

# Mares temporaires et risques sanitaires au Ferlo : contribution de la télédétection pour l'étude de la fièvre de la vallée du Rift entre août 2003 et janvier 2004

Jacques-André Ndione<sup>1,2</sup>  
 Jean-Pierre Lacaux<sup>3,4</sup>  
 Yves Tourre<sup>3,4</sup>  
 Cécile Vignolles<sup>3,4</sup>  
 Delphine Fontanaz<sup>3,4</sup>  
 Murielle Lafaye<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Centre de suivi écologique (CSE)  
 BP 15532  
 Dakar-Fann  
 Sénégal

<sup>2</sup> Laboratoire de physique de l'atmosphère  
 et de l'océan Siméon-Fongang/ESP-UCAD  
 ESP-UCAD  
 BP 5085  
 Dakar-Fann

<sup>3</sup> Médias-France  
 Centre national d'études spatiales (CNES)  
 18, avenue Édouard-Belin  
 BPI 2102  
 31401 Toulouse cedex 04  
 France

<murielle.lafaye@cnes.fr>

<sup>4</sup> Bâtiment C  
 1<sup>er</sup> étage

10, rue Hermès  
 31526 Ramonville Saint-Agne  
 France

<jean-pierre.lacaux@medias.cnes.fr>

<yves.tourre@medias.cnes.fr>

<cecile.vignolles@medias.cnes.fr>

<delphine.fontanaz@medias.cnes.fr>

## Résumé

Autour des mares qui servent de gîtes larvaires pour les vecteurs (*Aedes vexans* et *Culex poicilipes*) de la fièvre de la vallée du Rift (FVR), se crée un environnement variable où les moustiques peuvent prospérer et contribuer à sa diffusion et transmission dans le Ferlo. La petite taille et la distribution complexe des mares exigent l'utilisation d'images satellites à très haute résolution (SPOT-5, 10 m) pour suivre leur évolution spatio-temporelle. Deux nouveaux indices sont ainsi développés : l'Indice de différence normalisée des mares (NDPI) et l'Indice de différence normalisée de turbidité (NDTI). Les mares avec une superficie au moins égale à 0,5 ha sont prédominantes quelle que soit la période ; elles représentent 65 à 92 % de toutes les mares durant la saison des pluies. Il a été développé également des cartes à risque délimitant la zone potentiellement occupée par les moustiques (ZPOM). Elles sont élaborées sur la base de la capacité de déplacement des vecteurs de la FVR autour des mares (rayons d'actions entre ~500-600 m). Entre la saison sèche et la saison des pluies, l'étendue spatiale de la région à risque est comprise entre 1 et 25 % de la zone d'étude. Les indices et les produits opérationnels présentés constituent la première étape vers la mise en place d'un système sanitaire d'alerte précoce dans la prévision des risques d'émergence de la FVR.

**Mots clés :** eau de surface, fièvre de la vallée du Rift, télédétection, risque sanitaire, Sénégal.

## Abstract

**Water ponds and sanitary risk in the Ferlo area: Contribution of remote sensing in studying Rift Valley Fever between August 2003 and January 2004**

The abundance of mosquitoes around ponds is essentially linked to the intra-seasonal variability of rainfall which can be modulated by a panoply of climate signals. Larvae sites for the *Aedes vexans* and *Culex poicilipes* can thus proliferate accordingly and contribute to the diffusion of RVF. The ponds' small sizes and their spatio-temporal variability are monitored by high res. SPOT-5 (10 m) imagery. Two new normalized indices have been developed, the NDPI and NDTI, which make it possible to detect small ponds and associated turbidity. Indeed small ponds, less than 0.5 ha in size, dominate at all times and represent 65 to 90% of all ponds during the rainy season. Based on the measured average flying ranges of mosquitoes (500 to 600 m), risks/hazards maps have been developed that give the spatial extent to which mosquitoes can be found: the Zone Potentially Occupied by Mosquitoes or ZPOM. Between the dry- and the rainy-seasons the maximum difference in ZPOM spatial extent can be as large as 25%. All of the above is meant to contribute to the implementation of health early warning systems (HEWS).

**Key words:** remote sensing, Rift valley fever, Senegal, surface water.

Tirés à part : J.-A. Ndione

**A**u cours des 30 dernières années, la fièvre de la vallée du Rift (FVR) a touché sporadiquement l'ensemble du continent africain, du sud du Sahara à Madagascar, en passant par l'Afrique australe et orientale. Au cours de l'année 2000, une nouvelle étape a été franchie avec le passage du virus d'Afrique en Asie [1]. La FVR est devenue aujourd'hui l'une des plus préoccupantes de la quarantaine d'arboviroses émergentes ou ré-émergentes susceptibles de toucher l'homme [2]. Pendant la saison des pluies, l'abondance de moustiques au Ferlo semble être liée à la variabilité intrasaisonnière de la pluviométrie, à la dynamique de la végétation et à la turbidité des mares temporaires dont la taille est relativement petite. Autour de celles-ci, se crée un environnement favorable où les moustiques peuvent prospérer et contribuer aux diffusions et transmission de la FVR dans le Ferlo. Dans cette région naturelle, les mares temporaires revêtent un intérêt particulier, et ce pour plusieurs raisons. D'abord, la mare est quasiment la seule source d'approvisionnement en eau entre juillet et février ; elle permet ainsi aux populations de disposer de l'eau de boisson, mais également d'abreuver le bétail. Ensuite et surtout, ce sont des gîtes larvaires, donc des zones de contact entre hôtes (bétail) et vecteurs (moustiques). Finalement, les mares représentent un endroit privilégié où pourraient se dérouler les mécanismes de transmission de la FVR. Pour mieux comprendre ces derniers, il est plus que nécessaire de saisir le fonctionnement des mares, et ce à plus d'un titre. Dans cet article, nous présentons une nouvelle démarche qui utilise l'imagerie satellitaire pour la détection des gîtes larvaires (mares), l'identification et la quantification du risque lié à la capacité de déplacement des vecteurs (données *in situ*). Nous proposons une cartographie des zones potentiellement occupées par les vecteurs.

