

Gestion intégrée des zones humides en milieu tropical

Apport de la télédétection à la connaissance hydrodynamique

RÉSUMÉ

L'aménagement progressif des zones humides et côtières du Département de la Guyane soulève, comme dans beaucoup de régions côtières, des problèmes de gestion de l'espace littoral, dans un contexte d'une communauté d'acteurs qui peut aller jusqu'au "conflit d'usage". Les recommandations de la Conférence de Rio en 1992 sur la gestion intégrée des zones côtières peuvent être le point de départ d'un "exercice" de réflexion s'appliquant à un contexte géographique spécifique : 320 km de linéaire côtier, 1 270 km² de zones humides à l'ouest de Cayenne dont 5,2 % sont aménagés et une dynamique littorale très forte en font une région où il est nécessaire que l'investigation scientifique s'appuie sur une importante base de connaissance. Parmi les méthodes utilisées pour mieux décrire les 3 000 km² au total de zones humides du Département, l'utilisation des données de télédétection est un atout majeur : plusieurs programmes, depuis 1987, ont permis de confronter l'expérience de terrain avec des données non seulement optiques (Spot, Landsat) mais aussi radar (ERS1, projets pilote de l'ESA n° 12).

L'utilisation des données satellite, qui convient parfaitement à la description de ces vastes espaces souvent difficiles d'accès, est intégrée à plusieurs niveaux de la démarche : nous montrons comment l'on peut analyser le linéaire côtier avec les données radar afin de qualifier, à un instant donné, les échanges entre l'océan et les zones humides. Nous montrons également comment les données optiques permettent d'aborder le problème de la cartographie thématique et comment celle-ci s'insère dans un problème, plus délicat, de description des unités écologiques et de classification des zones humides. Enfin, par l'utilisation dans certains cas particuliers des données radar multitemporelles, il est possible d'aborder des processus dynamiques en hydrologie des zones humides.

La réflexion est ensuite ouverte sur les méthodes permettant d'obtenir une information sur le fonctionnement de la zone humide et de préparer cette information par rapport à un objectif de gestion intégrée.

ABSTRACT

The progressive development of wetlands in French Guiana, as is the case for many tropical regions, causes problems of land use planning, especially in coastal areas. This specific geographical context is characterized by 320 km of coastline, 1 270 km² of wetlands to the west of the town of Cayenne (of which 5.2% are managed), and an unstable shoreline. Wetlands are some of the most unstable and complex ecosystems, and

Marc Lointier

Chargé de Recherche à l' ORSTOM, Maison de la Télédétection, Montpellier, France

can be very sensitive to human and industrial development. Remote sensing represents a very important tool to obtain a better description of the 3 000 km² of total wetlands. Since 1987, several programs have been able to confront the groundtruth experience with optical data (SPOT, LANDSAT), and radar data (ERS1, pilot projects ESA N°12).

Perfectly suited to describe these wide spaces, which are often difficult to access, satellite imagery is useful at many levels :

- to show how the coastline can be analysed with radar data in order to qualify, at any given time, the exchanges of water between wetlands and the ocean.
- optical data are used in thematic cartography to help solve the difficult problem of ecological classification of wetlands. Multitemporal radar data are used, in some particular cases, to understand dynamical processes in water circulation.

The paper discusses means and methods to describe wetland functioning as a contribution to integrated coastal area planning.

INTRODUCTION

La démarche de gestion intégrée des zones côtières est de par sa nature assez complexe, multisectorielle et multi-acteurs. Parmi les tâches indispensables, il en est une qui revient au scientifique : l'inventaire et l'analyse des systèmes naturels et de leur fonctionnement. Quelle que soit la méthode de gestion choisie, l'analyse préliminaire des zones étudiées nécessite une méthodologie d'approche des milieux qui satisfasse à leur connaissance, à leur typologie et, dans la mesure du possible, à leur description systémique.

Les zones humides de la Guyane, situées non loin de la ligne de rivage, font l'objet d'un nombre croissant de projets d'aménagement alors que, par ailleurs, elles sont reconnues, pour certaines de ces zones en liaison avec l'océan, comme des biotopes indispensables aux cycles biologiques d'espèces marines. La crevette *Penaeus*, par exemple, est une ressource économique importante pour le Département avec 5 000 tonnes pêchées par an (Lhomme, 1992).

