

Approche de processus hydrologiques par indicateur spatialisé. Application sur les zones humides de Guyane. Une « terre numérique » : enjeu pour l'hydrologie ?

*Use of spatialized indicators in hydrological process.
Application on wetland of F. Guiana.
A « Digital Earth » : stake for hydrology ?*

par Marc Lointier¹

IRD, Maison de la Télédétection en Languedoc-Rousillon, 500 rue J.F. Breton, 34093 Montpellier ;
lointier@teledetection.fr

Water quality and water resource management will be a major problem in our society, which global consumption was 54 % of available water in 1995. In 2025, some countries in Africa, Middle East and Southern Asia, would have a demand reaching their available resources. In this specific field of water resource assessment, traditional network of water level gauges is reduced in some tropical countries of South and the quantification of global water resources is now less effective than in 1980. On this case, Earth Observation techniques could be a solution by providing useful EO and GIS solutions for a regular and cost effective monitoring and management of water resources. The aim of this paper is to use remote sensing information to reach a better description of the global functioning of a tropical wetland in French Guiana. Combining optical and radar data, we define spatialized « indicators », expressing the water dynamic in these coastal hydrosystem.

Keywords : water resource, remote sensing, indicator, wetland, French Guiana.

I ■ INTRODUCTION

Depuis plusieurs années les organisations internationales comme l'OMM, tentent de réaliser des bilans hydrologiques globaux des ressources en eau de la planète. Au problème de la quantification de la ressource s'ajoute désormais un problème plus récent de la qualité de la ressource. Les budgets nationaux des pays du Sud ne permettent pas d'assurer une continuité de la mesure et d'entretien des « réseaux hydrométriques de base » qui étaient les outils traditionnels de quantification des ressources et installés dans les années 50.

On estime à 42 600 km³ la valeur des écoulements/infiltration annuels sur terre. Néanmoins, cette ressource n'étant pas accessible toute l'année, on conservera une valeur moyenne des écoulements de base (estimé par certains auteurs à 37 % en moyenne) soit un volume annuel de 15 800 km³ [1]. Une autre évaluation basée sur les capacités de stockage naturelles et anthropiques abaisse cette valeur à 9 000 km³ annuels. Il a été calculé que le prélèvement global

(incluant le retour aux rivières après utilisation) était de l'ordre de 3800 km³ en 1995.

Il est prévu d'utiliser 5 200 km³ en 2025, sachant que 70 % de cette eau est destinée à l'irrigation, 20 % aux usages industriels et 10 % pour les usages domestiques. Il est évident que des ordres de grandeur aussi proches du disponible sont préoccupants lorsque l'on connaît l'inégalité de la répartition géographique de l'eau dans le monde.

Depuis trente ans maintenant, la communauté scientifique dispose de données originales, à différentes résolutions spatiales et spectrales qui nous permettent d'avoir accès à des séries temporelles de données, et sur toutes les régions du globe. C'est sur cette idée de « Terre numérique » ([2] que nous avons cherché dans l'information spatialisée optique et radar certains indicateurs permettant d'obtenir une information spatio-temporelle du fonctionnement des ces hydrosystèmes tropicaux.

II ■ TECHNIQUES SPATIALES ET HYDROLOGIE

Au-delà du savoir-faire nécessaire à la mise en œuvre du traitement de l'information satellitaire, l'évolution des techniques spatiales a largement précédé leur intégration dans

¹ M. Lointier est Vice Président de la commission Internationale de télédétection de l'AISH (ICRS).

certaines disciplines scientifiques. Si certains chercheurs se sont bien appropriés l'exploitation du signal physique, la représentation spatiale de certains phénomènes et plus généralement la spatialisation de la connaissance, porte en germe d'autres questions plus fondamentales, et des aspects plus spécifiques à l'hydrologie. Ainsi, les aspects d'échelle d'observation d'un paramètre, de méthodes de validation terrain adaptées à sa réponse spectrale, le « forçage » des modèles, l'assimilation (ré-étalonnage du modèle), sont autant de problèmes encore à aborder afin de franchir le pas vers l'opérationnel.