## Considérations sur la FVR

La FVR est une anthroponose due à un arbovirus de la famille des *Bunyaviridae*, genre *Phlebovirus*. Même si une large gamme d'animaux est susceptible de développer la maladie, les petits ruminants domestiques et les bovins y sont les plus sensibles [3]. Après une courte incubation (12 à 72 heures), la FVR entraîne une hépatite nécrosante et une mortalité rapide chez l'agneau (24 heures). Chez les animaux, le symptôme marquant est l'avortement, survenant en vague épidémique dans les populations naïves (non immunisées), ce qui constitue le signe d'appel de la FVR. Chez l'homme, après trois à six

jours d'incubation, le tableau clinique revêt des aspects variés, allant du syndrome grippal jusqu'à des formes sévères : entre 0,5 et 2 % des patients présentent des complications oculaires, et un peu moins de 1 % une atteinte méningée, voire une méningo-encéphalite, ou une fièvre hémorragique avec ictère [4]. L'épidémiologie de la FVR est rendue complexe par différents modes de transmission [2]. Sur un plan chronologique, on montre partout une alternance de brèves crises aiguës et de longues phases de silence épidémique, au cours desquelles le virus continue parfois à circuler à bas bruit. Malgré les nombreuses données accumulées au fil des années, des questions restent encore posées : l'existence d'un cycle enzootique de ce virus soulève la question de ses mécanismes de transmission et de maintien d'une année à l'autre ou sur plusieurs années [5].

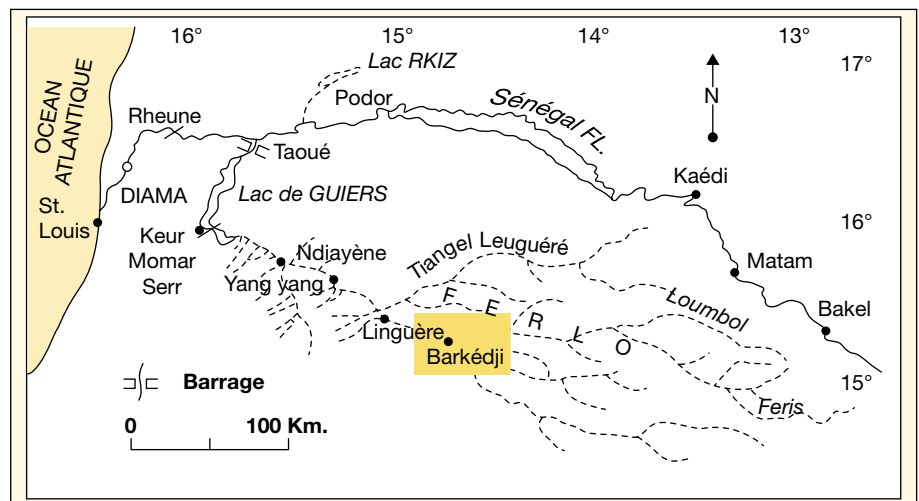
Suite à l'épidémie de FVR en 1987 [6-8] survenue au Sénégal et en Mauritanie, un programme de surveillance active animale et entomologique a été mis en place dans plusieurs zones biogéographiques du Sénégal par l'institut Pasteur de Dakar. Ce programme de surveillance a également permis de mettre en évidence à plusieurs reprises la circulation du virus de la FVR [9-15].

Ainsi, différentes espèces de moustiques, appartenant notamment aux genres *Aedes* et *Culex* [6, 9, 10], ont été identifiées déjà comme vecteurs potentiels de la FVR. Ils n'ont pas le même rôle dans l'épidémiologie de la FVR : les *Aedes* sont impliqués dans l'initiation du cycle de la maladie, alors que c'est aux *Culex* que revient le rôle de l'amplification virale. Grâce à la transmission verticale et compte

tenu du fait que leurs œufs sont très résistants à la dessiccation, les *Aedes* contribuent au maintien du virus dans la nature. Même si ces vecteurs ne sont pas les mêmes qu'en Afrique de l'Est ou du Sud, ils ont le même type de gîte de ponte (mares et zones inondables) et les mêmes préférences trophiques [9]. Pour le Sénégal, un schéma probable de transmission a été calqué sur le modèle de l'Afrique de l'Est [9] mais les résultats récents montrent une nette différence entre les événements FVR survenus au Kenya [16] et ceux du Sénégal [2, 17, 18]. Ainsi, le schéma épidémiologique envisagé pour l'Afrique orientale n'a pas permis d'expliquer les événements de la FVR survenus au Sénégal [20].

## Outils et méthode

Au Sénégal, depuis 1987, date à laquelle est survenue la première épidémie de la FVR dans la vallée du fleuve Sénégal, la situation épidémiologique reste préoccupante et une possible recrudescence de l'activité virale à tout moment n'est plus à exclure. La zone d'étude s'étend sur environ 3 600 km<sup>2</sup> autour du village de Barkédji, dans le Ferlo sénégalais (figure 1), Barkédji est situé dans les vallées fossiles du Ferlo et reste entouré par des bas-fonds (ramifications du Ferlo) qui collectent l'eau sous forme de mares temporaires dès le début de la saison des pluies. Mis à part les forages, ces mares demeurent les seules sources d'approvisionnement en eau entre juillet et février. Elles permettent ainsi aux populations de disposer de l'eau de boisson mais également d'abreuver le bétail (zébus de race Gobra ainsi que de petits ruminants, des



**Figure 1.** Localisation de la zone d'étude. Le petit carré jaune correspond à la zone d'étude ; adapté de Coly, 1996 [33].

ânes, des chevaux et quelques dromadaires). Du point de vue écogéographique, nous sommes dans la zone sylvopastorale, plus exactement dans la sous-zone du Ferlo sud sabloargileux. Le relief y est monotone : il est formé de dunes en partie aplaties ou stabilisées par la végétation. Avec une pluviométrie moyenne annuelle comprise entre 400 et 500 mm, son climat est de type sahélien avec deux saisons [21]. Les sols y sont de type isohumique bruns et brun rouge subarides peu évolués, d'apport éoliens, ferrugineux tropicaux non lessivés, minéraux bruts des dunes rouges où par endroits va affleurer la cuirasse. Sur les sols sableux, se développe un tapis de graminées annuelles (*Andropogon*, *Zornia*, *Cenchrus prieurii*, *Corchorus sp.* et *Cenchrus biflorus*). Le couvert végétal est fait de steppes arbustives (au nord) et arborées (au sud), et reste dominé par *Acacia radiana*, *Acacia senegal* et *Balanites aegyptiaca*, *Myrtragena inermis*, *Piliostigma reticulatum*, *Adansonia digitata*, *Diospyros mespiliformis*. À l'intérieur des mares, on note par endroits une forte présence de *Cenatothecca sesamoïdes* et de *Nymphaea lotus* durant la saison des pluies.