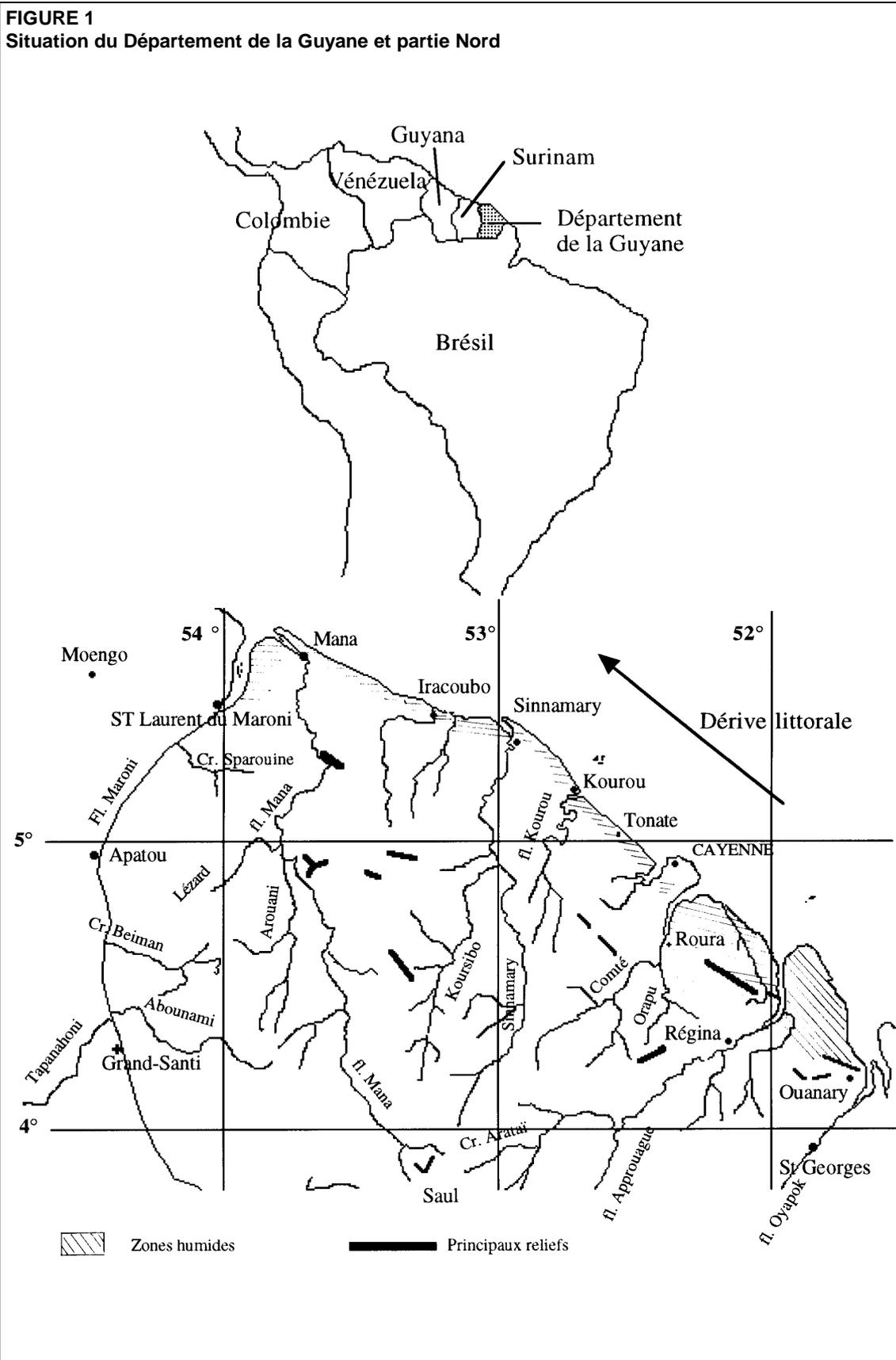
L'étude de ces vastes espaces "paraliques" nécessite l'utilisation de données spatialisées d'origine satellitaire, tant pour la description des milieux que pour leur approche fonctionnelle. Nous exposons dans ce travail les démarches qui ont été employées en vue de réaliser une "gestion intégrée", en utilisant les données optiques et radar ROS (radar à ouverture synthétique), sur la zone côtière du Département de la Guyane.

ZONE D'ÉTUDE : LES ZONES HUMIDES ET LES BASSINS CÔTIERS

Le littoral du Département de la Guyane s'étend sur 320 km, de l'embouchure du fleuve Maroni, frontière avec le Suriname, jusqu'à l'embouchure du fleuve Oyapok, frontière avec le Brésil.

Les zones humides

La zone côtière marécageuse peut être divisée en deux sous-ensembles, séparés par la presqu'île de Cayenne (figure 1) :



- A l'ouest, de Cayenne au Maroni, la bande côtière est étroite (5 à 8 km), comportant de nombreux marais côtiers, dont l'ensemble représente une superficie de 1 270 km².
- A l'est, entre Cayenne et l'Oyapok, on trouvera les deux grands ensembles marécageux de Kaw (720 km²) et de la pointe Béhague à la localité de Ouanary (910 km²).

Une des caractéristiques majeures de la plaine côtière de Guyane est la présence de ces vastes espaces situés en arrière de la mangrove de front de mer, dont le fonctionnement est encore peu connu.

Par ailleurs, ce littoral est soumis à d'intenses phénomènes de dépôts et d'érosion liés au transport des vases de l'Amazonie (Prost, 1992 ; Muller-Karger *et al.*, 1988 ; Eisma, 1988), entraînant l'ouverture ou la fermeture vers la mer de ces marais côtiers.

Au total, ce Département possède un ensemble de zones humides couvrant un espace de 4 000 km², dont les échanges avec l'océan sont tributaires du phénomène de sédimentation ou d'érosion de la ligne de rivage. Ces écosystèmes ont une alimentation en eau d'origine non seulement pluviale mais aussi fluviale par les petits bassins côtiers.

Bassins versants côtiers

Outre les grands estuaires qui les traversent, les zones humides sont souvent parcourues et alimentées par le réseau terminal de petits bassins versants qui sont recouverts de savanes exondées et de forêt primaire, et dont la superficie est comprise entre 20 et 200 km². Les bilans sur ces bassins sont obtenus à partir de mesures hydrologiques (hauteurs, jaugeages) classiques. L'interprétation des mesures est souvent compliquée par des variations de hauteur d'origine océanique ou du plan d'eau du marais aval (Lointier, 1994).

Les sites d'étude retenus ont concerné l'estuaire du Sinnamary (Prost *et al.*, 1990), la savane Sarcelle dans le marais de Mana (Lointier, 1986) et les deux bassins côtiers de la Passoura et de la Karouabo situés près de la ville de Kourou (Lointier et Rudant, 1994).

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Les données satellite utilisées

Une série de données optiques et radar (projet pilote ESA/ppF12 UPMC/BRGM/Orstom) ont été acquises sur le littoral de la Guyane :

- données SPOT : panchromatique du 28 octobre 1993
- données Landsat : 18 juillet 1988
- données radar (tableau 1):

ERS1 en bande C en mode standard (PRI). Les orbites sont descendantes, les acquisitions ont eu lieu à 14:15 TU, entre avril et décembre 1992

Un fond de carte thématique a été établi pour les sites étudiés en détail, en s'appuyant sur la carte IGN au 1/25 000 et sur les résultats de traitements de données optiques (Spot, Landsat TM) de 1986 et 1988.

