

THÈSE DE DOCTORAT

DE L'UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE, PARIS VI

Spécialité :

- SCIENCES DE LA TERRE -

présentée par

Marc LOINTIER

pour obtenir le grade de DOCTEUR

HYDROLOGIE DES ZONES HUMIDES TROPICALES

APPORT DE L'INFORMATION SPATIALISÉE AUX PROBLÈMES DE GESTION INTÉGRÉE

APPLICATIONS EN GUYANE

soutenue le 16 décembre 1996

devant le jury composé de :

M. J. CHOROWICZ, Professeur,
M. B. CERVELLE, Professeur,
M. P. MEROT, Directeur de Recherche INRA,
M. M. RAFFY, Professeur,
M. A. MARIOTTI, Professeur
M. P. CHEVALLIER, Directeur de Recherche ORSTOM,
M. J. P. RUDANT, Professeur,

Directeur de thèse
Président, Rapporteur
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur

RÉSUMÉ

Les études hydrologiques en zones humides tropicales sont fondamentales pour comprendre le fonctionnement de ces systèmes qui, par ailleurs, sont souvent l'objet de projets d'aménagement. En Guyane, il a été largement fait usage du savoir-faire en télédétection confronté aux données hydrologiques et aux campagnes de terrain pour élargir cette connaissance, en tenant compte du besoin d'information spécifique de décideurs, en charge de la gestion du milieu.

L'analyse hydrologique sur les zones humides nécessite une estimation des termes du bilan hydrologique et une connaissance des effets océaniques. Le cas des zones humides de Guyane est analysé au travers de différents exemples de la littérature.

Il est ensuite montré comment les données satellitales, optiques (Spot et Landsat) et radar (ERS1, JERS1) apportent des éléments de connaissance spatialisée dans les domaines de la qualité de l'eau, des températures de surface et de l'humidité des sols.

Les principes et les démarches proposées dans le domaine de la gestion intégrée du milieu sont analysés et appliqués au cas guyanais. Il est montré comment les classifications actuelles des zones humides ne satisfont pas à ces démarches qui nécessitent une information sur le fonctionnement du complexe bassin-versant - zone humide. Une classification systémique des bassins côtiers selon trois cas génériques est obtenue, permettant leur modélisation. Cette approche, croisée avec l'expertise hydrologique utilisant les données de télédétection, permet d'élaborer une esquisse hydrologique fonctionnelle spatialisée, dans un cas d'étude.

Il est montré enfin comment les résultats de ce travail s'associent à la démarche pluridisciplinaire, pour concevoir une carte de vulnérabilité intrinsèque des milieux côtiers et des zones humides, indispensable à leur gestion.

Mots clefs :

zones humides, tropical, Guyane, télédétection, hydrologie, radar, gestion intégrée.

SOMMAIRE

<i>RÉSUMÉ</i>	2
<i>AVANT - PROPOS</i>	7
<i>INTRODUCTION</i>	8
 <i>Chapitre 1 - Les zones humides et leur hydrologie</i>	 13
1. Généralités.....	13
1.1. Définition des zones humides.....	13
1.2. Situation géographique et répartition	15
1.3. Les études scientifiques : sujets et thématiques	19
1.4. Présentation du site d'étude : la Guyane.....	21
2. Description et fonctionnement hydrologique des zones humides.....	29
2.1. Le concept "d'hydro-période"	29
2.2. Bilan global	33
2.2.1. Précipitations	35
2.2.2. Evapotranspiration	39
2.2.3. Entrées et sorties de surface	41
2.2.4. Eaux souterraines	43
2.2.5. Marées.....	49
2.3. Incidence de l'hydrologie sur le fonctionnement physico-chimique d'une zone humide	53
2.4. Composition et richesse spécifique	55
2.5. Production primaire	55
2.6. Accumulation organique et exportation	56
2.7. Cycle des nutriments	56
2.8. Conclusion.....	58
 <i>Chapitre 2 - Les données satellitaires et leur apport à l'hydrologie des zones humides</i>	 59
1. Qualité de l'eau.....	61
1.1. <i>Propriétés spectrales de l'eau liquide</i>	61
1.1.1. Théorie dans le spectre "optique"	61
1.1.2. Coefficient total de diffusion et d'atténuation	62
1.2. Propriétés dans l'infrarouge thermique.....	62

1.3.	Propriétés optiques des surfaces en eau	62
1.3.1.	Propriétés optiques du phytoplancton	62
1.3.2.	Particules minérales en suspension	64
1.3.3.	Propriétés de la substance jaune.....	64
1.4.	Réflectance des eaux naturelles.....	64
1.4.1.	Charge en suspension.....	64
1.4.2.	Qualité de l'eau des estuaires de Guyane.....	66
1.4.3.	Chlorophylle	77
1.5.	Emissivité des eaux naturelles.....	77
1.5.1.	Applications générales	77
1.5.2.	Application en Guyane.....	80
2.	Humidité des sols	84
2.1.	Position du problème	84
2.2.	Approche du problème	84
2.2.1.	Les micro-ondes passives.....	85
2.2.2.	Les micro-ondes actives	86
2.3.	Applications.....	86
2.3.1.	Effets perturbant la mesure d'humidité.....	87
2.3.2.	Les expérimentations <i>in situ</i>	87
2.4.	Application sur les zones humides de Guyane	91
2.4.1.	Situation hydropluviométrique des acquisitions.....	91
2.4.2.	Réalités de terrain	91
2.4.3.	Calibration des données ERS1	104
2.4.4.	Etude des profils thématiques de rétrodiffusion.....	104
3.	Evapotranspiration	107
3.1.	Position du problème	107
3.2.	Applications.....	108
3.2.1.	Approche empirique.....	108
3.2.2.	Modélisation	111
3.3.	Synthèse - Prospective.....	111
4.	Aperçu des problèmes méthodologiques liés à l'utilisation de l'information spatialisée.....	115
4.1.	Problématique générale	115
4.2.	Problématique spécifique en hydrologie	119
4.2.1.	Une approche de type spatialisation d'une connaissance.....	119
4.2.2.	Une approche du signal physique spatialisé.....	119
4.3.	Conclusion	121

Chapitre 3 - *Gestion intégrée des zones humides - Apports de l'information spatialisée* 122

1.	Gestion intégrée	123
1.1.	Principes généraux.....	123
1.2.	Approche actuelle intégrée trans-sectorielle	126
1.2.1.	Analyse IUCN, 1994.....	126
1.2.2.	Méthode UNESCO / COI de gestion intégrée des zones côtières	128

1.3.	Application en Guyane	130
2.	Classification des zones humides.....	134
2.1.	Présentation et objectifs	134
2.2.	Historique sommaire des classifications	136
2.3.	Classification des zones humides côtières.....	137
2.3.1.	Classification selon le gradient d'énergie hydrodynamique.....	137
2.3.2.	Classification actuelle dans l'inventaire national des Etats-Unis	139
2.3.3.	Une approche systémique	140
2.4.	Classification des zones humides de Guyane.....	143
3.	Investigation spatialisée par télédétection.....	143
3.1.	Caractéristiques cartographiques et biophysiques par données satellitales	145
3.1.1.	Les données satellitales utilisées	145
3.1.2.	Réalités de terrain	146
3.1.3.	Cartographie thématique avec les satellites "optiques"	150
3.1.4.	Compléments thématiques avec les données des radars imageurs à ROS	151
3.2.	Approche des phénomènes dynamiques.....	163
3.2.1.	Evaluation qualitative du niveau d'échange des zones humides avec l'océan à l'aide des données ERS1	163
3.2.2.	Événements hydrologiques	165
3.3.	Schémas de fonctionnement des zones humides	165
3.3.1.	Zone humide ouverte à la mer.....	167
3.3.2.	Zone humide avec échanges océaniques très réduits.....	167
3.3.3.	Zone humide en relation avec un estuaire	167
4.	Modélisation : simulation des variations du volume d'eau et de la profondeur d'un marais côtier à drain unique	167
4.1.	Objectif et spécifications.....	167
4.2.	Description	171
4.3.	Résultats	176
5.	Capitalisation de la connaissance spatialisée en hydrologie des zones humides	189
5.1.	Présentation	189
5.2.	Réalisation d'un document hydro-thématique : esquisse hydrologique fonctionnelle spatialisée	192
5.3.	Exemple d'application	195
5.4.	Conclusion du chapitre 5.....	203
	<i>CONCLUSION ET PERSPECTIVES</i>	205
	<i>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES</i>	210
	<i>LISTE DES FIGURES</i>	222

RESUME..... Erreur ! Signet non défini.