La petite taille et la distribution complexe des mares exigent l'utilisation d'images satellites à très haute résolution pour une détection adéquate. À cet effet, cinq images multispectrales SPOT-5 (10 m de résolution) sont utilisées pour suivre l'évolution spatio-temporelle détaillée des mares. Elles datent respectivement du 26 août 2003, du 17 et du 27 octobre 2003, du 18 novembre 2003 et enfin du 19 janvier 2004. De projection géographique plate carrée, elles sont composées de quatre canaux spectraux, à savoir le vert (XS1, 0,5-0,59 µm), le rouge (XS2, 0,61-0,68 µm), le proche infrarouge (PIR, XS3, 0,78-0,89 µm) et le moyen infrarouge (MIR, XS4, 1,58-1,75 µm). Les corrections radiométriques et géométriques ont été réalisées par © SPOT Image : les images ont fait l'objet d'un prétraitement de niveau 2A ([www.spotimage.com.cn/spot5/ensavoirplus/eng/plus\\_niveau.html](http://www.spotimage.com.cn/spot5/ensavoirplus/eng/plus_niveau.html)). En raison de la non-disponibilité de points d'appui au sol, le calage en relatif (image à image) a été choisi. À cet effet, la convolution cubique (ou interpolation bicubique) a été utilisée comme procédé de rééchantillonnage. Par rapport au calage, la précision de localisation est égale à 0,3 pixel, ce qui est tout à fait satisfaisant car inférieur à l'ordre du pixel (10 m\*10 m).

Le travail de détection et de classification des mares s'est effectué grâce à deux nouveaux indices qui ont été développés comme suit [20] :

– l'indice de différence normalisée des mares (NDPI) dont l'expression mathématique s'écrit ainsi :

$$NDPI = \frac{MIR - Vert}{MIR + Vert}$$

Le NDPI utilise les canaux MIR et vert de l'image SPOT. Cet indice a un double intérêt : d'une part, il permet de faire ressortir tout ce qui est surface en eau et, d'autre part, il permet du même coup de différencier la végétation à l'intérieur des mares de celle située à l'extérieur [20, 22]. Afin de faire ressortir les mares sur les images résultant du calcul de l'indice des mares, on a procédé par seuillage : les mares et les sols sont ainsi mis en évidence ; mais un second seuillage sur le MIR est nécessaire pour éliminer les sols et ne laisser apparaître que les mares (figures 2 et 3) ;

– le NDTI quant à lui utilise les canaux rouge et vert de l'image SPOT, et il est destiné à évaluer le degré de turbidité des mares. Rappelons que les mares étudiées font l'objet d'une utilisation socio-économique particulière : abreuvement du bétail, lieu de lessive pour les femmes, etc. Généralement, après utilisation (abreuvement du bétail) et compte tenu des éléments en suspension, la turbidité des mares augmente ; ce qui par ailleurs affecte leur réflectance qui devient comparable à celui des sols nus [20, 22, 23]. Son expression mathématique s'écrit

ainsi :

$$NDTI = \frac{Rouge - Vert}{Rouge + Vert}$$

Enfin, nous avons déterminé la zone potentiellement occupée par les moustiques (ZPOM [20]). Le rayon d'action des moustiques vecteurs potentiels de la FVR autour des mares est respectivement de 550 m pour *Culex poicilipes* et 620 m, pour *Aedes vexans* [17]. Fort de ces résultats, il a été appliqué un *buffer* (zone tampon) moyen de 500 m autour des mares détectées pour délimiter la ZPOM [20, 22].

## Résultats

Les petites mares (moins de 0,5 ha) sont prédominantes, quelle que soit la période : elles représentent entre 65 % (26 août) et 93 % (27 octobre) de toutes les mares identifiées durant la saison des pluies 2003 (figure 4 ; tableau 1). Le NDPI permet de simplifier la statistique des mares en fonction de leur surface et leurs évolutions durant la saison [22]. Du début de la saison des pluies jusqu'au 23 août 2003, Barkédji a enregistré 236,8 mm ; du 24 août au 11 septembre 2003, 64,9 mm s'ajoutent à ce total, le portant ainsi à 301,7 mm. Les mares dont la superficie est inférieure à 0,1 ha sont restées

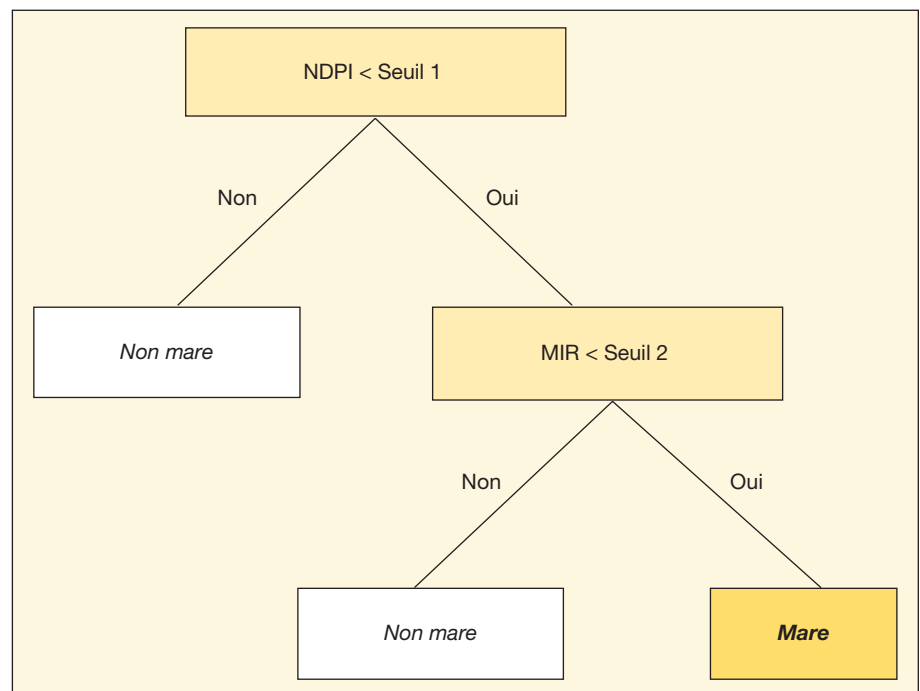


Figure 2. Détection des mares en utilisant simplement la classification hiérarchique par arbre décisionnel.