TABLEAU 1
Données radar utilisées

Satellite	Date	Résolution	Bande/polarisation	Incidence
ERS1(RTM)	9 avril 1992	30 m (pixel=12,5m)	C (5,3 GHz) - VV	40 °
ERS1(PRI)	17 avril 1992	id.	id.	23°
ERS1(PRI)	3 mai 1992	id.	id.	23°
ERS1(PRI)	22 mai 1992	id.	id.	23°

Une cartographie globale au 1/100 000 a été réalisée avec les données radar ERS1 afin de couvrir l'ensemble du littoral.

Mesures de terrain

En l'absence de facilités d'accès, la plupart des prospections ont été faites en canot et à pied dans les savanes et les marais avec une progression souvent lente et difficile, interdisant quasiment la simultanéité avec un passage satellite. Chaque relevé a été localisé par GPS (Global Positioning System) avec une précision de l'ordre de 20 mètres.

Prélèvements d'eau : destinés à déterminer la salinité des eaux rencontrées.

Tous les éléments de terrain ont été reportés sur la donnée SPOT panchromatique (figure 2).

La "gestion intégrée des zones côtières" : le système bassin versant et zone humide

Contexte général de la démarche :

Les objectifs nécessaires à la gestion intégrée des zones côtières sont inspirés des résolutions issues de la Conférence de Rio (CNUED) en 1992 (A/CONF. 151/26, vol II, p. 145). Il y figure l'objectif de "permettre dans toute la mesure du possible, aux particuliers, aux groupes et aux organismes d'accéder à une information pertinente et d'offrir les possibilités de consultation et de participation à la planification et à la prise de décision aux niveaux appropriés".

Trois recommandations viennent compléter cet objectif :

- "créer et maintenir des bases de données pour l'évaluation et la gestion des zones côtières, des mers et de leurs ressources ;
- définir des indicateurs socio-économiques et écologiques ;
- procéder à des évaluations périodiques de l'environnement sur les zones côtières et marines".

L'approche intégrée transsectorielle développée dans plusieurs travaux (IUCN, 1994; Gilard, 1995 ; Abrassart, 1994) propose un plan et un cadre de gestion qui prennent en compte la spécificité et la complexité de chaque site dans les domaines institutionnels et réglementaires ainsi que leurs relations avec les différentes composantes du milieu physique. Sans entrer dans les détails de cette approche dont la vocation est d'améliorer la méthodologie d'aide à la décision, il apparaît certaines étapes préliminaires incontournables comme :

- la définition de critères de description de l'espace par rapport à une thématique, dans le contexte du problème qui est posé ;
- l'élaboration de règles de classification ou de typologie des milieux à décrire ;
- la recherche de méthodes de zonage de l'espace.

Ces étapes dont la solution conditionne le résultat final, sont souvent traitées arbitrairement, faute d'éléments spatialisés.

RÉSULTATS

Certains éléments "spatialisés" nécessaires à la description hydrologique des zones humides sont obtenus par télédétection :

Propriétés biophysiques

Cartographie thématique avec les données optiques

L'objectif est de rechercher avec ces données une description la plus fidèle possible non seulement des zones humides et de l'occupation du sol, mais aussi des éléments indispensables à l'hydrologue comme l'étendue des marais, les zones de bas-fonds à circulation, etc.

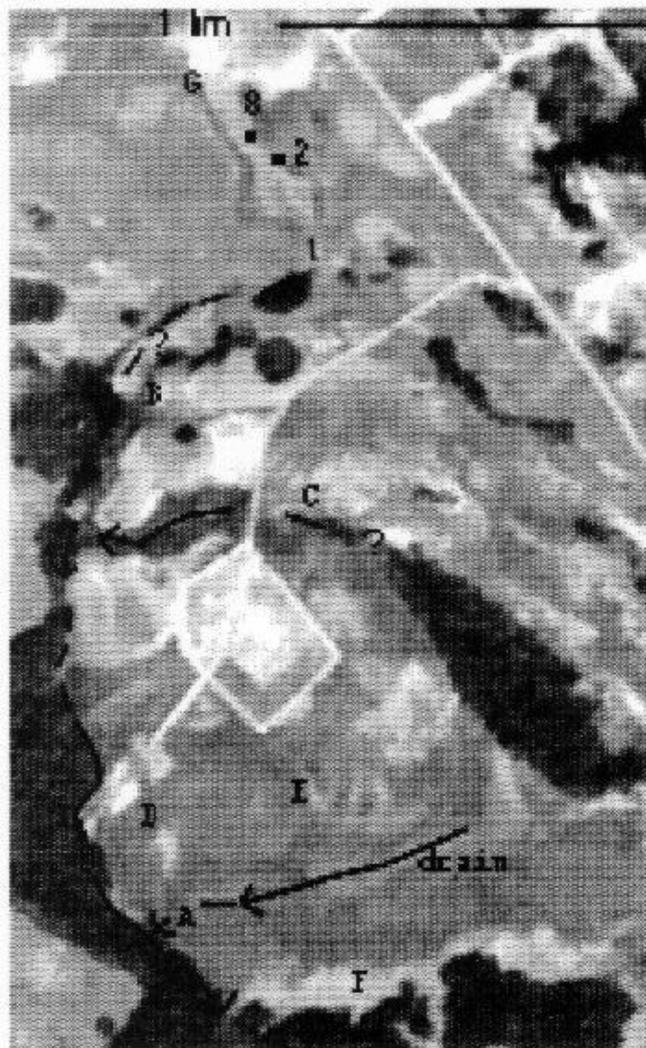
Cette démarche classique s'appuie sur les classifications par voie non dirigée réalisées à partir des données optiques, notamment Landsat TM.

La zone étudiée est un petit bassin versant côtier de 100 km² à la station de mesure (Karouabo) qui alimente une zone humide possédant peu de relations avec l'océan. Les réalités de terrain sont relativement nombreuses, permettant d'obtenir la validation de la thématique suivante :

- eau libre
- systèmes inondés avec végétation de surface
- savanes (trois classes différentes)

FIGURE 2

Report des données de terrain sur les données Spot panchro (28 oct 1993). Cette zone test constitue une des zones d'entraînement pour la cartographie globale des circulations.