AVANT - PROPOS

Les trois années passées en Afrique au début de ma carrière de chercheur à l'ORSTOM et le long séjour effectué en Guyane m'ont convaincu de l'importance des missions de cet Institut dans le domaine de la Recherche et de la Coopération en zone tropicale. J'ai été soucieux toutes ces années d'oeuvrer à ces missions pour lesquelles bon nombre de mes relations professionnelles m'ont aidé.

A l'issue de ce travail de synthèse qui a eu pour objectif une présentation des résultats de recherche dans un contexte d'application, je remercie chaleureusement le professeur Jean Chorowicz, Directeur de ce travail, pour toutes les grandes compétences scientifiques personnelles ainsi que celles de son laboratoire, qu'il a su mettre au service de ce résultat.

Je dois également insister sur les nombreux échanges, tant sur le terrain qu'au laboratoire, avec le Professeur Jean-Paul Rudant sans qui la synergie des connaissances entre l'hydrologue et le physicien n'aurait pas existé. Qu'il trouve ici toute ma gratitude et toute ma reconnaissance d'avoir eu les bonnes idées au bon moment.

Je remercie Mme Régine Chaume, Directeur de Recherche à l'ORSTOM, pour m'avoir accueilli dans la structure de Montpellier à la Maison de la Télédétection en Languedoc-Roussillon, tout comme l'équipe de la Mission Technique de Télédétection de l'ORSTOM.

Je suis reconnaissant à Pierre Chevallier, hydrologue, Directeur de Recherche à l'ORSTOM, pour tous ses conseils précieux pendant la rédaction de ce travail.

Mes remerciements vont également vers les collègues qui ont contribué pour leur partie à l'évolution de mes idées et de mes compétences : B. Cappelaere, H. Demarcq, N. Dessay, F. Huynh, C. et M. Grimaldi, X. Lazzaro, J.M. Michotte, J. Noël, M.T. Prost, J. Teixeira, le groupe de travail COI / UNESCO et les collègues de l'ORSTOM de Montpellier et de Cayenne, les collègues de la Maison de la Télédétection, qui ont su me consacrer leur temps dans tous ces échanges informels qui se révèlent être importants pendant une phase de réflexion.

Enfin, je remercie mes parents, Liliane et Raymond, ma soeur Anne, pour leur présence chaleureuse à tous ces instants de la vie,

ma famille, mes proches et mes amis pour leur enthousiasme précieux, François, Luc et Laurence, Yves, Damien, Marie, Marie-Agnès, Marie-Odile, Cannelle, Emmanuelle, Igor,

et Victor pour son soutien inconditionnel.

Je les invite tous à partager la table du "Club de la Chance".

Introduction

Contexte et problématique locales

Le cadre géographique des zones humides du département de la Guyane, est spécifique d'une côte tropicale aux forts courants côtiers, entraînant une importante dynamique littorale et le dépôt de sédiments terrigènes amazoniens de grande ampleur. Les conséquences en arrière de la ligne de rivage sont nombreuses, par la fermeture et l'ouverture à la mer des marais côtiers, qui hébergent une partie des cycles biologiques, dont celui de la crevette pénéide, seconde ressource économique du département (fig. 1).

Les aménagements progressifs du littoral (riziculture, industrie spatiale, urbanisation) ont assez tôt (Rossignol, 1972) posé un problème de connaissance du milieu littoral (cycles biologiques, hydrologie côtière...) lié aux transformations anthropiques. A l'époque, la connaissance scientifique était assez pauvre et, en l'absence de solides éléments, les responsables de l'État et les collectivités territoriales ne disposaient ni de moyens d'évaluation ni d'éléments de communication sur les conséquences des aménagements projetés ou déjà réalisés sans étude préalable.

Ce contexte, mal identifié, a été générateur de questionnements et de conflits entre acteurs responsables de la gestion du département, qui se sont rapidement retournés vers le scientifique pour obtenir des réponses fiables.

C'est ainsi que les études scientifiques sur le littoral guyanais, dès 1985, ont procédé d'une démarche d'identification d'une problématique de développement, qui a été déclinée progressivement en projets scientifiques pluridisciplinaires, pensés par rapport aux objectifs d'expertise et de gestion du milieu (on rejoint ici l'analyse du programme "Environnement, Vie et Sociétés" du CNRS).

La logique de notre travail s'est inscrite dans une approche intégrée, globale et interdisciplinaire, où "l'objet d'étude" regroupait ces problématiques de développement, d'enjeux et d'usages des zones humides.

L'objet d'étude

Les zones humides sont un lieu propice aux innombrables processus chimiques et biologiques de la biosphère continentale et certains auteurs n'ont pas hésité à les dénommer des "supermarchés biologiques"¹, essentiels dans la régulation des climats à l'échelle globale. Il est vrai que la productivité est généralement plus élevée que dans les autres écosystèmes terrestres (Whittaker et Likens, 1973).

Plus récemment, les zones humides sont devenues aussi la "cause célèbre" (Mitsch, 1993, en français dans le texte anglophone) des enjeux de la préservation de ces écosystèmes, à cause de leur disparition importante dans le cadre de projets d'aménagements.

¹ "biological supermarkets"

Fig. 1

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 (W.J. Mitsch, 1994). 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 modifications anthropiques de ces systèmes montre bien la forte relation qui existe entre l'homme et ces milieux depuis plusieurs siècles. Ce sont en effet les zones privilégiées pour les aménagements agricoles, mais aussi les premiers terrains transformés lorsque la place vient à manquer.

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.

Enjeux

Les constats de cette conférence ont été les suivants :

- 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 de ces milieux à une vitesse alarmante (aux États-Unis, on estime cette perte entre 800 et 1600 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.

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, Lefeuvre et Dame, 1994), 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.

Organisation et méthode

Dans notre démarche nous devrions nommer les "zones humides", terme traduit de l'anglais *wetlands*, plutôt "hydrosystèmes humides", dont la sémantique rappelle davantage l'objectif de notre travail sur cet objet d'étude, dans un contexte de gestion et de fonctionnement d'un système hydrologique. En effet, il est essentiel de décrire et de comprendre en premier lieu l'hydrologie du système bassin-versant et de la zone humide associée. Il est indispensable de se donner les moyens de connaître les flux et la dynamique des eaux de surface, pour aborder ensuite les calculs de bilans et obtenir des schémas de circulation qui serviront ensuite de base conceptuelle à une modélisation de ces systèmes.

Cette approche a deux conséquences :

- le besoin d'une connaissance scientifique,
- la capitalisation de cette connaissance pour son utilisation dans d'autres domaines, comme l'étude des systèmes biologiques, les relations avec les usages dans une société et l'implication dans une communauté d'acteurs (communication).

Le fil conducteur qui a été retenu comporte en outre deux caractéristiques majeures sur lesquelles il convient d'insister :

- à partir des cas d'étude de terrain, nous avons cherché à construire des concepts de fonctionnement de l'hydrosystème spécifiques de la zone d'étude et qui ont été progressivement généralisés afin de pouvoir traiter plus tard² un ensemble spatial (la côte des Guyanes) et temporel (depuis que l'on dispose des données hydrologiques). Nous sommes placés dans une démarche ascendante, partant du cas particulier vers le cas général ;
- à partir des problématiques "locales" nous avons cherché à identifier les données scientifiques et les types d'actions nécessaires pour conduire une démarche de gestion intégrée. Lors de cette identification, il est apparu indispensable de disposer de la "dimension spatiale" pour :
 - a) développer une connaissance spatialisée des milieux humides ;
 - b) spatialiser des paramètres hydrologiques et les éléments relatifs à l'approche intégrée (zonage fonctionnel, indicateurs, indices...).