Ces considérations s'ajoutent au domaine spécifique de l'hydrologie : paramètres et schémas de fonctionnement ont été conçus et développés à une époque où les techniques spatiales n'existaient pas. Il y a donc encore une incompatibilité des points de vue, entre les paramètres requis et ceux disponibles par mesure satellitale [3]. De plus, l'utilisation des techniques spatiales renvoie directement au problème récurrent des « changements d'échelle » et à notre mode de représentation des phénomènes naturels. Ainsi, dans le domaine des changements d'échelle, certains auteurs proposent une approche mathématique [4], parfois difficile à transférer vers les applications, mais porteuse de solutions très génériques ; d'autres, supposent que l'espace est structuré en niveaux d'organisation superposés qui interfèrent les uns avec les autres [5, 3], ou encore, intégrant l'idée précédente, la « théorie des objets dynamiques » cherche à exprimer explicitement les relations entre forme, processus et échelles dans la description du paysage [6].

Depuis de nombreuses années, la recherche en télédétection a consisté principalement à modéliser la réponse spectrale des capteurs, en fonction des caractéristiques instrumentales et des propriétés du terrain (pente, nature et état du couvert). Ces efforts de modélisation, qui ont souvent sous-estimé les imperfections des capteurs, ont connu des succès inégaux. En effet, les modèles, qui ne sont valides que sur des surfaces homogènes et de grande étendue, sont souvent mis en échec dès que l'organisation spatiale des paysages devient trop complexe, qu'il s'agisse de paysages naturels, agricoles ou urbains. Ces limites ont contribué à crédibiliser, depuis quelques années, des approches complémentaires, par exemple l'analyse multi-échelle ou la recherche de signatures indirectes ou indicateurs. Ces approches, qui complètent la modélisation radiométrique par l'apport de nouveaux critères d'identification (indices de texture par exemple), ouvrent aussi de nouvelles perspectives d'application dans un domaine comme l'hydrologie qui pratique le plus souvent l'utilisation des images aériennes ou satellitaires pour leurs qualités cartographiques. Un coefficient d'infiltration, l'humidité d'un sol, l'évapotranspiration sont des paramètres qui n'ont pas de signatures au sens radiométrique du terme, mais qui pourraient être estimés par des indicateurs spatialisés indirects. Ce type de démarche a d'ailleurs été utilisée dans le domaine minier il y a une dizaine d'années dans des conditions de couvert végétal particulier. Ainsi la télédétection peut apporter des réponses à certaines questions, sans modèles physiques mais avec des références diverses et exogènes.

La connaissance des régimes, des bilans globaux, un passage à l'opérationnel pour une gestion durable de la ressource, montre la nécessité, accrue par la pression de la demande sociale, de mettre l'accent sur une recherche méthodologique tirant au mieux profit de ces technologies de l'information spatialisée.

III ■ LES ZONES HUMIDES

L'extension globale des zones humides est estimée entre 5,3 et 8,6 millions de km², soit à peu près 6 % des surfaces continentales [7]. L'aire géographique des « wetlands » est très largement répartie sur le globe, comportant des zones humides continentales, comme en Amazonie ou au Canada, et des zones humides proches de l'océan ou en contact avec celui-ci. De nombreuses zones humides se situent aussi dans la bande intertropicale et peuvent appartenir à de grands systèmes deltaïques, comme celui de l'Orénoque ou du Manipur en Inde.

L'importance des récentes modifications anthropiques de ces hydrosystèmes montre la forte relation qui existe entre l'homme et ces milieux depuis plusieurs siècles. Ce sont en effet les zones privilégiées pour les aménagements, mais aussi les premiers terrains transformés lorsque la place vient à manquer, pour une moitié de la population mondiale qui y réside.