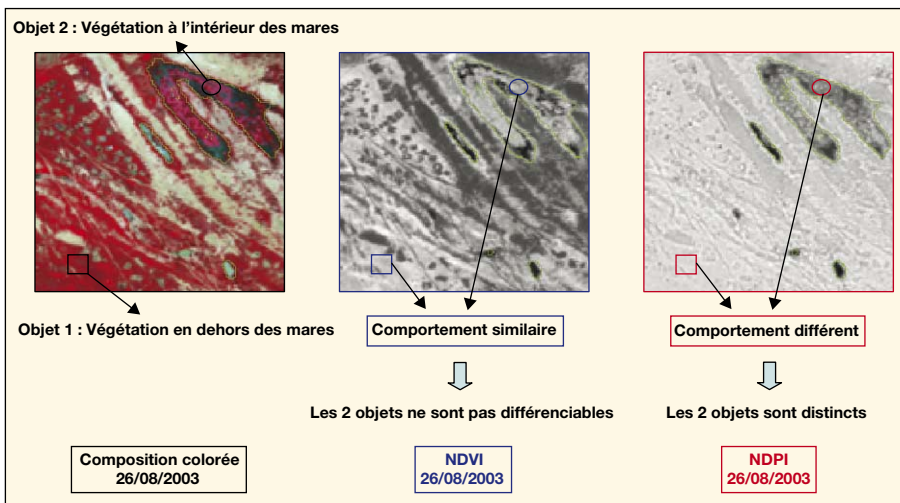


Figure 3. Pertinence de l'indice NDPI dans la détection des mares. Comparaison entre le NDVI et le NDPI.

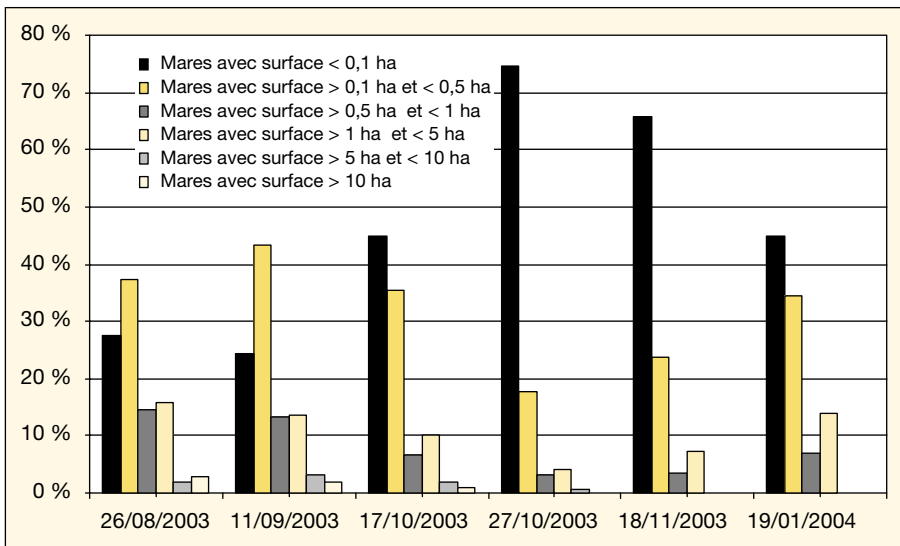


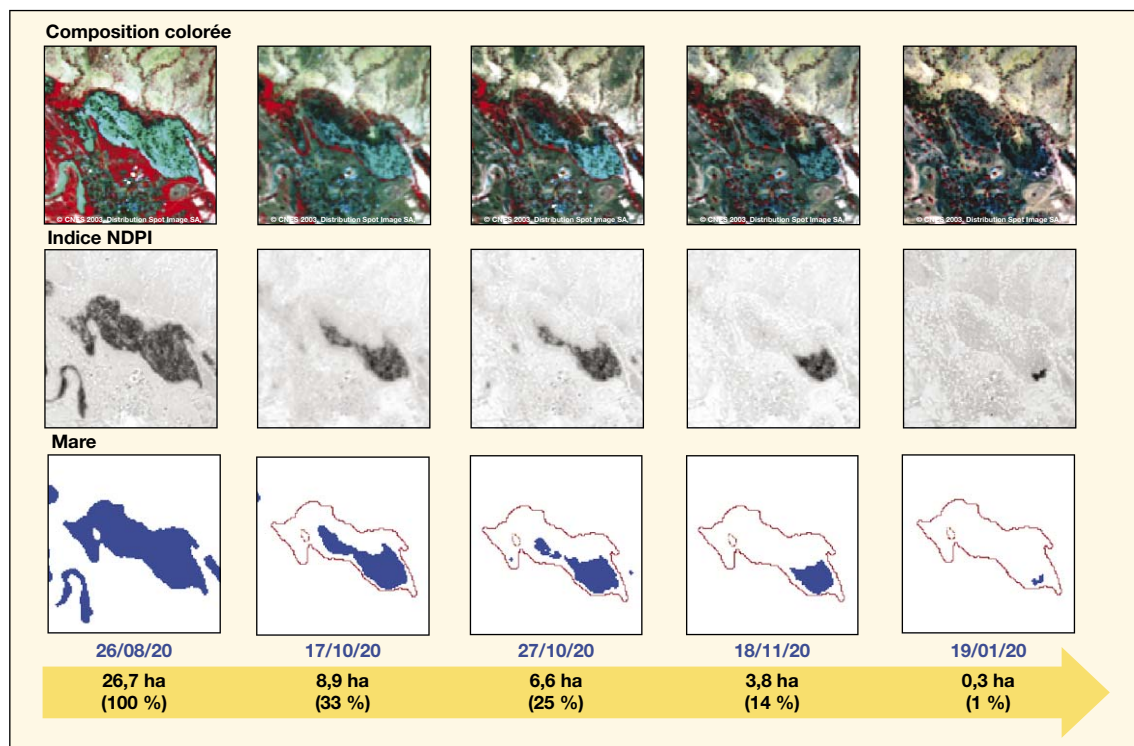
Figure 4. Distribution et évolution des mares du mois d'août 2003 à janvier 2004. Les superficies sont réparties en six classes.

Tableau I. Résumé des statistiques sur la répartition des mares et des précipitations entre le 26 août 2003 et le 19 janvier 2004. Pour les mois de novembre et de janvier, il n'y a pas eu d'apports pluviométriques.

