *Int. J. of Remote Sensing*, 17 : 1425-1432.
- Mahé G., Bamba F., Soumaguel A., Orange D., Olivry J.-C., sous-presse – Water losses in the Niger river inner delta: water balance and flooded surfaces. *Hydrological Processes J.*
- Mariko A., 1999 – *Suivi des ressources pastorales du Niger avec des données spatiales basse résolution Vegetation/SPOT4 : influence du milieu et de la pluviométrie (saison des pluies 1998)*. Mémoire DESS Télédétection-Imagerie numérique, univ. Toulouse, 33 p.
- MDRE, 2000 – *Archives agricoles de la Direction régionale de l'appui au monde rural de Mopti*. Bamako, ministère du Développement rural et de l'Eau.
- Olivry J.-C., 1995 – « Fonctionnement hydrologique de la cuvette lacustre du Niger et essai de modélisation de l'inondation du Delta intérieur ». In Olivry J.-C., Boulègue J. (éd.) : *Grands bassins fluviaux périatlantiques : Congo, Niger, Amazone*, Paris, IRD, coll. Colloques et séminaires : 267-280.
- Picouet C., 1999 – *Géodynamique d'un hydrosystème tropical peu anthropisé : le bassin supérieur du Niger et de son delta intérieur*. Thèse doct. Sciences, univ. Montpellier-II, 454 p.
- Poncet Y., Orange D., 1999 – L'eau, moteur de ressources partagées : l'exemple du delta intérieur du Niger au Mali. *Aménagement et Nature*, 132 : 97-108.
- Richard J. A., Jia X., 1999 – *Remote sensing digital image analysis*. New York, Springer, 363 p.
- Rigal D., 1989 – Crue et décrue au lac Tchad : essai de suivi à partir des images NOAA, novembre 1988-avril 1989. *Veille Climatique Satellitaire*, 28 : 71-76.
- Thiam S., Ovtracht N., 1998 – Suivi des écosystèmes du delta intérieur du Niger à partir des données SPOT (région de Mopti, Mali). *Photo-Interpretation*, 1998 (2-3).
- Townshend J. R., Justice C. O., 1986 – Analysis of the dynamics of African vegetation using the normalized difference vegetation index. *Int. J. of Remote Sensing*, 7 (11) : 1435-1445.
- Tucker C. J., Sellers P. C., 1986 – Satellite remote sensing of primary production. *Int. J. of Remote Sensing*, 7 (11) : 1395-1416.
- Verdelta J. P., 1996 – Remote sensing of ephemeral water bodies in western Niger. *Int. J. of Remote Sensing*, 17 (4) : 733-748.
- Wald L., 1990 – Monitoring the decrease of Lake Chad from space. *Geocarto International*, 5 (3) : 31-36.