- mangrove (deux classes : adulte et jeune)
- palmiers bêche et végétation arbustive de front de mer
- forêt
- terrains nus ou aménagés

Le retour sur le terrain avec les classements a montré quelques confusions entre la forêt primaire des zones de forêt inondable et de forêt sur cordon. Par contre, les trois classes obtenues dans les savanes permettent de bien cartographier les bas-fonds et les principales zones propices à la circulation de l'eau. Enfin, l'importance de l'extension des marais recouverts de végétation aquatique n'est pas mesurable. La biomasse de la végétation de marais est si importante que la présence d'eau n'est pas détectable.

La complexité de ces milieux se révèle assez grande et leur description ne peut être faite que par étapes, avec un "retour au terrain" fréquent.

Nous considérerons que la couche d'information biophysique est pertinente pour une thématique simple, ne comportant pas plus d'une dizaine de classes.

L'utilisation d'une donnée SPOT panchromatique de 1993 nous a permis, pour le thème savane, d'améliorer la définition du réseau de circulation de bas-fond, principalement à cause de la résolution à 10 mètres (figure 3).

Compléments thématiques avec les données radar

L'utilisation des données radar brutes permet de faire une discrimination des zones d'eau libre, en contraste avec le contexte. Cette information est assez pauvre et s'enrichit par fusion multitemporelle de plusieurs dates, ou par filtrage spécifique comme GGMAP (maximum *a posteriori*, Lopès *et al.*, 1993 ; Nezry *et al.*, 1993). Les possibilités de cartographie ont été démontrées sur ces zones (Lointier, 1993 ; Rudant *et al.*, 1994) avec une thématique évidemment plus grossière qu'en optique : on distinguera, par exemple, les principales unités de paysage comme la forêt, les savanes et l'eau libre.

Les données radar actuelles présentent l'avantage de leur acquisition tout temps, complétant les lacunes d'information optique, et surtout d'offrir dans les milieux non forestiers une information originale, de nature géophysique, et qu'il convient encore d'interpréter.

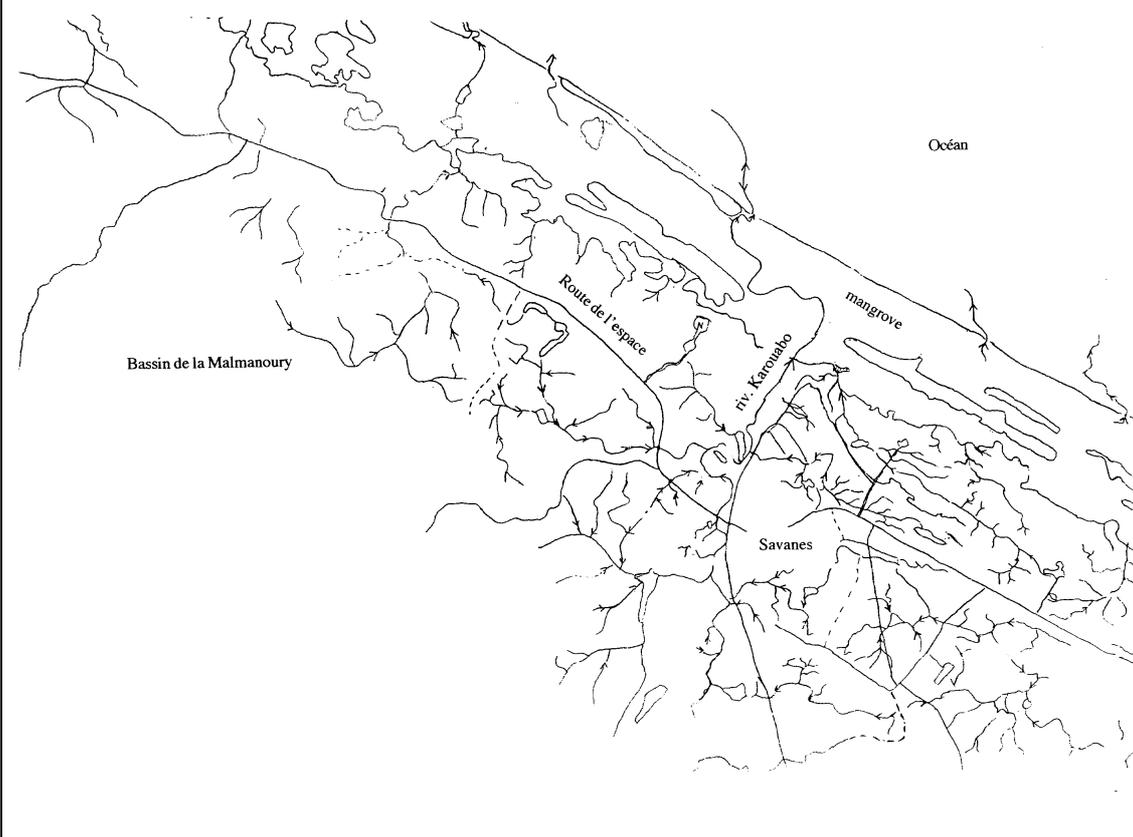
Propriétés dynamiques

Evaluation qualitative du niveau d'échange des zones humides avec l'océan à l'aide des données ERS1

Par degré d'échange, on entend la possibilité "mécanique" de l'eau de mer d'entrer dans les zones humides, en arrière du cordon littoral. Une première approche de cette notion a été faite avec les données Landsat TM de 1988, en exploitant les canaux du spectre "visible" (1, 2 et 3) et en repérant le nombre d'émissaires côtiers, repérables en mer par leur panache turbide (Travassos, 1994).