	Nombre de mares (%)					
	26/08/2003	11/09/2003	17/10/2003	27/10/2003	18/11/2003	19/01/2004
Mares avec surface < 0,1 ha	373 (27,5)	172 (24,5)	139 (44,8)	542 (74,6)	155 (65,7)	13 (44,8)
Mares avec surface > 0,1 ha et < 0,5 ha	506 (37,4)	305 (43,4)	110 (35,5)	128 (17,6)	56 (23,7)	10 (34,5)
Mares avec surface > 0,5 ha et < 1 ha	195 (14,4)	94 (13,4)	21 (6,8)	22 (3,0)	8 (3,4)	2 (6,9)
Mares avec surface > 1 ha et < 5 ha	214 (15,8)	95 (13,5)	31 (10,0)	29 (4,0)	17 (7,2)	4 (13,8)
Mares avec surface > 5 ha et < 10 ha	27 (2,0)	22 (3,1)	6 (1,9)	5 (0,7)	0 (0,0)	0 (0,0)
Mares avec surface > 10 ha	39 (2,9)	14 (2,0)	3 (1,0)	1 (0,1)	0 (0,0)	0 (0,0)
<b>Total</b>	<b>1354 (100,0)</b>	<b>702 (100)</b>	<b>310 (100)</b>	<b>727 (100)</b>	<b>236 (100)</b>	<b>29 (100)</b>
<b>Cumul pluviométrique (mm)</b>	<b>236,8</b>	<b>301,7</b>	<b>387,7</b>	<b>429,7</b>		

dans des proportions assez modestes. Elles représentent respectivement 27,5 % (26 août) et 24,5 % (11 septembre). Visiblement, le cumul pluviométrique n'a pas permis de mettre en eau tous les points bas susceptibles de recueillir de l'eau ou encore, si ces derniers ont pu recueillir un peu d'eau, l'irrégularité des précipitations associée à l'infiltration et la demande évaporative élevée ont entraîné des pertes importantes. Tel ne sera plus le cas au 17 octobre, où le cumul pluviométrique tombé à Barkédji est porté à 387,7 mm dont 86,0 mm, entre le 11 septembre et le 17 octobre. Cela a augmenté de manière notable les mares inférieures à 0,1 ha qui représentent 44,8 % des surfaces en eau ; elles vont atteindre même 74,6 % au 27 octobre et se stabilisent à 65,7 % le 11 novembre. Enfin, entre le 17 et le 27 octobre, Barkédji n'a connu que 42,0 mm de précipitations. Au 19 janvier 2004, ces très petites mares (< 0,1 ha) représentaient tout de même 44,8 % des surfaces en eau (figure 4 ; tableau 1).

En plein cœur de la saison des pluies (26 août 2003, tableau 1), 1 354 mares (dont 506 avec une superficie comprise entre 0,1 et à 0,5 ha) ont été identifiées à l'intérieur de la zone d'étude ; ce qui équivaut à une superficie de 1 703 ha, soit 1 % de la superficie de la zone d'étude. En septembre, le nombre des mares s'élevait à 702 (dont 172 inférieures à 0,1 ha), le 17 octobre, l'on pouvait compter seulement 310 mares. Au 27 du même mois, il y avait 727 mares (dont 542 inférieures à 0,1 ha) et enfin, au mois de novembre, 236 mares. Au 19 janvier 2004, il ne subsistait que 29 mares et il n'y avait plus de mares supérieures ou égales à 5 ha (figure 4). L'outil satellitaire permet également une bonne cartographie spatio-temporelle des gîtes larvaires (figure 5) ; le cas d'espèce présenté sur cette figure 5 est la grande mare à l'entrée du village de Barkédji. Cette figure illustre parfaite-



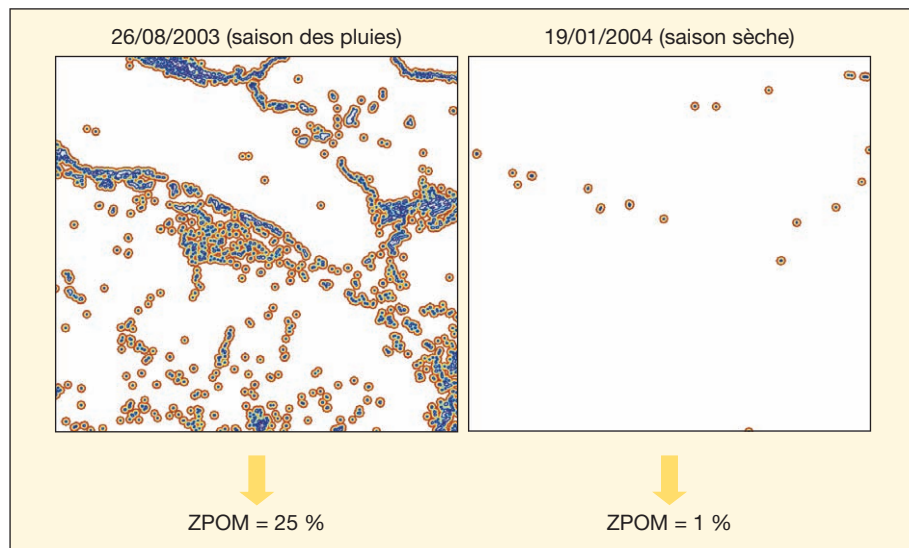
**Figure 5.** Dynamique de la mare de Barkédji au cours de la saison des pluies 2003 et en début de saison sèche 2004 [20, 22].  
© Médias-France Product, CNES 2003, distribution Spot Image SA.

ment la dynamique de vidange de cette mare dont la surface en eau libre est passée de 26,6 ha (26 août 2003) à 0,3 ha (19 janvier 2004) ; la partie sud-est est la dernière à s'assécher. Au milieu de la *figure 5*, les surfaces les plus sombres correspondent aux mares ; leurs valeurs NDPI sont les plus faibles [22]. Enfin, le trait rouge correspond au contour de la mare pendant le pic de la saison des pluies.