² Perspectives de ce travail, projets :
 PNOG (Programme National Océanographie Côtier)
 PNZH (Programme National Zones Humides)

C'est ainsi que notre présentation s'est organisée en trois parties pour :

- réaliser un bilan de connaissance en hydrologie des zones humides appliqué au cas guyanais ;
- explorer un savoir-faire et une connaissance sur les données spatialisées multisources (télédétection) appliqué à l'hydrologie des zones humides tropicales ;
- intégrer ces éléments dans une démarche conceptuelle sur la gestion intégrée des milieux côtiers et de leurs zones humides.

Notre activité scientifique s'est appuyée sur les projets et les programmes de l'ORSTOM (Département des Eaux continentales) réalisés dans le cadre des missions de l'Institut. Un premier projet "Environnement côtier des Guyanes" a été mis en place en 1986, qui a donné lieu au colloque sur l'évolution des côtes de la Guyane et de la zone caraïbe méridionale pendant le Quaternaire (Symp. PICG 274) en 1990. Ce projet a largement contribué à la connaissance des milieux humides de la Guyane, présentés dans notre travail. La partie concernant la télédétection optique a été soutenue par les projets du laboratoire de traitement d'image de Cayenne dès 1987, puis, pour la partie radar, par le projet commun UPMC³ / BRGM d'utilisation des données du ROS⁴ de ERS1 en 1991 (ppF12/ESA⁵). Enfin, deux études d'impact sur l'environnement côtier (savane Sarcelle, Base spatiale de Kourou) ont fourni des exemples de problématiques qui ont conduit aux réflexions méthodologiques de la dernière partie.

³ Université Pierre et Marie Curie, J.P. Rudant, Laboratoire du Prof. Chorowicz

⁴ SAR : Synthetic Aperture Radar (radar à synthèse d'ouverture)

⁵ Projet pilote Agence spatiale européenne n°12

Chapitre 1 - Les zones humides et leur hydrologie

Introduction

L'hydrologie des zones humides naturelles et de leurs bassins-versants connexes est le domaine scientifique le plus important à saisir pour expliquer le maintien des équilibres, les causes des transformations, les types de sols, de végétation, la complexité globale statique et dynamique de ces milieux.

En domaine anthropisé, s'y ajoute le fait que les systèmes aquatiques font souvent l'objet de multiples usages dont les enjeux (santé publique par exemple) sont parfois générateurs de conflits.

Les études hydrologiques des zones humides sont donc indispensables à toute démarche s'inscrivant (le cas est de plus en plus fréquent) dans un contexte à finalité de gestion et d'aménagement. Leur hydrologie est aussi particulière, puisque les écoulements et les mouvements de masses d'eau nettement identifiés sont localisés aux apports du bassin amont dans le réseau de drainage et aux estuaires. Dans la majorité des systèmes, la "dynamique" des eaux se traduit plutôt en termes de variation de hauteur d'eau au cycle saisonnier ou annuel. Les variations observables sont assez lentes, compliquant le dispositif de mesure au sol.

C'est à partir de ce constat que la description des espaces humides demande de plus en plus de compléments d'informations, obtenus en partie grâce aux données satellitales.

Avant d'aborder l'apport des données multisources, nous étudierons dans cette partie la "zone humide" dans son contexte hydrologique.

1. Généralités

1.1. Définition des zones humides

La terminologie "zone humide" regroupe un nombre important de milieux différents, tant en zone continentale que côtière. La plupart de ces zones ont été souvent classées à "l'interface" de plusieurs milieux physiques et, par voie de conséquence, à l'intersection de plusieurs disciplines scientifiques qui ont su développer des recherches concernant leurs propres thématiques.

Aussi, comme le souligne Mitsch (1986), il s'agit d'un cas particulier à gradient continu entre les terres hautes et l'eau libre. De plus, le même auteur souligne que, si déjà beaucoup de milieux ont été étudiés, peu de mesures et de synthèses ont été réalisées surtout dans le domaine de l'hydrologie de surface, et encore moins en milieu tropical.

Tenter une définition de ces milieux va conduire à des choix arbitraires de critères dépendant des approches géographique, physique, biologique ou encore selon la législation en vigueur dans un pays. Aussi existe-t-il peu de définitions satisfaisantes sachant, par exemple, que les limites amont et aval seront dépendantes des disciplines scientifiques : par exemple, les tentatives s'appuyant sur la fréquence des inondations et leur durée ont induit des définitions particulièrement controversées.

Le désintéressement scientifique du passé explique cette lacune de connaissance, tout en ayant eu des conséquences irréversibles sur la gestion des zones humides. Pourtant, comme le soulignent J.C. Lefeuvre et R.F. Dame (1994), 50 % de la population mondiale vit à 50 km de la mer, et c'est sans doute là que les enjeux du XXI^e siècle seront les plus cruciaux avec, pour l'accentuer, le phénomène de remontée du niveau marin.

Dans les définitions formelles, il se dégage, à partir de deux besoins précis, une réponse spécifique et qui convient à deux groupes de spécialistes des zones humides : les scientifiques et les gestionnaires (Zinn et Copeland, 1982).

Les scientifiques vont s'intéresser aux définitions favorisant les classifications et les inventaires, tandis que les gestionnaires vont rechercher des définitions qui répondront aux besoins d'une législation et du contrôle des transformations de ces milieux.

C'est pour cette raison que l'on trouvera deux grandes familles de définitions.

Ainsi, en 1977, aux États-Unis, le fameux *US Army Corps of Engineers* donne la définition très générale suivante, dans la section 404 des *Clean Water Act Amendements* ⁶:

«Le terme "zones humides" désigne ces surfaces qui sont inondées ou aux sols saturés par les eaux de surface ou de nappe, pendant une durée et à une fréquence suffisantes pour maintenir, et ceci dans les conditions normales, la présence d'une végétation spécifique et adaptée aux milieux saturés. Les zones humides comprennent en général les marais, les marécages, les marais tourbeux et similaires».

Pour les scientifiques, la recherche d'une définition des zones humides va plutôt s'exprimer par une démarche basée sur la connaissance. La première étape est d'essayer une description selon les critères observables : réaliser une liste des milieux selon des critères physiques, chimiques, biologiques, hydrodynamiques... et d'arriver ensuite à une classification des milieux. Il se pose ici un problème de méthodologie fortement lié à chaque approche thématique, tout aussi important qu'un problème de terminologie qui permettra l'échange d'informations entre spécialistes.

A ce stade de recherche d'une définition des zones humides, nous avons préféré nous restreindre aux principaux termes utilisés par les anglophones, dont la traduction n'est d'ailleurs pas aisée puisque les termes utilisés sont très spécifiques des zones géographiques. Mitsch (1993) propose une liste de ces termes avec leurs définitions (annexe 2).

⁶ *The term "wetlands" means those areas that are inundated or saturated by surface or ground water at a frequency and duration sufficient to support, and that under normal circumstances do support, a prevalence of vegetation typically adapted for life in saturated soil conditions. Wetlands generally include swamps, marshes, bogs, and similar areas.*

1.2. Situation géographique et répartition

Les zones humides sont présentes sous tous les types de climat (fig. 1-1 et 1-2) et les premières estimations réalisées indiquent qu'elles recouvriraient 6 % de la surface continentale, soit 8,6 millions de km² (Maltby et Turner, 1983). D'autres évaluations comptabilisent 5,26 millions de km² (Matthews et Fung, 1987) en utilisant une base de données altimétrique de 1 degré de résolution, et 5,57 km² pour Aselmann and Crutzen (1989).

Ces évaluations à l'échelle mondiale posent déjà le problème des critères de définition des zones humides (cf. § Définition des zones humides)

Une première évaluation de l'étendue des zones humides dans le monde a été réalisée en fonction des types de climat (tab. 1.1) :

Tableau 1.1 - Répartition des zones humides mondiales selon la zone climatique.

Zone	Climat	Surface (km² * 10³)	Pourcentage de la surface continentale
Polaire	humide, semi-humide	200	2,5
Boréale	humide, semi-humide	2558	11
Subboréale	humide	539	7,3
	semi-aride	342	4,2
	aride	136	1,9
Subtropicale	humide	1077	17,2
	semi-aride	629	7,6
	aride	439	4,5
Tropicale	humide	2317	8,7
	semi-aride	221	1,4
	aride	100	0,8
TOTAL (arrondi)		8560	6,4

Source : d'après Bazilevich et al., 1971 ; Maltby et Turner, 1983 (traduit de Mitsch, 1993)

On constate que les zones humides tropicales et subtropicales représentent plus de la moitié du total (56 %), soit environ 4,8 millions de km².