Les données ERS1 (1992) ont l'avantage de couvrir une grande partie du linéaire côtier et de traduire la rugosité du milieu. Nous avons pu analyser, à la faveur des acquisitions à marée

FIGURE 3
Carte des drains et des sens de circulation dans les savanes et les marais côtiers de la Karouabo. Interprétation des données Landsat TM et Spot panchromatique d'après les données de terrain.



basse, 230 km de côtes, du marais de Kaw au fleuve Maroni. L'observation de terrain à pied et lors de survols aériens à basse altitude, confrontée aux informations radar, permet de définir quatre classes :

- pas d'échange : présence de bancs de sable littoral "interdisant" l'intrusion océanique (signal rétrodiffusé faible et aspect rectiligne et étroit de la ligne de côte) ;
- échange faible : mangrove adulte en cours de destruction, peu de passages dans le cordon sableux consolidé en arrière de la mangrove (signal rétrodiffusé fort et aspect de la côte dentelé) ;
- échange moyen : banc de vase et mangrove jeune plus propice aux ruptures de cordon (signal absent sur bancs de vase) ;
- échange fort : marais ouvert à l'océan (signal rétrodiffusé fort et étalé au contact avec l'océan).

TABLEAU 2
Evaluation qualitative du niveau d'échange des zones humides avec l'océan

km cumulés	catégorie	long km
10,2	3	10,2
22,9	2	12,7
27,9	3	5,1
35,1	2	7,1
55,4	3	20,3
70,6	2	15,2
96,0	2	25,4
108,2	3	12,2
113,3	4	5,1
136,1	2	22,9
148,8	1	12,7
162,6	3	13,7
170,2	4	7,6
176,8	2	6,6
186,9	1	10,2
190,0	3	3,0
212,9	1	22,9
223,0	3	10,2
233,2	1	10,2

La mesure des longueurs concernées nous permet de dresser le tableau 2. Les résultats globaux obtenus sont les suivants :

classe	longueur (km)	pourcentage
1	56	24
2	90	38,6
3	75	32
4	13	5,4

On constate globalement qu'un quart du linéaire analysé serait sans échanges avec l'océan, et que la présence des marais complètement ouverts à la mer sont peu nombreux (5,4%). Ces résultats permettent de proposer un premier critère de caractérisation des zones humides littorales, fondé sur une information de type "niveau d'échange".

Cartographie d' événements hydrologiques

Une série de données ERS1 obtenues à pas de temps assez court (3 semaines), en 1992, ont été comparées aux données hydrologiques des bassins versants de la Karouabo (Lointier & Rudant, 1994). Ce travail a permis d'obtenir une cartographie locale contenant une information de type dynamique et spatialisée (figure 4). On obtient ainsi une "légende" comportant un terme temporel : stockage permanent, saisonnier, mensuel et à l'échelle de la crue.

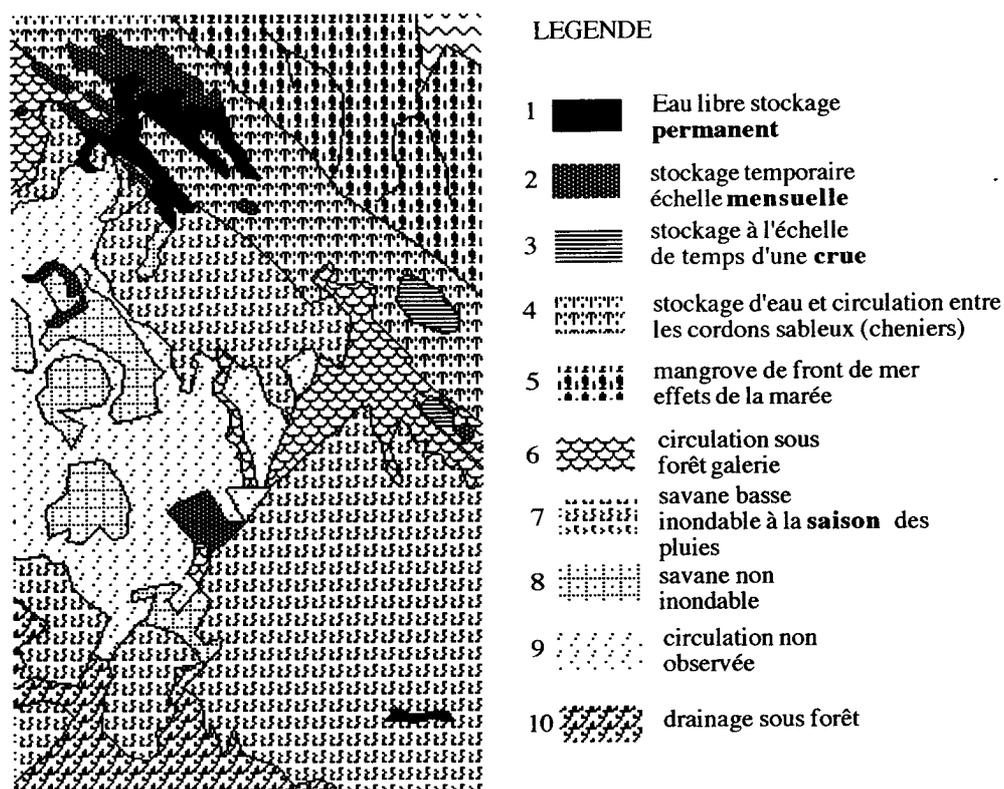
Ce type de document nous permet d'aborder une description fonctionnelle des zones humides et de proposer, à partir d'études de cas particuliers, des concepts plus génériques.

Schémas de fonctionnement des zones humides

L'ensemble des informations (hydrologiques, spatialisées, dynamiques spatialisées) permet de proposer trois cas génériques de fonctionnement des zones humides :

- zone humide ouverte à la mer (figure 5) : La prédominance marine s'exprime sur un réseau de drainage bien marqué, réutilisé en cas de fortes pluies. Ce système est en relation avec les plans d'eau saumâtres voisins qui subissent les effets dynamiques (variation de hauteur) et mécaniques (flux et reflux) de la marée. Le marais d'eau douce intérieur est indépendant de ce système;
- zone humide avec échanges océaniques très réduits (figure 6) : Les eaux douces s'accumulent le long des cordons sableux, privilégiant les circulations latérales. Ces zones sont hors de l'influence de la marée. La communication avec l'océan s'effectue, lorsque le débit est important, par des chenaux, à l'aval des bassins versants. Ces zones sont de petits estuaires sous influence dynamique et mécanique de la marée;
- zone humide en relation avec un estuaire (figure 7) : Les eaux douces continentales alimentent un système de savanes inondées temporairement ou en permanence. Celles-ci subissent uniquement l'effet dynamique de la marée.