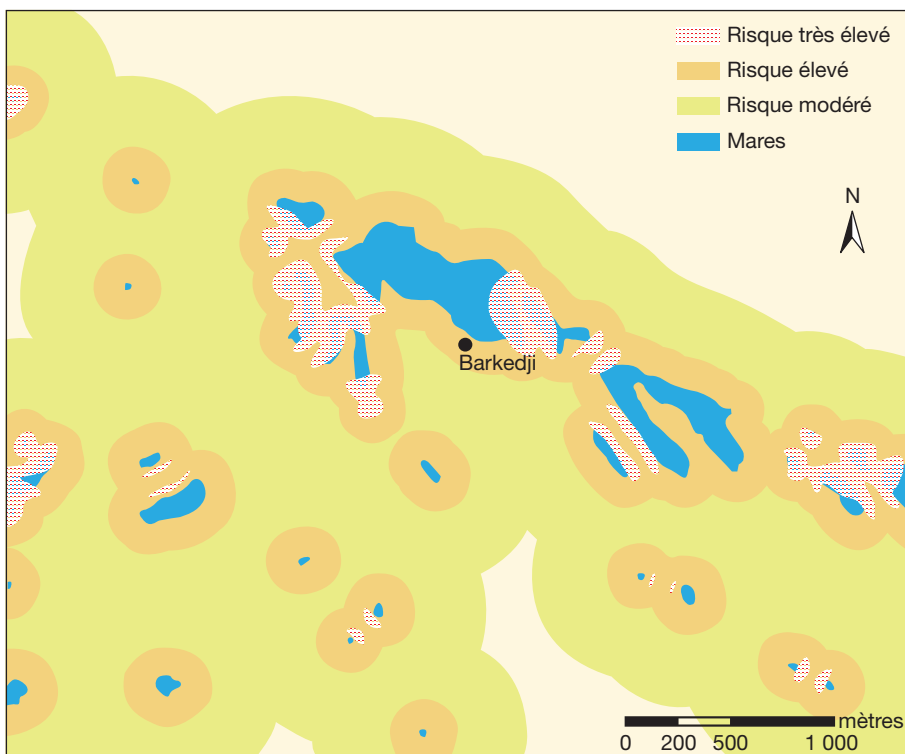
Pour mémoire, afin de ne détecter uniquement que les mares, des seuils ont été appliqués au NDPI ainsi plus spécifiquement à la bande spectrale du MIR. Ces seuils ont été identifiés par photo-interprétation pour chacune des images traitées. Les images ont ensuite été classées en fonction de ces seuils à l'aide d'une classification hiérarchique par arbre décisionnel (*figure 2*). Le NDPI permet non seu-

lement d'identifier les plans d'eau mais également de différencier la végétation à l'intérieur des mares (notamment les nénuphars, le riz sauvage...), puisque la végétation à l'extérieur des mares a tendance à présenter des valeurs NDPI supérieures à la végétation se trouvant à l'intérieur [22].

À partir de l'indice ZPOM, on a réalisé les premières cartes à risque délimitant les zones potentiellement occupées par les moustiques (*figure 6*). Elles sont élaborées sur la base de la capacité de déplacement des vecteurs de la FVR autour des mares (rayons d'actions entre ~500-600 m ; [17]). L'étendue spatiale de la région à risque révèle qu'elle peut au mois d'août, en plein cœur de la saison des pluies, couvrir 25 % de la superficie totale de la zone d'étude. Ces résultats ont été affinés grâce à l'outil SIG (système d'information géographique). Ainsi, on peut élaborer une ZPOM avec trois niveaux de risques (*figure 7* ; [24]). Le regroupement des mares en grappes laisse penser à une forte concentration de moustiques, d'où un risque plus élevé qui est associé à ces zones (*figure 7*). D'ailleurs, si l'on prend le cas des *Aedes*, dont le rôle est fondamental dans le maintien et la transmission du virus de la FVR, il a été noté qu'environ 18 % de moustiques sont recapturés entre 0 et 50 m ; 29 %, entre 50 et 150 m, enfin et 53 % entre 150 et 500 m [24].



**Figure 6.** Cartographie de la ZPOM en saison des pluies et saison sèche [20].  
© Médias-France Product, CNES 2003, distribution Spot Image SA.



**Figure 7.** Extrait de la ZPOM du 26 août 2003 avec les trois niveaux de risque.

Risque très élevé = hachuré en rouge ; risque élevé = marron clair ; risque modéré = jaune. Les mares détectées à partir du NDPI sont représentées en bleu (pendant le pic de la saison des pluies). Les groupements de mares sont facilement identifiables [22].

## Discussion

La littérature est relativement riche en ce qui concerne la cartographie des plans d'eau à l'échelle locale avec des instruments à haute résolution [25-29]. Bien évidemment, on ne saurait discuter ce travail sans pour autant évoquer les indices utilisés. Dans le passé, différents indices dérivés et divers rapports entre bandes spectrales ont été étudiés, tels que le NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), afin de séparer les plans d'eau des autres types de couverture du sol [22]. Dans cette présente étude, ces indices traditionnels confrontés aux vérités terrain ont donné des résultats insuffisants. C'est en cela que le NDPI (Indice de détection des mares par différence normalisée) est innovant. Mais, force est de constater que plusieurs auteurs ont déjà essayé de combiner le MIR avec d'autres canaux en vue d'obtenir de l'information soit sur l'eau, soit sur la végétation. À cet effet, le travail présenté ici pourrait être rapproché :

– de l'indice dénommé NDII, à savoir *Normalized Difference Infrared Index* et dont l'expression est :  $(PIR - MIR)/(PIR + MIR)$  et proposé par [30] ;

– ou encore du *Normalized Difference Water Index* (NDWI) qui montre que NDWI est linéairement corrélé au contenu en eau et qui se calcule comme suit :  $NDWI = (NIR - SWIR)/(NIR + SWIR)$ , [31].

Le NDWI de Gao [31] est différent du NDWI de McFeeters [32], puisque ce dernier, développé pour identifier les surfaces aquatiques, se base sur la différence entre le canal vert (V) et le canal infrarouge (IR) et son expression s'écrit comme suit :  $(V - IR)/(V + IR)$ , [25].

Il y a lieu de préciser que le choix de la résolution spatiale des images satellites utilisées pour le travail est capital dans cette problématique : ici, nous avons travaillé avec du SPOT 5 (10 m de résolution) et 1 703 ha de surface en eau ont pu être identifiés. On aurait pu obtenir la même information (surfaces en eau) avec SPOT Végétation, mais seule une surface de 100 ha aurait été détectée [20]. Cela pourrait entraîner inexorablement une mauvaise appréciation des gîtes larvaires et de la situation du risque, et avoir des conséquences fâcheuses sur le système de surveillance ou de veille. En sus, pour une bonne détection des mares, il a été utilisé la classification hiérarchique par arbre décisionnel. Le seuil 1, basé sur le NDPI,

permet de détecter les mares, y compris la végétation et les matériaux en suspension, ainsi que certains types de sols. Le seuil 2, fondé sur les comptes numériques dans le MIR, permet d'identifier les mares uniquement (figure 2 ; [20, 22]). Nous obtenons ainsi une bonne appréciation de la répartition spatio-temporelle des surfaces en eau.