Une liste (non exhaustive) des principales zones humides tropicales mondiales (tableau 1.2) montre que celles-ci sont distribuées dans des climats très contrastés, allant du semi-aride au climat tropical humide.

Fig 1-1

Fig 1-2

Tableau 1.2 - Liste des principales zones humides mondiales tropicales et subtropicales.

Continent	Pays	Nom	Situation
Afrique	Botswana	Delta de l'Okavango	continental
Afrique	Côte d'Ivoire	Grand Lahou à la front. Guinée	côtier
Afrique	Madagascar	Région A'Tondrazaka	continental
Afrique	Madagascar	Delta de la Betsiboka	côtier
Afrique	Mali	Delta intérieur du Niger	continental
Afrique	Mozambique	Côtes et delta du Zambèze	côtier
Afrique	Sénégal	Côte	côtier
Afrique	Tanzanie	Sud lac Victoria	continental
Afrique	Tchad/Niger/Nigéria/Cameroun	Lac Tchad	continental
Afrique	Zaïre	Bukama	continental
Afrique	Zaïre	Bazengele	continental
Afrique	Zambie	Luapula	continental
Amérique du Nord	Etats Unis	Everglades/Floride	côtier
Amérique du Nord	Etats Unis	Louisiane	côtier
Amérique du sud	Argentine	Rio Parana et province de Santa Fe	continental
Amérique du sud	Argentine	Région de Cordoba	continental
Amérique du sud	Argentine	Région Buenos Aires	côtier
Amérique du sud	Bolivie	Banados del Izozog	continental
Amérique du sud	Brésil	Delta Amazone	côtier
Amérique du sud	Brésil	Littoral du Rio Grande do sul	côtier
Amérique du sud	Brésil	Littoral de rio de Janeiro	côtier
Amérique du sud	Brésil/Bolivie/Equateur	Fleuve Amazone	continental
Amérique du sud	Brésil/Paraguay	Pantanal	continental
Amérique du sud	Colombie	Magangué	continental
Amérique du sud	Paraguay	Pr. Hayes - rio Paraguay	continental
Amérique du sud	Pérou	Rio Ucaya/ucayali	continental
Amérique du sud	Pérou	Rio Maranon	continental
Amérique du sud	Vénézuela	Province de l'Apure	continental
Amérique du sud	Vénézuela	Sud du lac de Maracaïbo	continental
Amérique du sud	Vénézuela	Delta de l'Orénoque	côtier
Asie	Bangladesh	Fleuve Brahmaputre	continental
Asie	Bengladesh	Delta Gange et Bramapoutre	côtier
Asie	Birmanie	Delta du Irrawaddy	côtier
Asie	Chine	Delta du Kiang	côtier
Asie	Chine	Marais saumâtres côtiers	côtier
Asie	Inde	Ggrands marais de Kutch	continental
Asie	Inde	Bassin de Betwa	continental
Asie	Inde	Rivière de Rihand	continental
Asie	Inde	Bahratur	continental
Asie	Inde/Bangladesh	Delta du Gange	côtier
Asie	Népal	Zones humides de Mai Pokhari	continental
Asie	Vietnam	Delta du Mékong	côtier
Australie	Australie	Côtes du gol. de Carpentarie	côtier
Australie	Australie	Région de la ville de Darwin	côtier
Indonésie	Papouasie/N. Guinée	Irian Jaya : zone Irian barat	continental et côtier
Indonésie	Papouasie/N. Guinée	Papouasie : delta du Fly	côtier
Indonésie	Sumatra	côte nord	côtier

Malaisie	Bornéo	Kalimantan	continental et côtier
Malaisie	Bornéo	côte Sarwak	côtier

Les zones humides sont largement réparties en milieu continental, notamment en Afrique et en Amérique Latine, souvent associées à de grands bassins fluviaux, tandis que les zones humides côtières identifiées sont plus nombreuses en Asie et sont associées aux zones de mangrove et aux grands deltas, comme celui du Gange par exemple. L'importance relative des grandes zones humides continentales n'est sans doute qu'une apparence puisque bon nombre de zones humides côtières n'ont pas été encore étudiées : par exemple, à l'échelle cartographique de cette investigation, les 4000 km² de zones humides de Guyane n'apparaissent pas.

1.3. Les études scientifiques : sujets et thématiques

Les différents éléments bibliographiques retenus montrent d'une façon générale qu'actuellement 20 % environ des travaux généraux portent sur la zone tropicale, l'essentiel des connaissances étant produit dans les pays industrialisés. Par ailleurs, l'investigation scientifique sur les zones humides est souvent réalisée par des botanistes, des sédimentologues, des hydrobiologistes. La discipline hydrologique intervient peu, sauf lors d'aménagements qui ont recours aux compétences de l'ingénieur. De même, l'introduction de la donnée "spatialisée" pour la description des milieux utilise aussi la photo-interprétation de documents aéroportés (Lieutaud et al., 1994), mais l'emploi des données de télédétection pour décrire ces milieux est encore assez peu utilisée.

En ce qui concerne les thématiques traitées, Dugan (1994) a analysé 1384 articles durant la période 1981-1990, dans six revues spécialisées. Les résultats (tableau 1.3, fig. 1-3) montrent la forte contribution de l'hydrobiologie en eau douce dans le domaine de l'écologie (744) et une beaucoup plus faible proportion de travaux sur les problèmes de gestion. On trouve encore moins de publications sur les grands thèmes actuels de recherche comme les variations du niveau des mer, les changements climatiques ou la valeur patrimoniale des milieux.

Pour citer cet auteur, "les vrais enjeux des 25 prochaines années, avec une pression démographique croissante, concerneront les politiques de gestion et d'aménagement des zones humides. Il est inquiétant de voir une communauté scientifique se consacrer assez peu à ces problèmes, risquant même de se marginaliser et de voir lui échapper l'occasion d'une contribution aux processus de décision."

Il est clair qu'il existe une demande sociale très forte en matière d'expertise, que seuls les scientifiques peuvent réaliser, et en même temps à laquelle nous ne sommes pas toujours préparés (Guide méthodologique d'aide à la gestion intégrée de la zone côtière, 1996).

Fig. 1.3

Tableau 1.3 - Distribution des thèmes traités dans six revues spécialisées sur la période 1981-1990 (d'après Dugan, 1994)

THEME	REVUE					
	Wetlands	Aquatic Biology	Freshwater Biology	Freshwater Ecology	Biological Conservation	Environmental Conservation
Ecologie zones humides	54	1	744	217	8	3
Gestion des ZH	42	3	17	2	7	
Gestion des espèces		7	8	1	128	12
Conservation des ZH	21	3	3		23	28
Gestion de l'eau	8	4	1		2	6
Niveau marin					1	
Changement du climat	1		1			2
Valeurs des ZH	8		1		1	3
L'homme et les ZH	8		1		1	3
TOTAL	142	18	776	220	171	57

Répartition géographique des études

La figure 1.4 illustre la répartition géographique des principales études présentées à la quatrième conférence "INTECOL" de 1992. Le partage entre "l'ancien monde" et le "nouveau" montre, quoi qu'il en soit, la concentration des études dans les pays du nord, le milieu tropical représentant 20 % du total. A noter l'absence d'information sur l'ex-Union soviétique, et deux études seulement au Venezuela dans la zone proche du plateau des Guyanes.

1.4. Présentation du site d'étude : la Guyane

- Le secteur géographique concerné appartient au "plateau des Guyanes" dont la superficie est de 467 000 km². Le département de la Guyane, situé entre 2° et 5° de latitude nord, a une superficie de 90 000 km². Deux fleuves, le Maroni et l'Oyapok sont frontaliers respectivement avec le Surinam et le Brésil. Tous les fleuves et les rivières coulent vers l'Atlantique, marquant ainsi leur individualité par rapport au bassin Amazonien, géographiquement voisin.