FIGURE 4
Interprétation des données radar multitemporelles. Le croisement avec les données hydrologiques permet de réaliser un document contenant une information de type dynamique et spatialisée.

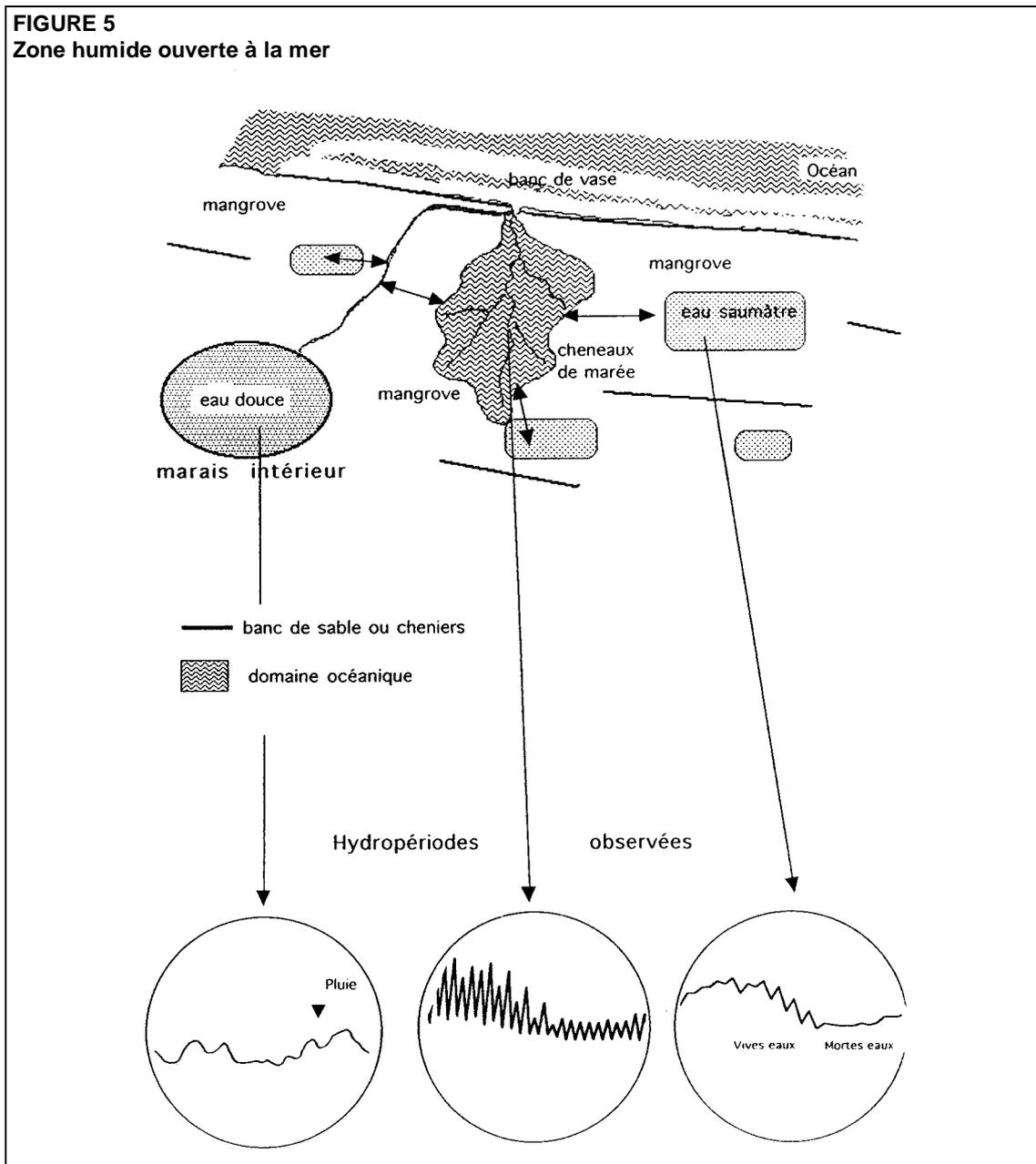


CONCLUSION

La description du milieu physique et de ses caractéristiques hydrologiques conduit dorénavant à considérer l'information spatiale dont nous disposons par satellite comme un moyen supplémentaire, de type "géophysique" (cf. radar), d'obtenir une information spatialisée sur les caractéristiques des zones étudiées. L'analyse de ces données nécessite un retour au terrain toujours indispensable, ainsi que l'exploitation des mesures traditionnelles (hauteurs, débits).