Par rapport à la ZPOM qui représente jusqu'à 25 % de la zone d'étude (figure 6), une question demeure : au mois d'août, cette ZPOM est-elle vraiment dangereuse ou pas ? En effet, pour répondre à cette question, il faut considérer, d'une part, la dynamique des vecteurs de la FVR au mois d'août [9] et son rôle dans l'émergence de la FVR et, d'autre part, l'état immunitaire du bétail. En sus, une attention particulière doit être portée sur la variabilité intra-saisonnière de la pluviométrie [19]. En effet, au mois d'août, la situation vectorielle n'est dominée que par les *Aedes* dont la population est présente surtout en début et en milieu de saison des pluies ; elle atteint d'ailleurs son pic d'émergence au cours dudit mois. À eux seuls (*Aedes*), rien ne peut se faire ; donc pas d'émergence de la FVR. Mieux encore, les *Culex* commencent à peine à émerger. Ainsi, leur population n'est pas suffisamment élevée pour une amplification à grande échelle en vue d'une diffusion de la maladie. Enfin, à ce moment de l'année, les troupeaux commencent progressivement à affluer au Ferlo ; donc, la densité du bétail n'est pas encore si importante. La présence des moustiques et de l'eau ne suffisent pas pour avoir une émergence de FVR. La ZPOM reste une avancée importante et constitue une étape fondamentale dans la localisation de vecteurs potentiels de la FVR en terme de cartographie du risque mais il faut l'associer à d'autres observations.

Toutes choses étant égales par ailleurs, il semblerait que l'émergence d'un foyer de FVR corresponde à la conjonction dans le temps et dans l'espace d'un ensemble de facteurs :

– il faut que les conditions environnementales (climatiques et écologiques) permettent l'éclosion d'oeufs et la survie d'un nombre suffisant de vecteurs ;

– il faut aussi que ces mêmes conditions, en synergie avec la disponibilité de pâturages de qualité suffisante et les pratiques d'élevage, favorisent la rencontre des vecteurs et du bétail afin de permettre la transmission du virus aux animaux hôtes qui doivent être non immunisés, c'est-à-dire en nombre suffisamment sensibles ou naïfs, réceptifs au virus.

L'occupation de l'espace pastoral par les éleveurs et leurs troupeaux est conditionnée par la disponibilité et la qualité des

pâturages mais aussi de l'accès aux eaux de surface ; ces deux éléments dépendant étroitement des facteurs édaphiques et climatiques.

## Conclusion

Outre la cartographie de la variabilité spatio-temporelle des surfaces en eau, une bonne appréciation des zones potentiellement occupées par les moustiques est réalisée. Nous pensons que cette approche de caractérisation des gîtes larvaires fondée sur la télédétection a montré des résultats d'une grande importance. Ils constituent une première avancée vers la mise en place de systèmes sanitaires d'alerte précoce. En effet, par rapport aux récents travaux entomologiques qui ont démontré la portée du rayon d'action des vecteurs de la FVR au Ferlo, l'utilisation de la télédétection pour identifier les mares et leurs caractéristiques devrait faciliter l'étude des mécanismes impliqués dans la diffusion et la transmission de la FVR [22, 24]. Mais, force est de constater que ces résultats ne concernent qu'une composante du problème. Ils doivent être combinés à ceux relatifs à l'hydrologie des mares qui sont les gîtes larvaires, les conditions climatiques, les modes de gestion du bétail, l'occupation et l'utilisation des sols pour le développement d'un bon système sanitaire d'alerte précoce.

L'idéal serait à terme d'intégrer ces résultats dans des modèles dynamiques adaptés aux conditions locales d'Afrique de l'Ouest, pour prévoir le risque d'occurrence de la FVR dans l'espace et dans le temps. Cela permettrait de focaliser la surveillance et la lutte pendant des périodes à risque et à des zones à risque. De tels modèles pourraient également être testés en fonction de différents scénarii climatiques et fournir ainsi des éléments d'aide à la décision en matière de gestion de la santé humaine et vétérinaire. Mais de tels modèles ne valent rien, si, au préalable, les processus d'émergence restent assez mal compris ; d'où la nécessité d'une recherche si possible assez exhaustive des mécanismes à travers des indicateurs climatiques et environnementaux favorables à l'émergence de la FVR. Aujourd'hui, certains éléments sont assez bien connus sur l'épidémiologie de la FVR au Sénégal, à l'avenir, les recherches devraient s'orienter vers l'identification d'indicateurs environnementaux pour documenter la préférence écologique du vecteur en vue de mieux circonscrire le risque. Chaque indicateur élaboré ou documenté nous rapprochera d'une meilleure compréhension des mécanismes et facilitera le travail de la

modélisation. La télédétection et la modélisation mathématique constituent des outils précieux pour l'étude des maladies environnementodépendantes. Mais, il est nécessaire de coupler l'imagerie satellitaire à un suivi des données environnementales *in situ*, le tout dans une démarche pluridisciplinaire. À cet effet, le projet AMMA (Analyses multidisciplinaires de la mousson africaine), dans son WP 3.4 (*Health impacts*) nous offre cette opportunité et des recherches innovantes sont en cours de développement afin de relever le défi de la santé publique pluridisciplinaire. ■

## Remerciements

Nous adressons notre chaleureuse et déferente gratitude au Cnes et à Medias-France qui ont initié et supporté financièrement et techniquement ce programme. Mention spéciale au Dr Antonio Guell, chef de service valorisations et applications (Cnes). Remerciements aussi aux directions respectives du centre de suivi écologique, du laboratoire de physique de l'atmosphère et de l'océan Siméon-Fongang, de l'institut Pasteur de Dakar et de la direction de l'élevage, institutions partenaires du Sénégal. Depuis 2007, ce programme bénéficie du soutien financier du projet AMMA, à travers le WP 3.4. Basé sur une initiative française, AMMA a été construit par un groupe scientifique international et est actuellement financé par un grand nombre d'agences, en particulier de France, du Royaume-Uni, des États-Unis d'Amérique et d'Afrique. Il a été le bénéficiaire d'une contribution majeure du sixième Programme cadre de recherche et développement de la Communauté européenne. Des informations détaillées sur la coordination scientifique et le financement sont disponibles sur le site d'AMMA International <http://www.amma-international.org>.

## Références

1. Ahmad K. More deaths from Rift valley fever in Saudi Arabia and Yemen. *Lancet* 2000 ; 356 : 1422.
2. Ndione JA, Besancenot JP, Lacaux JP, Sabatier P. Environnement et épidémiologie de la fièvre de la vallée du Rift (FVR) dans le bassin inférieur du fleuve Sénégal. *Environnement, Risques & Santé* 2003 ; 2 : 176-82.
3. Lefèvre PC. Actualité de la fièvre de la vallée du Rift. Quels enseignements tirer des épidémies de 1977 et 1987 ? *Méd Trop* 1997 ; 57 : 61S-64S.
4. Organisation mondiale de la santé (OMS). In : *La fièvre de la vallée du Rift. Aide-mémoire* 207. Genève : OMS, 2000 : 1-5.
5. Ba Y, Diallo D, Dia I, Diallo M. Comportement trophique des vecteurs du virus de la fièvre de la vallée du Rift au Sénégal : implications dans l'épidémiologie de la maladie. *Bull Soc Pathol Exot* 2006 ; 99 : 283-9.