La quatrième conférence « INTECOL » qui s'est tenue en 1992 a essayé de prévoir les grandes orientations concernant la gestion et la connaissance des zones humides, pour le siècle à venir, en prenant en compte l'importance de ces systèmes dans une problématique environnementale globale. Les constats de cette conférence ont été les suivants :

En terme d'enjeux :

— L'avenir des zones humides est une question d'ordre global, nécessitant le partage d'informations relatives à leur connaissance scientifique et l'élaboration d'un assortiment de décisions et d'actions ;

— Historiquement, la croissance économique s'est appuyée sur l'exploitation de ces milieux, sans contrepartie environnementale ;

— la gestion actuelle entraîne une disparition accélérée de ces milieux (aux États-Unis, on estime cette perte entre 800 et 1 600 km² au total) ;

— Un progrès considérable est à noter dans la connaissance, l'inventaire et la classification des zones humides ;

— L'intégration de la protection des zones humides aux plans d'aménagement des bassins-versants, dans un objectif de gestion de l'eau (pour l'alimentation des populations par exemple), est une démarche indispensable ;

— Les zones humides côtières et d'estuaire seront les premières touchées par un réchauffement global et l'augmentation du niveau marin ;

— Ces milieux sont parfois des « réservoirs » importants de carbone et participent aux effets tampons lors d'échanges avec l'atmosphère. Dans certains cas, il peut y avoir fixation du dioxyde de carbone ou libération de méthane (tous deux étant des gaz à effet de serre) ;

— Les zones humides ont une importance dans la notion de biodiversité, notamment dans la mise en place du « Traité international sur la biodiversité » ;

— Le développement durable n'est possible qu'avec l'existence de ces milieux du fait de leur rôle sensible dans le domaine de la gestion des eaux en quantité et en qualité.

En termes d'usages :

— Bien que couvrant une surface totale dans le monde assez faible (50 % de la population mondiale vit à une distance de 50 km de la mer, les zones humides ont un rôle économique important et représentent une part tout aussi importante de la production biologique.

— L'utilisation durable des ressources des zones humides génère à long terme une notion de fonction et de valeur patrimoniale des milieux en les intégrant dans un processus économique.

— La création et la réhabilitation des zones humides constituent également une réalité puisqu'elles sont utilisées dans le traitement des eaux usées des cités, pour le contrôle des crues, et de nos jours pour la préservation de la biodiversité d'un milieu.

— Dans les évaluations économiques classiques, ces milieux sont souvent dépréciés. La méconnaissance des valeurs d'un milieu environnemental utilisé à des fins anthropiques entraîne sa mise à disposition, souvent sans contrepartie, pour un ensemble d'autres activités à une échelle économique plus globale.

IV ■ RECHERCHE D'UN INDICATEUR DE FONCTIONNEMENT SUR LES ZONES HUMIDES DE GUYANE

● IV.1 Organisation du système hydrologique côtier de Guyane

Le linéaire côtier de la Guyane s'étend approximativement sur 300 km. Mis à part les estuaires de grands fleuves (Maroni, Approuague, Oyapock) et les grandes zones humides de Kaw et de la pointe Béhague situés à l'est de Cayenne, l'espace situé entre la forêt primaire et le littoral est constitué de zones humides alimentées par des bassins versants d'une centaine de km². La figure 1 présente schématiquement cette organisation. Le bassin versant sur forêt primaire (en général peu ou pas aménagé) alimente une zone humide d'une dizaine de kilomètres de large qui communique avec l'océan par un petit estuaire, « brèche » dans le cordon sableux littoral. Celle-ci peu s'obstruer pendant plusieurs années si un important banc de vase se dépose. Il y a dans ce cas des transferts latéraux des eaux qui emprunteront un autre exutoire, situé plus loin, pour s'évacuer vers la mer. Ainsi, deux types de zones humides peuvent co-exister, dans le temps et dans l'espace, soit d'eau douce soit d'eau saumâtre. En terme d'accès et de logistique de mesure, il est relativement aisé de réaliser des mesures de débits à l'exutoire du bassin (limite des zones 1 et 2), alors que les autres unités sont très difficiles d'accès, justifiant l'utilisation des techniques spatiales.