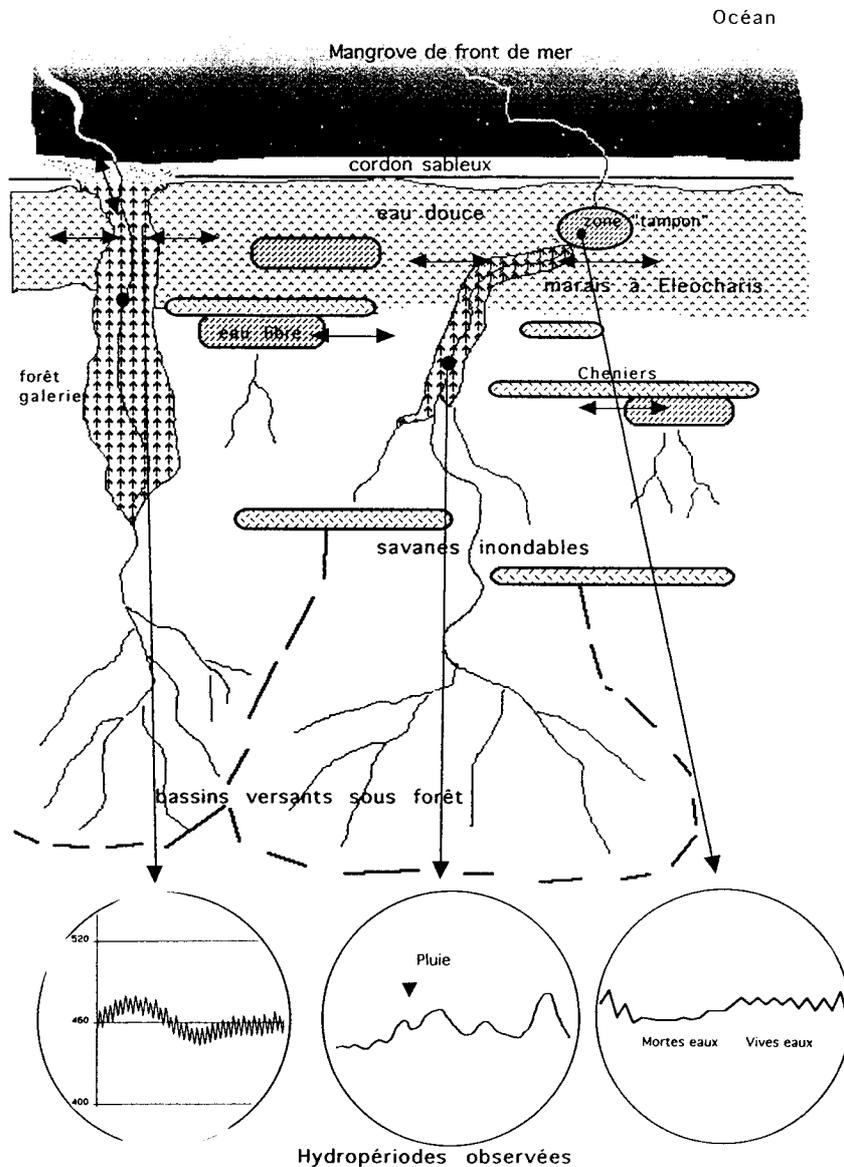
L'approche spatialisée en hydrologie des zones humides nous a permis de montrer que l'information obtenue comporte trois niveaux informatifs :

- la cartographie précise et géoréférencée des limites des grandes unités naturelles (plans d'eau, savanes, marais) et du réseau de circulation de l'eau;
- la cartographie qualitative de certaines relations entre les zones humides et leur environnement ("perméabilité" aux processus océaniques);
- la cartographie de certaines réponses du milieu (par l'approche multitemporelle), permettant d'introduire une dimension dynamique dans la description de ces zones (réponse à un événement, à une série ou à l'ensemble de la saison des pluies).



Ces caractéristiques spatialisées, propres au milieu, sont autant de plans d'information qui sont introduits dans la démarche de classification en unités fonctionnelles (Brinson, 1994). La démarche conventionnelle de classification de l'espace, qui est de type "systématique" par la recherche d'une typologie des zones humides, doit être enrichie par une connaissance des fonctions hydrologiques de chaque unité localisée par l'approche spatialisée. C'est à cette condition que l'on pourra proposer une classification de l'espace de type hydrologique et associer cette information aux autres thématiques pour réaliser l'approche intégrée du milieu naturel et sa gestion.

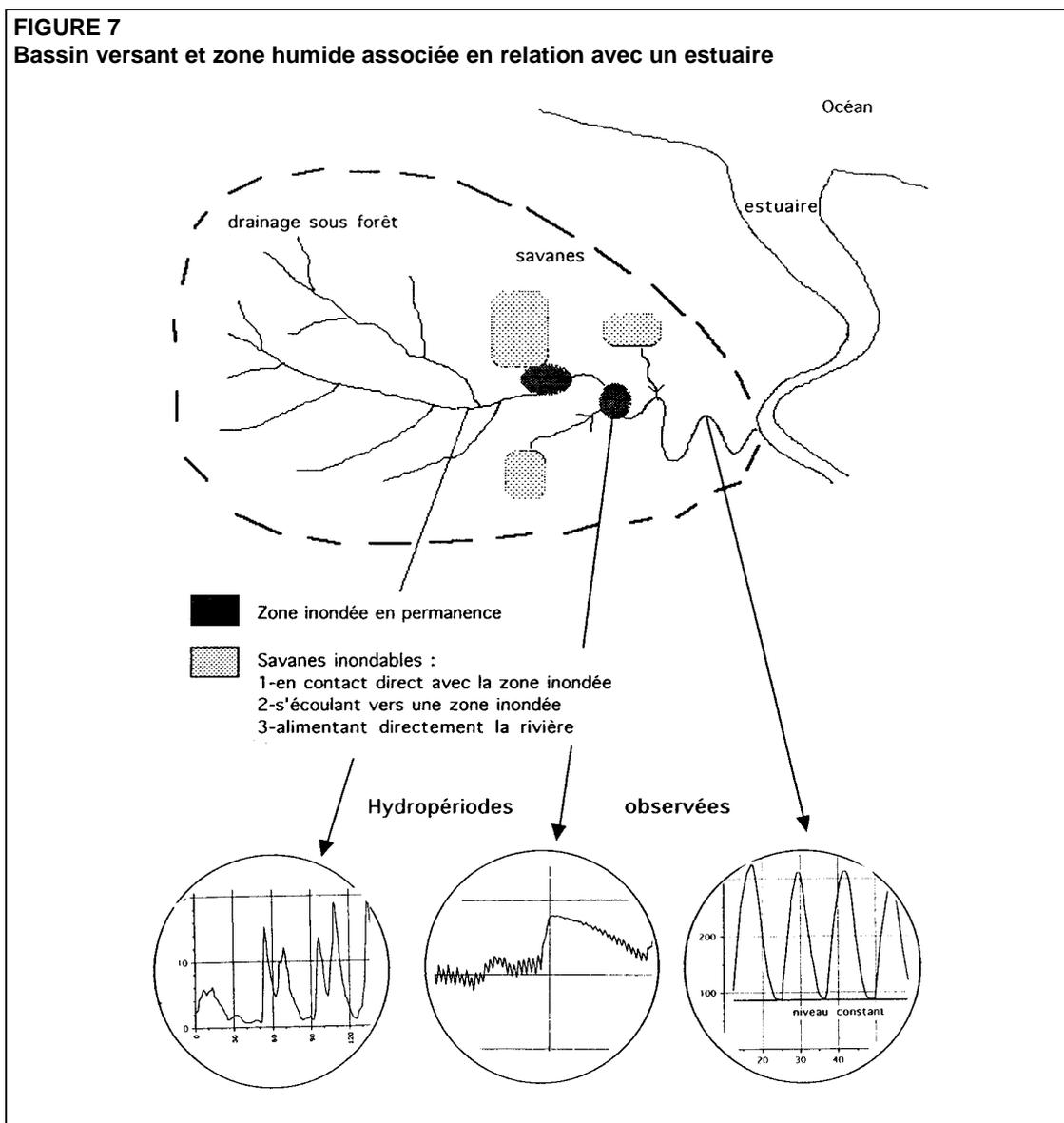
FIGURE 6
Zone humide en faible relation avec l'océan