Fig 1-4

La géologie est celle d'un vieux socle érodé, composé de terrains volcano-sédimentaires et de roches éruptives et cristallines très anciens (Choubert, 1978), d'origine précambrienne (2700-2500 Ma.). La plaine côtière est par contre composée de sédiments récents quaternaires. Le relief du socle est marqué par des "mailles d'altération" (de 200 à 500 m de diamètre), et compris entre 100 et 300 m d'altitude, avec quelques rares sommets ne dépassant pas toutefois 800 m (inselbergs).

Le climat est de type tropical humide avec une température oscillant entre 22 et 31°C. La position de la Zone Intertropicale de Convergence (ZIC) conditionne le cycle hydro-pluviométrique, avec un épisode principal de la saison des pluies en mai-juin et un épisode secondaire de décembre à janvier. La pluviométrie moyenne inter-annuelle est comprise entre 2000 mm (à l'ouest) et 3500 mm (à l'est).

Le linéaire côtier est d'environ 320 km, de l'embouchure du fleuve Maroni jusqu'à l'embouchure du fleuve Oyapok, frontière avec le Brésil.

La zone côtière peut être divisée en deux sous-ensembles, séparés par la presqu'île de Cayenne (fig. 1.5) :

- à l'ouest, de Cayenne au Maroni, la zone côtière est étroite (5 à 8 km), comportant de nombreux marais côtiers, dont l'ensemble représente une superficie de 1270 km² ;
- à 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. La vue globale par la mosaïque radar ERS1 (fig. 1-6) met en évidence ces grands ensembles à l'est et le rétrécissement de la bande côtière vers l'ouest où l'on trouve les aménagements de riziculture (en triangle) dans la savane Sarcelle.

Par ailleurs, ce littoral exposé au grand courant côtier nord-amazonien qui porte au nord-ouest est soumis à d'intenses phénomènes de dépôt et d'érosion liés au transport des vases de l'Amazonie (fig. 1-7), entraînant l'ouverture ou la fermeture vers la mer de ces marais côtiers. Il en résulte une forte dérive vers le N-O des embouchures des fleuves et une plaine côtière où alternent des cordons sableux témoins d'anciennes lignes de rivage, orientés SE-NO, et des dépressions mal drainées.

De la mer vers la terre on distingue trois principaux ensembles (fig. 1.8, Boulet 1986) :

- la plaine côtière, dite "récente", à nombreux marais permanents,
- la plaine côtière, dite "ancienne", à savanes inondables,
- la zone de forêt sur socle, ou "Terres Hautes",

Le département de la Guyane possède une vingtaine de zones humides, réparties entre les plaines côtières ancienne et récente (fig. 1.5 et tableau 1.4) ; elles couvrent 4000 km² ; leurs caractéristiques sont fonction des échanges avec l'océan. Ces "contacts" océaniques sont liés au phénomène de sédimentation ou d'érosion, dont l'origine est le dépôt éventuel sous la forme de banc de vase, des sédiments amazoniens (Allison, 1993).

Fig 1-5

Fig 1-6

Fig 1-7

Fig 1-8

Tableau 1.4 - Principaux systèmes humides en Guyane

A l'est de Cayenne, 4 ensembles	
<ul style="list-style-type: none"> • marécages de Kaw et rivière de Kaw • marécages "Behague" et rivière Ouanary 	<ul style="list-style-type: none"> • estuaire de l'Approuague • estuaire du Mahury
A l'ouest de Cayenne, 18 ensembles	
<ul style="list-style-type: none"> • rivières de Cayenne et de Montsinnéry • crique Macouria • estuaire du Fleuve Kourou • crique des Pères • crique Passoura • crique Karouabo • estuaire de la Malmanoury • crique Paracou • estuaire de la Sinnamary 	<ul style="list-style-type: none"> • crique Toussaint • crique Yiyi • estuaire de la Counamama • estuaire de l'Iracoubo • crique Mamaribo • crique Organabo • crique Irakompapi • estuaire de La Mana • estuaire du Fleuve Maroni

Ces écosystèmes ont une alimentation en eau douce d'origine pluviale, mais également fluviale par les petits bassins-versants côtiers qui les alimentent. Les apports océaniques sont très diversifiés, entre l'entrée brutale d'eau salée (savane Sarcelle) lors de chaque marée, l'influence de la marée dynamique (variation de hauteur d'eau : Passoura) et les systèmes "endoréiques" d'eau douce (Karouabo), provisoirement fermés à la mer (pendant une dizaine d'années).

La spécificité de ces milieux naturels (faune et flore - botanique, annexe 3), en fait une zone d'une exceptionnelle richesse biologique, peu perturbée par l'activité humaine. Cette région tropicale est d'ailleurs reconnue comme étant l'une des dernières du globe à demeurer quasiment non anthropisée. Les propositions actuelles de stratégie de conservation du milieu s'appuient sur le concept de maintien de la biodiversité : diversité des habitats, des espèces et de leur génétique. Les stratégies d'aménagement sont en cours de définition et, compte tenu de cette spécificité, on peut, pour une fois, avancer l'idée d'une planification "préventive" de l'aménagement des zones humides.

Les dénominations réservées à ces espaces en Guyane sont très nombreuses et se prêtent parfois à des confusions : il s'agit, au gré des auteurs, soit de "marais" ou de "marécages boisés", soit de "savanes mouillées" ou encore de "pripris". Dans certains cas, ces zones hydromorphes s'étalent immédiatement en arrière d'un étroit cordon littoral ; dans d'autres cas, elles se trouvent à l'intérieur des terres, à une distance variable de la mer. Le terme de "savane" est descriptif : il désigne seulement le paysage ouvert, par opposition à la mangrove d'une part et, d'autre part, aux forêts-galeries ou forêts de sommets de cordons littoraux, qui cloisonnent ces espaces paraliques : sont-ils des "swamps" ou des "marshes" ? Les critères de différenciation sont nombreux, appuyés à la fois sur les groupements végétaux, l'hydrologie, la salinité, la topographie et la pédologie (tableau 1.5) :

- les *swamps* sont des zones inondées ; l'expression *swamp forest* est utilisée par De Granville (1986) pour des marécages boisés de la plaine côtière, inondés en permanence par une eau douce ;
- les *marshes*, inondables, se développent dans un milieu d'eau saumâtre (marais maritime : *salt marsh, brackish marsh*) ou d'eau douce (*fresh-water marsh*, souvent avec des tourbières). De Granville considère que la forêt marécageuse et la pinotière sont des types

de *marsh forest* situés sur des sols temporairement hydromorphes et partiellement exondés (saison sèche).

Tableau 1.5 - Espaces paraliques sub-côtiers (Prost, 1988)

	Hydromorphie	Modelé	Type	Qualité de l'eau
Swamps	zone inondée	zone basse	marais marécages boisés	saumâtre / douce souce
Marshes	zone inondable	plus haute criques, cheniers	marais palmier-bâche pinotière forêt marécageuse	saumâtre / douce douce douce

En Guyane, un même marais peut être à la fois un *swamp* et un *marsh*.

On constate finalement que la terminologie est souvent spécifique des pays et des climats où ces milieux ont été décrits pour la première fois. Dans un souci de clarté et de logique, nous nous proposons, avant de définir les "zones humides", de trouver des caractères génériques à ces zones, donc d'identifier des critères de classification et d'entrer tout d'abord dans la description des milieux et de leur fonctionnement. La classification proprement dite sera abordée dans la troisième partie.

2. Description et fonctionnement hydrologique des zones humides

L'hydrologie des zones humides se situe dans des conditions physico-chimiques particulières qui confèrent à ces écosystèmes des propriétés différentes de celles des autres systèmes aquatiques et des bassins bien drainés. Pluviométrie, hauteurs d'eau, durée et fréquence des inondations, réseau hydrographique, marées sont autant de paramètres résultant des entrées et des sorties dans le système hydrologique et qui lui confèrent ses propriétés. De ce fait, l'hydrologie est le domaine le plus important dans la mise en place et la permanence des caractères spécifiques des zones humides et de leur fonctionnement.

Les paramètres hydrologiques vont conditionner directement les propriétés physico-chimiques des eaux, la disponibilité en nutriments, l'oxygénation, la salinité du substrat, la chimie des sédiments et le pH. La réponse biologique du système et sa production seront donc directement liées aux flux hydriques. De ce fait, pour un environnement hydrologique semblable d'année en année, on peut s'attendre à une structure et un fonctionnement stables d'une zone humide donnée (W. Mitsch, 1986). Néanmoins, la grande variabilité spatiale et temporelle des averses en milieu tropical (Manton et Bonell, 1993) peut, selon nous, ne jamais présenter ces similitudes annuelles.