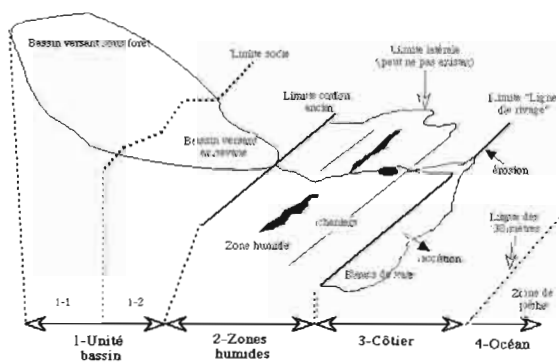


Figure 1 : Principales unités des hydrosystèmes côtiers de Guyane.

L'étude du fonctionnement de ces systèmes et la connaissance des volumes d'eau stockés, de leur temps de résidence

est devenu une nécessité en cas d'aménagement du bassin versant ou de la zone humide, par des activités pouvant altérer la quantité ou la qualité de l'eau.

● IV.2 Exploitation de l'information satellite

Devant la difficulté d'obtenir une information hydrologique sur ces zones, il a fallu proposer une méthode appropriée au milieu pour décrire et modéliser le fonctionnement des marais côtiers guyanais. Les technologies d'observation de la Terre et les méthodes actuellement disponibles d'intégration de données multisources ne permettent pas d'envisager systématiquement le passage des données d'observation à l'opérationnel. La télédétection joue un rôle particulier comme source d'information spatialisée dans l'approche proposée qui recherchera à décrire des indicateurs « hydrologiques » participant au fonctionnement du bassin versant et sa zone humide associée.

Nous avons mené une approche, s'appuyant sur des mesures de débits à l'exutoire du bassin, des campagnes de terrain et des données de satellites « optique » (Spot, Landsat TM) et radar (ERS1, JERS1) :

— Optique : SPOT XS du 20/10/86 ; SPOT Panchro 28/10/93 ; LANDSAT TM du 18/07/88.

— Radar : JERS1 du 13/02/93 et ERS1 PRI des 17/04/92 ; 03/05/92 ; 21/05/92 ; 07/06/92 ; 29/11/92 ; 18/12/92 (projet ppF12/ESA) ;

IV.2.1 Données optiques : occupation du sol

Les informations obtenues avec les satellites optiques permettent une cartographie de l'occupation du sol (fig. 3, zone couverte 20 x 15 km) qui rend compte des différents espaces à mangrove, des différents types de savanes et de la forêt primaire [8]. La figure 2 représente l'information extraite de la carte au 1/25 000^e, notamment le chevelu hydrographique et les espaces cartographiés comme marais. Seule l'information concernant le chevelu a été transposée sur la classification satellite Landsat TM.

IV.2.2 Données radar : dynamique et chemins de l'eau

Une série de plusieurs acquisitions par le ROS² de ERS1 (Bande C) en saison des pluies, comparées aux pluies et aux débits enregistrés à l'exutoire du bassin forestier, a permis de cartographier les parties de la zone humide qui présentaient une réponse à ces entrées d'eau et de spatialiser cette information à l'aide d'un SIG[9, 8].

Nous avons ensuite réalisé une confrontation entre les travaux de pédologie en Guyane [10, 11] sur une zone cartographiée (savane Mattitti), avec des données JERS1 en bande L. Celles-ci montrent une identification d'une partie du complexe pédologique tropical, notamment dans le système des « barres pré littorales ». Le réseau de drainage (qui n'est pas forcément fonctionnel) est un système de bas-fonds qui sépare les couvertures pédologiques, allant des horizons de la couverture ferrallitique (stade I) au podzol (stade V), identifiés par Boulet. Dans ce contexte particulier de savane, à végétation herbeuse à pyrophytes, l'information en bande L permet de réaliser une bonne distinction des bas fonds humides par leur rétrodiffusion plus élevée que le contexte environnant. Ce type d'information n'apparaît dans aucune

² ROS : radar à ouverture synthétique.