6. Meegan JM, Bailey CH. Rift valley. In : Monrath TP, ed. *Arboviruses Epidemiology and Ecology*. Boca Raton : CRC Press, 1988.
7. Lancelot R, Gonzalez JP, Le Guenno B, Diallo BC, Gandéga Y, Guillaud M. Épidémiologie descriptive de la fièvre de la vallée du Rift chez les petits ruminants dans le sud de la Mauritanie après l'hivernage 1988. *Rev Elev Med Vet Pays Trop* 1989 ; 42 : 485-91.
8. Jouan A, Adam F, Coulibaly I, et al. Épidémie de la fièvre de la vallée du Rift en République islamique de Mauritanie : données géographiques et écologiques. *Bull Soc Pathol Exot* 1990 ; 83 : 611-20.
9. Fontenille D, Traore-Lamizana M, Diallo M, Thonnon J, Digoutte JP, Zeller HG. Nouveaux vecteurs de la fièvre de la vallée du Rift en Afrique de l'Ouest. *Emerg Infect Dis* 1998 ; 4 : 289-93.
10. Diallo M, Lochouart L, Ba K, et al. First isolation of the Rift valley fever virus from *Culex poicilipes* (Diptera: Culicidae) in nature. *Am J Trop Med Hyg* 2000 ; 62 : 702-4.
11. Sall B. Épidémiosurveillance de la FVR au Sénégal : objectifs, méthodologie, résultats obtenus. In : Lefèvre PC, ed. *Séminaire sur la surveillance épidémiologique et le contrôle de la fièvre de la vallée du Rift en Afrique de l'Ouest*. TCP/RAF/8931 AC818/F, Dakar, 2001.
12. OIE. Fièvre de la vallée du Rift au Sénégal. *Informations sanitaires* 2002 ; 15 : 263-9.
13. OIE. Fièvre de la vallée du Rift en Mauritanie. *Informations sanitaires* 2002 ; 15 : 271-7.
14. OIE. Fièvre de la vallée du Rift au Sénégal. *Informations sanitaires* 2003 ; 16 : 253-60.
15. OIE. Fièvre de la vallée du Rift au Sénégal. *Informations sanitaires* 2004 ; 17 : 397-402.
16. Linthicum KJ, Assaf A, Compton JT, Kelley PW, Myers MF, Peters CJ. Climate and satellite indicators to forecast Rift valley Fever epidemics in Kenya. *Science* 1999 ; 285 : 397-400.
17. Ba Y, Diallo D, Kebe CMF, Dia I, Diallo M. Aspects of bioecology of two Rift valley Fever virus vectors in Senegal (West Africa): *Aedes vexans* and *Culex poicilipes* (Diptera: Culicidae). *J Med Entomol* 2005 ; 42 : 739-50.
18. Mondet B, Diaïté A, Ndione JA, et al. Rainfall patterns and population dynamics of *Aedes (Aedimorphus) vexans arabiensis*, Patton 1905 (Diptera: Culicidae), a potential vector of Rift valley fever virus in Senegal. *J Vector Ecol* 2005 ; 30 : 102-6.
19. Ndione JA, Diop M, Lacaux JP, Gaye AT. Variabilité intrasaisonnière de la pluviométrie et émergence de la fièvre de la vallée du Rift (FVR) dans la vallée du fleuve Sénégal : nouvelles considérations. *Climatologie* 2008 ; 5 : 83-97.
20. Lacaux JP, Tourre YM, Vignolles C, Ndione JA, Lafaye M. Classification of ponds from high-spatial resolution remote sensing: Application to Rift valley fever epidemics in Senegal. *Remote Sens Environ* 2007 ; 106 : 66-74.
21. Sagna P. Le climat. In : Sall MM, ed. *Atlas du Sénégal*. Paris : Eds. Jeune-Afrique, 2000.
22. Tourre Y. Évaluation des risques d'émergence de la fièvre de la vallée du Rift. *SPOT Mag* 2007 ; 42 : 17-20.

23. Guyot G. *Signatures spectrales des surfaces naturelles*. Télédétection satellitaire, no. 5, Col. SAT. Caen : Paradigme, 1989.
24. Tourre YM, Fontannaz D, Vignolles C, Ndione JA, Lacaux JP, Lafaye M. GIS and high-resolution remote sensing improve early warning planning for mosquito-borne epidemics. *HealthyGIS Newslet ESRI-Summer 2007* : 1-3.
25. Gond V, Bartholomé E, Ouattara F, Non-guierma A, Bado L. Surveillance et cartographie des plans d'eau et des zones humides et inondables en régions arides avec l'instrument VEGETATION embarqué sur SPOT-4. *Int J Remote Sens* 2004 ; 25 : 987-1004.
26. Frazier P, Page K. Water body detection and delineation with Landsat TM data. *Photogrammetric Eng Remote Sens* 2000 ; 66 : 1461-7.
27. Baghdadi N, Bernier M, Gauthier Y, Neeson I. Evaluation of C-band data for wetland mapping. *Int J Remote Sens* 2001 ; 22 : 71-88.
28. Chopra R, Kerma VK, Sharma PK. Mapping, monitoring and conservation of Harika wetland ecosystem, Punjab, India, through remote sensing. *Int J Remote Sens* 2001 ; 22 : 89-98.
29. Harvey KR, Hill GJE. Vegetation mapping of tropical freshwater swamps in the Northern territory, Australia: a comparison of aerial photography, Landsat TM and SPOT satellite imagery. *Int J Remote Sens* 2001 ; 22 : 2911-26.
30. Hardisky MA, Klemas V, Smart RM. The influence of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral radiance of *Spartina alterniflora* canopies. *Photogrammetric Eng Remote Sens* 1983 ; 49 : 77-83.
31. Gao BG. NDWI-A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sens Environ* 1996 ; 58 : 257-66.
32. McFeeters SK. The use of the normalised difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *Int J Remote Sens* 1996 ; 17 : 1425-32.
33. Coly A. *Le système fluviolacustre du Guiers : étude hydrologique et gestion quantitative intégrée*. Thèse 3<sup>e</sup> cycle, UCAD, Dakar, 1996.