2.1. Le concept "d'hydro-période"

Ce concept est utilisé pour définir la "signature hydrologique" de chaque type de zone humide, à une échelle saisonnière ou annuelle. Cette oscillation du plan d'eau est spécifique de chaque zone ; c'est aussi le résultat synthétique des entrées et des sorties. On peut ainsi utiliser cette caractéristique liée au cycle hydrologique pour classer les zones humides. On distinguera deux grandes catégories selon qu'il y a influence ou non de la marée océanique.

La figure 1-9 présente l'hydro-période annuelle de trois postes de mesure de hauteur d'eau dans les marais côtiers guyanais. Sur les stations principales (Karouabo, Passoura), les variations notables de hauteur d'eau, de décembre à juillet, engendrent des écoulements provenant du bassin-versant forestier, tandis qu'à l'étiage, on constate une variation du plan d'eau sur la Passoura due aux cycles de 14 j de la marée océanique. La station de Soumourou présente les mêmes caractéristiques d'hydro-période que la Passoura, mais en plan d'eau ouvert, sans écoulements mesurables.

Ce type d'approche qualitative peut être complété par la notion de durée et de fréquence d'inondation, c'est-à-dire le nombre d'inondations sur une période de temps donné, en un lieu donné.

Mitsch et Gosselink (1993) classent les hydro-périodes par rapport à la durée d'inondation, en y ajoutant l'influence de la marée.

Pour les régimes hydrologiques des systèmes soumis à la marée (exemples : Passoura, Soumourou), on peut distinguer quatre classes :

- a) subtidal : influence quotidienne de la marée ;
- b) irrégulièrement exposé : moins d'une fois par jour ;
- c) régulièrement inondé : crues fréquentes et influence de la marée au moins une fois par jour ;
- d) irrégulièrement inondé : crues intermittentes et influence de la marée moins d'une fois par jour.

Pour les régimes hydrologiques des systèmes non soumis à la marée (ex. : Karouabo), on peut distinguer six classes :

- a) inondation permanente, toute l'année, sans discontinuité interannuelle ;
- b) inondation permanente, toute l'année, sauf épisodes très secs ;
- c) inondation semi-permanente, nappe phréatique toujours proche de la surface ;
- d) inondation saisonnière suivant le régime pluviométrique ;
- e) saturation permanente ;
- f) temporairement inondé : les zones d'eau libre apparaissent quelquefois dans l'année. La nappe phréatique est bien en dessous de la surface du sol ;
- g) peu inondé : sans périodicité saisonnière.

Ainsi, dans les plaines d'inondation tropicales en milieu continental, ce sont les régimes hydrologiques des bassins-versants amont qui vont donner leurs caractéristiques principales au plan d'eau.

Fig 1-9 couleur

dos de Fig 1-9

2.2. Bilan global

Pour effectuer un bilan global, il faudra estimer les variations de volume des réservoirs de stockage en fonction des entrées et des sorties.

Un bilan annuel, proposé par Mitsch W. (1986), s'exprime de la façon suivante (fig. 1-10) :

$$\Delta h = P_n + S_i + G_i - ET - S_o - G_o \pm T$$

- Δh : variation de hauteur d'eau dans la zone humide par an
- P_n : précipitation nette (Précipitation P moins Interception I, cf. § 2.2.1)
- S_i : entrées de surface
- G_i : entrées souterraines
- ET : évapotranspiration
- S_o : sorties de surface
- G_o : sorties souterraines
- T : entrées (+) sorties (-) dues à la marée.
- I : interception par la végétation
- P : précipitation totale

Les principaux termes d'un bilan hydrologique sont exprimés dans cette formulation. Ces bilans sont fondamentaux pour la compréhension du fonctionnement des zones humides et permettent d'apporter une information complémentaire pour caractériser ces zones et les classer. Néanmoins, la mesure de terrain est souvent difficile à réaliser, et l'on ne dispose jamais de tous les termes du bilan. De plus, certains paramètres peuvent avoir une variabilité temporelle importante, comme les apports par débordement de berge ou bien une forte variabilité spatiale, comme la conductivité hydraulique du sol qui conditionnera la circulation des eaux souterraines. La figure 1-11 illustre ces problèmes, notamment celui de la quantification : toutes les valeurs exprimées en équivalent "hauteur d'eau" et qui contiennent la notion de flux (débordements, débits entrants...) nécessitent la maîtrise des surfaces contributives. C'est dans cette connaissance des surfaces que la télédétection pourra apporter une information complémentaire, en particulier dans la cartographie des plans d'eau libre ou couverts de peu de végétation, qui sont aisément détectables tant dans le domaine de l'infrarouge que du radar par exemple.

Le tableau 1.6 présente quelques bilans hydrologiques issus de la littérature. Ces bilans ne "bouclent" pas tous, ce qui peut s'expliquer soit par des termes qui n'ont pas été évalués, soit par des expérimentations qui n'ont pas pu être réalisées sur les cycles annuels complets.

Fig. 1-10

**Tableau 1.6 - Bilan hydrologique annuel de quelques zones humides
en tous types de climats (en mm/an)**

	P	Pn	I	Si	Gi	ET	So	Go	T	Δh
a	1050	740	310	2290	220	720	2320	210		0
b	380			5760	avec T	670	6530		1310	250
c	1210					1080	900	280	510	-540
d	370			400		640		180		-50
e	1310			avec Gi	390	930	730	40		0
f	1020			avec Gi	380	490	1000			-90
g min	890					860	50	50		-70
g max	1800					990	790	60		-40
h	1450					1020	avec Go	240		190

- a : marais à *Taxodium* de plaine alluviale ; sud Illinois (Mitsch, 1979)
- b : marécage côtier du lac Erié ; Ohio, de mars à sept. 1988, année sèche (Mitsch et Reeder, 1992)
- c : marais à palétuviers blancs ; Floride (Twilley, 1982, cité par Brown, 1990)
- d : marécages herbeux de bas-fonds ; North Dakota (Shjeflo, 1968, cité par Winter, 1989)
- e : zone humide d'Okefenokee (Georgia, Rykiel, 1984)
- f : marécage ; nord du pays de Galles (Gilman, 1982)
- g : Green Swamp ; Floride (Pride et al., 1966, cité par Carter et al., 1979)
- h : Thoreau's Bog ; Concord, Massachusetts (Hemond 1980, cité par Brown 1990)

De tels bilans n'ont pas été encore réalisés en Guyane, faute de moyens pour réaliser les mesures de terrain. Les zones humides guyanaises ont été considérées, comme la plupart des zones humides (annexe 1), comme difficiles à mettre en valeur et pénalisées de surcroît par leur situation tropicale.

2.2.1. Précipitations

Les quantités d'eau précipitées totales (P) vont subir plusieurs processus qui ont été déjà décrits en forêt naturelle : interception par la canopée, interception (I), égouttage (TF = *throughfall*), ruissellement le long des troncs (SF = *stemflow*). Certains auteurs (Heimburg, 1984 ; Mitsch Dorje et Weimhoff, 1979) isolent ces processus et proposent le concept de pluie nette, (Pn⁷) qui correspond à la somme des termes de la quantité de pluie qui arrive au plan d'eau :

$$P = I + TF + SF$$

la pluie nette est alors : $Pn = P - I$

$$\text{soit : } Pn = TF + SF$$

⁷ différent de la définition classique des hydrologues

Fig. 1-11

En hydrologie continentale, le terme de "pluie nette" a été défini comme la partie de l'averse qui a ruisselé, c'est-à-dire le volume de l'averse diminué des volumes infiltré, évaporé et intercepté. Ce volume correspond à la quantité d'eau ruisselée et mesurée sur un hydrogramme (Roche M., 1963). Par ailleurs, les hydrologues ont, depuis longtemps, identifié les processus qui permettent de définir et de modéliser le cycle de l'eau d'un bassin-versant (Modèle Hydrologique Européen, fig. 1-12). Certains termes sont encore non modélisés et du domaine de la recherche, mais l'apport de la science hydrologique à la compréhension et à la connaissance du système "zones humides" est indispensable.