Estuaire, mangrove et banc de vase littoral.



Un réseau de drainage dans une zone humide.

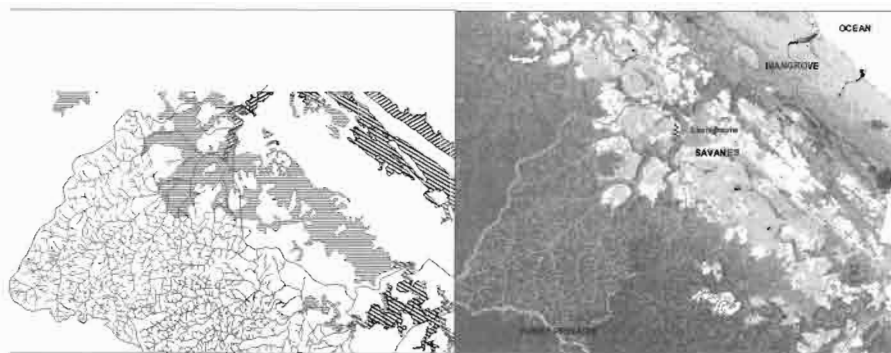
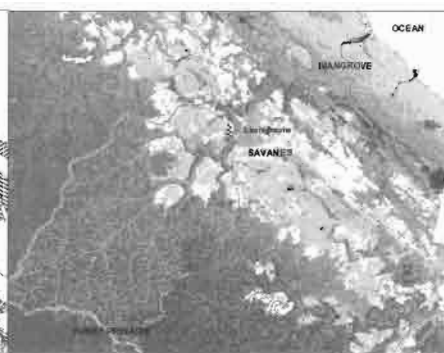
Figure 2 : Extraction du chevelu et des zones de marais à partir de la carte IGN au 1/25 000^e.

Figure 3 : Classification non dirigée réalisée sur les données Landsat TM.

autre information satellite analysée, notamment en bande C avec ERS.

● IV.3 Synthèse : indicateur spatialisé du fonctionnement hydrologique

L'ensemble de ces informations géométriquement superposables ont été exploitées conjointement avec une cartographie pédologique de la zone [12], pour réaliser une synthèse comprenant des termes descriptifs du milieu et de la dynamique de l'eau. C'est en ce sens que nous proposons le concept « d'indicateur spatialisé du fonctionnement hydrologique » (fig. 6).

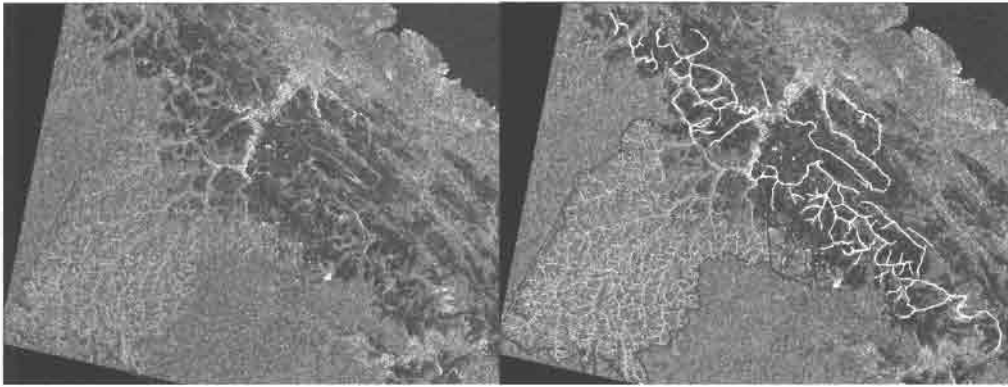
La première classe (codée 1) représente l'importante zone de stockage d'eau des marais côtiers à Cypéracées. L'absence de circulation de l'eau, de communication avec l'océan, et son étendue en font une zone de stockage très spécifique, qui dans les conditions d'invasement observées en 1996, ne communiquait pas avec l'océan.