BIBLIOGRAPHIE

Abrassart, J. 1994. *Un outil d'aide à la décision pour évaluer et réduire la pollution (N,P) des élevages intensifs à différentes échelles géographiques. Conférence SIG et changements d'échelle.* Maison de la télédétection de Montpellier.

Brinson, M.M., Kruczynski, W., Lee, L.C., Nutter, W.L., Smith, R.D. et Whigham, D.F. 1994. *Developing an approach for assessing the fonctions of wetlands. Global wetlands : Old World and New.* Edited by Mitsch W. J. Elsevier Science B.V.



Eisma, D. 1988. *Dispersal of Amazon supplied particulate matter*. Abstracts of the Chapman Conference on the fate of particulate and dissolved components within the Amazon Dispersal System : River and Ocean. AGU. Charleston. Wild Dunes, USA.

Gilard, O. 1995. *De nouveaux concepts pour l'aménagement des rivières : ralentissement dynamique et méthode inondabilité*. Cemagref Lyon. Division hydrologie-hydraulique. Support de cours Engref.

Lhomme, F. 1992. *Le recrutement des postlarves de la crevette *Penaeus subtilis* dans deux estuaires de Guyane française*. Annales de l'Institut océanographique, Paris, 68 (1-2) : 169-178.

Lointier, M. et Prost, M.T. 1986. *Morphology and hydrology of an equatorial coastal swamp: example of the Sarcelle Swamp in French Guiana*. Quaternary of South America and Antarctic Peninsula, J. Rabassa Ed. A.A. Balkema Publ. Rotterdam. 4. 59-77.

- Lointier, M. et Rudant, J.P.** 1994. *Contribution du SAR de ERS1 à l'analyse hydrologique en milieu tropical humide : résultats du programme pp-F12 en Guyane*. Xe journées hydrologiques Orstom. Orstom éd.
- Lointier, M.** 1994. *Etude hydrologique des bassins de la Karouabo et de la Passoura - lot 3*. Rapport d'étude Orstom/Cnes, Cayenne, 86 p.
- Lointier, M., Rudant, J.P. Sabatier, D. et Prost, M.T.** 1993. *Contribution of ERS1 Sar data to hydrologic approach in tropical area : example in French Guiana*. Second ERS1 Symposium. Hamburg. ESA Ed.
- Lopes, A., Nezry, E., Touzi, R. et Laur, H.** 1993. Structure detection and statistical adaptative speckle filtering in SAR images. *Intern. Journ. of Remote Sensing*, vol. **14**, 9, 1735-1758, June 1993.
- Muller-Karger, F., McClain, C.R. et Richardson, P.L.** 1988. The dispersion of the Amazon's water, *Nature*, vol **333**, n° 6168 : 55-59. May 1988. USA.
- Nezry, E., Lopes, A. et Ducros-Gambart, D.** 1993. Supervised radiometric and textural segmentation of SAR images. *Proceedings of IGARSS' 93, Tokyo (Japan), 18-21 August 1993*, IEEE 93CH3294-6, vol.3, 1426-1428.
- Prost, M.T. et Charron, C.** 1992. L'érosion côtière en Guyane. In *Coastal Protection: International Experiences and Prospect. Numéro spécial des Cahiers Nantais*. Ed. A. MIOSSEC. Univ. de Nantes. France.
- Prost, M.T., Lointier, M. et Charron, C.** 1990. La zone de Sinnamary : données morphologiques, hydrologiques et de télédétection. *Symp. Intern. sur l'évolution des côtes des Guyanes et de la Caraïbe méridionale pendant le quaternaire*. Cayenne, *Guide de l'excursion "B"*, 12-36.
- Rudant, J.P., Baltzer, F., LCL Czerwinski, G., Deroin, J.P., Lointier, M., Maître, H., Pénicand, C., Prost, M.T. et Sabatier, D.** 1994. *Possibilités cartographiques offertes par ERS1 en contexte tropical humide (Projet pp-F12). Exemples en Guyane*. Atelier ERS1 ESA, Tolède, juin 94.
- Travassos, P.** 1994. *Cartographie par télédétection optique et radar du littoral de la Guyane. Importance de la mangrove pour la production crevettière*. Mémoire de DESS/CETEL93-94.
- UICN.** 1994. *Cross-sectoral, Integrated Coastal Area Planning : Guidelines and Principles for Coastal Area Development*. 219 Huntington Road, Cambridge, CB3 0DL, UK. 64 pp.