Les deux définitions de la pluie nette procèdent de la même idée : retrouver des concepts qui expriment directement la cause de la variation du plan d'eau (du marais d'une part et de la crue de la rivière d'autre part). Ceci s'explique aussi par le fait que l'approche quantitative de l'hydrologie de surface est plus difficile à pratiquer dans les milieux humides où ne sont observables que les variations de hauteur d'eau et où la quantification des débits, des volumes et des transferts d'eau est pour l'instant encore difficile à apprécier, sauf à partir de mesures de terrain coûteuses.

Les bilans et les mesures sur les bassins-versants forestiers donneront toutefois des références très utiles pour évaluer le facteur "interception par la végétation". Une centaine d'études, la plupart en zone tempérée, sont mentionnées par Fritsch (1992), qui a effectué une synthèse pour le milieu tropical humide (tableau 1.7). Dans ces études, on mesure la pluie incidente totale dans une clairière (Pia), et la pluie sous forêt nommée "précipitation interne" (Pif), à l'aide de pluviomètres. La hauteur de pluie interceptée par le feuillage (Itf) est obtenue par soustraction. Certaines expérimentations ont été complétées par une mesure du ruissellement direct sur les troncs (Elt).

Tableau 1.7 : valeurs annuelles de quelques estimations de l'interception en milieu tropical (Fritsch, 1992)

Site	Pia (mm)	Pif (mm)	Pif (%)	Itf (mm)	Itf (%)	Elt (mm)	Elt (%)	Référence et formulation
Manaus (Brésil)	2570	2062	80,2	508	19,8	-	-	Franken et al. (1982a)
Manaus (Brésil)	1706	1338	78,4	362	21,3	6	0,3	Franken et al. (1982b) (1)
Venezuela	3664	3188	87	184(*)	5	292	8	Jordan et Heuveldop (1981)
Tanzanie	839	694	83	137	16,3	8	1	Jackson (2) (1975)
Cr. Grégoire (Guyane)	3060	2590	85	470	15	<30	<1	Roche M.A. (1982a)
ECEREX (Guyane)			92,8		6,6		0,6	Ducrey et Finkelstein (1983)(3)

(*) Itf anormalement bas et Elt très élevé selon l'auteur de la synthèse

Formulation analytique :

(1) : $Pif = 0,82 \cdot Pia - 2,44$ (en mm, à l'échelle hebdomadaire)

(2) : $Itf = 0,5419 \cdot \ln(P) + 0,85$ (averse P)

(3) : $Pif = 0,909 \cdot Pia - 0,16$ (échelle journalière) $r^2 = 0,993$ $n = 135$

Fig 1-12

Tous les auteurs notent la difficulté de mesurer ces grandeurs, qui dépendent de la variabilité interannuelle, de l'hétérogénéité du couvert forestier, ainsi que du dispositif de mesure (période observée, nombre de pluviomètres). Fritsch (1992) a fait une simulation de la précision de l'estimation de la précipitation interne et de l'interception au risque de 0,1 en fonction du nombre de pluviomètres : pour 10 pluviomètres, l'erreur sur la précipitation interne serait de 14 %, et 97 % pour l'interception ; avec 100 pluviomètres : 4,7 % sur la Pif et 32 % sur l'If.

Ces valeurs montrent des ordres de grandeurs intéressants pour le milieu tropical humide : environ 84 % de la pluie traverse la canopée, 16 % est interceptée, et moins de 1 % ruisselle le long des troncs. Bien que de structures forestières différentes, en termes de bilan, il apparaît donc inutile de mesurer, en forêt secondaire de zones humides tropicales, le terme "SF" (*stemflow*) ; la pluie nette (Pn), définie plus haut, devient alors la "Précipitation interne (Pif)".

2.2.2. Evapotranspiration

Lee (1980) admet qu'il n'y a pas de relation simple pour évaluer l'évapotranspiration réelle (ETR) dans les zones humides, soit à partir des données météorologiques, soit à partir de données d'évapotranspiration potentielle (ETP).

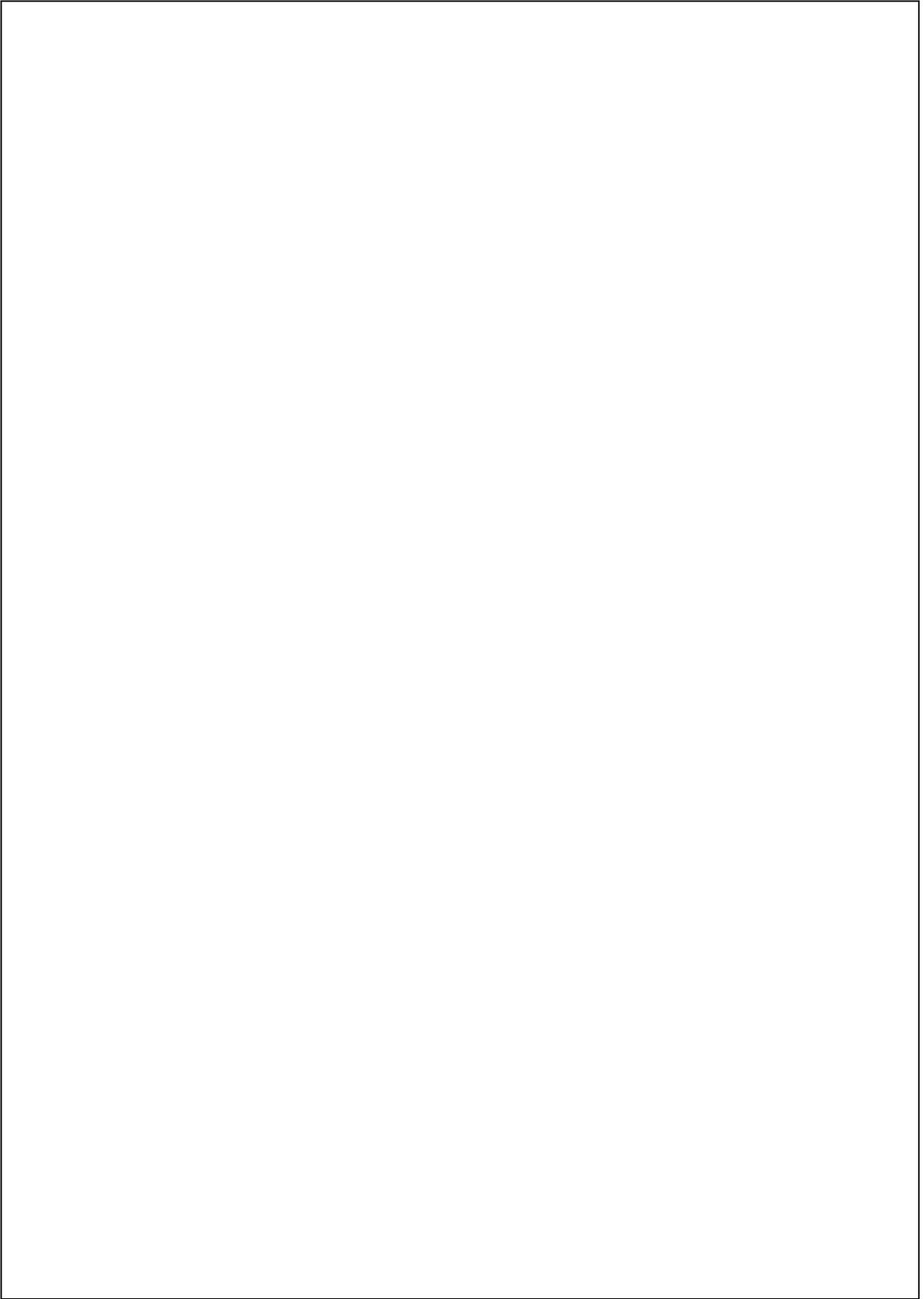
En milieu tropical humide forestier, dans des conditions géologiques particulières (socle cristallin non fracturé, donc considéré comme quasiment imperméable), le bilan annuel sur les bassins-versants permet d'attribuer le déficit d'écoulement (DE) d'un bassin à l'ETR (DE = pluie - écoulements mesurés), à condition de bien connaître la pluviométrie moyenne. Comme de tels bilans n'ont pas encore été réalisés pour les zones humides tropicales, il est utile de citer les valeurs correspondant aux forêts tropicales humides.