Les classes suivantes (codes 2, 3, 4, 5, 6, 9, 10) sont représentatives d'une fonction de collecte et de circulation des eaux et sont explicitées ci-après.

La classe 1 (eau libre, stockage permanent) est relativement la plus importante en surface, mais aussi pour ses caractéristiques hydrauliques originales dont la connaissance est indispensable pour comprendre le fonctionnement de ces marais et approcher le calcul des volumes d'eau. En effet, les reconnaissances de terrain, faites à l'aide d'une chenillette amphibie, montrent une végétation importante, à Cypéracées (*Eleocharis interstincta*) et à *Montrichardia*, créant sous 50 cm d'eau, un système consolidé de racines enchevêtrées et de vase consolidée, supportant le poids d'un homme. Sous ce système, existe un mélange très fluide d'eau et de vase, dont nos sondages à 3 mètres de profondeur n'ont pas révélé de fond induré. Le volume d'eau de ces hydrosystèmes est donc très important et on ne connaît pas à ce jour leur profondeur réelle.

V ■ CONCLUSION

Ce type d'approche est devenu possible grâce aux outils informatiques actuels et au savoir-faire acquis depuis plusieurs années en traitement d'images. Néanmoins, il demeure toujours aussi fondamental de pratiquer le retour au terrain



Figures 4-5 : Photo-interprétation des zones de bas fonds (en blanc épais) à partir de la donnée radar JERS1 (bande L).
Le chevelu hydrographique de la carte au 1/25 000° a été conservé dans ce document pour une meilleure lisibilité et interprétation des connexions au réseau de bas fonds.

Code	Classe	% surface
1	eau libre, stockage permanent	22,57
2	zone inondable en saison des pluies, stockage temporaire	6,42
3	exondée, hydromorphe, voire inondable	14,14
4	exondée, perméable, non hydromorphe	10,61
5	inondable le long des cours d'eau	1,29
6	exondée, hydromorphe à drainage superficiel et latéral	19,00
7	mangrove jeune en échange avec la dynamique de l'océan	17,11
8	mangrove adulte en échange avec la dynamique de l'océan	1,87
9	Zone aménagée	0,94
10	circulation sous forêt galerie, alimentation des marais	6,05
11 (en blanc)	drainage sur socle généralement superficiel et latéral (forêt primaire)	-



Figure 6 : Indicateur spatialisé du fonctionnement hydrologique
Nb : le pourcentage de chaque classe est indicatif, et en l'absence de limites morphologiques, calculé par rapport à la surface de la zone de travail, ôté de la surface de la forêt et de l'océan.

sans lequel l'information satellite perdrait une bonne partie de ses qualités informatives.

L'utilisation des techniques spatiales, du GPS et des outils de représentations (SIG), permettent d'envisager une variété de systèmes de représentation de la connaissance hydrologique à différentes échelles, intégrant le terrain, la mesure ponctuelle, certains paramètres physiques (humidité, évapotranspiration...), mais aussi là où les méthodes actuellement disponibles d'intégration de données multisources ne permettent pas d'envisager systématiquement le passage des données d'observation à l'opérationnel. Dans cet esprit, nous avons illustré le concept d'indicateur de fonctionnement et proposé parmi ses descripteurs, une utilisation des données radar en bande L. L'information radar, en général, par son originalité « tout temps », est encore à valoriser en hydrologie, tant dans le domaine de l'étalonnage versus un paramètre physique, que dans la description des états de surface, des chemins de l'eau et des hétérogénéités spatiales, là où les conditions climatiques des milieux tropicaux gênent l'utilisation des capteurs optiques. L'ensemble de ces méthodes, initialisées par la donnée satellite multisources « superposable » s'enchaîne dans un processus de « fusions de données » produisant une représentation spécifique au problème posé.

Néanmoins, en se positionnant d'emblée dans une réalité spatiale, spectrale et temporelle, notre vision des processus hydrologiques peut être amenée à s'adapter et surtout à prendre en compte leur dimension d'échelle. Réaliser l'intégration de ces informations aux modèles hydrologiques, est sans doute un nouveau pari, mettant en œuvre de nouveaux concepts.

La situation d'urgence dans le domaine de la gestion de la ressource en eau, nous oblige dès maintenant à mettre en œuvre et à valider cette recherche méthodologique originale, au risque de voir se développer un « marché de l'eau » dans un contexte de pénurie, échappant aux différents acteurs de la gestion de l'eau, faute de données fiables.

BIBLIOGRAPHIE

[1] SHIKLOMANOV I.A. (1997). — Comprehensive assessment of freshwater resources of the world. World Meteorological Organization. Geneva, Switzerland, 88 p.

- [2] GORE A. (1999). — The digital Earth : understanding our planet in the 21 th century. Allocution au California science center, 31 janv. 1998. *Photogr. Eng. & Remote Sensing*, vol. 65, mai 1999, 528-530.
- [3] PUECH C. (2000). — Utilisation de la télédétection et des Modèles numériques de terrain pour la connaissance du fonctionnement des hydrosystèmes. Mémoire de recherches présenté en vue de l'obtention d'une Habilitation à diriger des recherches. INPG, Grenoble, 26.06.2000, 83 p.
- [4] RAFFY M. (1994). — The role of spatial resolution in quantification problems : spatialization method. *Int. J. Remote Sensing*, vol 15, n° 12, 2381-2392.
- [5] BRUNET R., GRASLAND C., FRANÇOIS J.C. (1997). — La discontinuité en géographie : origines et problèmes de recherche. *L'espace géographique* 1997, n°4, pp 297-308.
- [6] MARCEAU D. (1998). — Scale and scaling : implication in forestry and ecology. Proceedings of international workshop « Scaling and modelling in forestry ». Montréal, mars 1998. univ de Montréal, Pp 1-8.
- [7] MITSCH W.J. & GOSSELINK J.G. (eds) (1993). — *Wetlands*. Second edition. Van Nostrand Reinhold Compagny, New York, 539 p.
- [8] LOINTIER M. (1996). — Hydrologie des zones humides tropicales. Apport de l'information spatialisée aux problèmes de gestion intégrée. Applications en Guyane. Thèse de doctorat de l'Université P. & M. Curie (Paris VI) 300 p. avec Annexes.
- [9] LOINTIER M. & 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. Col. « Colloques et Séminaires ». Orstom éd., pp. 651-670.
- [10] GASCUEL-ODOUX CH., GRIMALDI M., VEILLON L. (1991). — Apport de la géostatistique à l'analyse morphologique du sol : cas d'un transect représentatif de la plaine côtière guyanaise. *Science du Sol*, 29, 3, 189-209.
- [11] BOULET R., CHAUVEL A., HUMBEL F.X., LUCAS Y. (1982). — Analyse structurale et cartographie en pédologie : I - Prise en compte de l'organisation bidimensionnelle de la couverture pédologique. Etudes de toposéquences et leurs principaux apports à la connaissance des sols. *Cah. ORSTOM, série Pédol.*, vol XIX, n° 4, 309-321.
- [12] GRIMALDI M., HUYNH, F., LOINTIER M., GRIMALDI C., SABATIER D. (1996). — Approche globale et pluridisciplinaire de l'environnement : Géomorphologie, Pédologie, Hydrologie et Botanique, par Télédétection et Système d'Information Géographique. Etude d'impact sur l'environnement de la zone de lancement n° 3. Rapport n° 94/CNES/2647, mult ; 111 p.