Tableau 1.8 - Déficit d'écoulement assimilable à l'ETR sur des bassins-versants tropicaux, à l'échelle annuelle (valeurs moyennes).

Zone	DE assimilable à l'ETR (mm)	Surface BV (km ²)	Référence
Manaus (Brésil) bassin INPE	1496	23,5	Leopoldo et al. (1982b)
Grégoire (Guyane)	1437	12,4	Roche M.A. (1982a)
	1528	8,4	
Guyane	1460 (au sud) 1560 (au nord)	131 000	Roche M.A. (1982b)
Congo	1395	3,8. 10 ⁶	Bernard (1953)

(Source : Fritsch, 1992)

Une approche à l'échelle journalière a été réalisée par Brown (1981) qui mesure le contenu en vapeur de l'air au-dessus d'un marais, et par Mitsch et al. (1977) et Heimburg (1984), qui mesurent les variations diurnes de la surface piézométrique et le niveau du plan d'eau d'un marais. La figure 1-13 montre un effet de pompage de l'eau par la végétation durant la journée et un taux de recharge constant de minuit à 4 heures du matin. Cette mesure montre que l'évapotranspiration est négligeable vers minuit. Pour utiliser cette méthode, le niveau d'eau doit être proche de la zone racinaire, comme c'est le cas dans de nombreuses zones humides.



Une question n'est cependant pas réglée : la présence de végétation augmente-t-elle l'évaporation par rapport à une nappe d'eau libre ? Les données de terrain fournissent des réponses opposées. Eggelsmann (1963) indique que les marécages tourbeux d'Allemagne ont une évaporation inférieure à celle de la nappe d'eau libre correspondante, sauf durant les mois d'été, alors que Hall et al. (1972) montrent qu'une zone humide du New Hampshire perd 80 % d'eau en plus que la nappe d'eau libre. D'autres exemples montrent cette opposition.

De même, en milieu guyanais, des mesures d'évaporation de nappe d'eau libre (bac classe A) indiquent la forte amplitude du paramètre selon la situation de la mesure :

- station climatologique côtière (valeurs interannuelles) : 1800 mm,
- clairière en forêt : 910 mm ,
- sous forêt : 80 mm (Hoeppfner, 1974).

Ici, la situation géographique a son importance par rapport au facteur vent qui est très faible en forêt.

Pour approcher cette réalité, il existe depuis longtemps plusieurs méthodes de calcul de l'évaporation (loi de Dalton), de l'ETP (Turc, Thornthwaite, Penman), que nous citons pour mémoire.

Le type de végétation couvrante a une incidence assez grande sur l'évaluation de l'ETR des zones humides, mais le problème le plus épineux concerne surtout le choix d'une méthode expérimentale. L'approche des bioclimaticiens, associée parfois aux données de télédétection (cf. partie 2), apporte quelques réponses, tant dans le domaine expérimental que dans celui de la modélisation.

2.2.3. Entrées et sorties de surface

• Les entrées de surface

Les zones de bas-fond sont sujettes à deux types d'entrée, soit par les surfaces libres, soit par le réseau de rivières ou de chenaux :

- les ruissellements de surface qui se produisent après les pluies, et les apports de la pluie aux nappes d'eau libre ;
- les apports par les bassins-versants et leur réseau hydrographique, et les entrées par les chenaux de marée.

Ces processus contribuent à l'apport d'énergie hydraulique et d'éléments nutritifs qui, dans les zones côtières, vont jouer un rôle sur la salinité des sols et leur anoxie.

La quantification des apports internes par le ruissellement à la zone humide est difficile à estimer sans un important dispositif de mesure. Elle constitue pourtant un terme important dans le bilan global du système humide. Il faut également citer le phénomène de débordement de berge, qui peut apporter des volumes conséquents, surtout dans certains cas spécifiques d'entrée par chenaux de marée en vives eaux (fig. 1-14).

Lorsqu'on ne dispose pas de mesures, l'évaluation des volumes entrants dans les zones humides (c'est-à-dire à l'exutoire des bassins-versants) par les méthodes utilisant le coefficient de ruissellement ($V = \text{pluie} * \text{surface} * \text{coef.}$; Mitsch et Gosselink, 1993) n'est que très approximative, voire déconseillée si le bassin est hétérogène. Il est recommandé d'utiliser des méthodes d'ingénieur plus fiables, qui intègrent la morphologie du bassin-versant, comme par exemple les méthodes Puech et Chabi Gonnin (1983) ou Ribstein et Rodier (1990).

Fig. 1-14

L'étude des entrées de surface dues aux petits bassins-versants côtiers de Guyane alimentant les zones humides est encore très parcellaire (environ la moitié des systèmes bassins estuaires a été étudiée). Parmi les quelques bassins côtiers jaugés, ceux de la Karouabo et de la Passoura (environ 100 km²) ont été suivis pendant 5 ans. Le bilan hydrologique interannuel permet de calculer leur débit spécifique et de les intégrer à la courbe débit spécifique / surface (fig. 1-15) qui suit une loi logarithmique (Dubreuil et al., 1964). Malgré la présence de quelques savanes en aval de ces bassins, la relation demeure satisfaisante. Ceci permet, dans le cas de bassins non mesurés, d'évaluer les apports moyens annuels à la zone humide.

- **Les sorties de surface**

Ces sorties s'effectuent principalement par les chenaux et les drains.

Le calcul des volumes extraits peut être obtenu par recours aux formules classiques de l'hydraulique, comme la formule de Manning qui nécessite la connaissance de la géométrie du chenal. Notons que, dans cette formule, il est nécessaire de connaître la pente de la ligne d'eau, ce qui demande, en toute rigueur, au moins une intervention de nivellement des échelles dans les vasières. Par ailleurs, les valeurs de référence sont fortement éloignées du domaine habituel du bassin-versant, puisque les pentes et les vitesses d'écoulement sont très faibles dès que l'on s'écarte de l'influence marine directe.

Il est toujours préférable de réaliser des mesures par jaugeages et, mieux encore, d'installer une échelle ou un limnigraphe et d'étalonner la section. Lorsque les chenaux sont soumis à l'onde de marée et qu'ils deviennent suffisamment importants, les méthodes de quantification des flux pratiqués en estuaire sont tout à fait utilisables.

Ces méthodes ont été employées dans la savane Sarcelle, près de Mana (annexe 6). La sortie en mer de ce marais est évidemment soumise à la marée. Des séries de jaugeages en continu ont permis de calculer les flux entrants et sortants, en fonction de la hauteur d'eau enregistrée (fig. 1-16). On calcule ensuite les volumes de flot et de jusant, que l'on relie au coefficient de marée (fig. 1-17).

Enfin, pour déterminer les flux sortants attribués uniquement au "bassin-versant" du marécage, on filtre l'effet de la marée, par l'étude des cotes journalières en fin de jusant (fig. 1-18). La relation obtenue entre la cote du plan d'eau et le volume d'eau libéré vers la mer est ici exponentielle. Cette méthode a été également employée sur le bassin-versant de la Passoura, avec des résultats identiques (annexe 8).

2.2.4. Eaux souterraines

Les eaux souterraines peuvent avoir une grande importance dans le fonctionnement des zones inondables. Dans certains cas particuliers, faute de mesures leur présence pourra être négligée pour un premier bilan.

Novitzki (1979) a identifié six cas génériques (fig. 1-19)

- a : niveau piézométrique en équilibre avec le plan d'eau du marais : ni entrées, ni sorties ;
- b : niveau piézométrique supérieur à l'amont : flux entrant supérieur au sortant (élévation du niveau du plan d'eau) ;
- c : niveau piézométrique supérieur à l'amont et inférieur à l'aval : entrée et sorties d'eaux souterraines quasiment équivalentes (circulation) ;
- d : niveau piézométrique totalement au dessus du plan d'eau : pas de sorties et stockage dans la zone humide ;
- e : niveau piézométrique au dessous du plan d'eau : pas d'entrées, la zone humide est "perchée" et alimente la nappe ;

Fig 1-15

Fig 1-16

Fig 1-17 & 1-18

Fig 1-19

f : affleurement de la nappe : ni entrées ni sorties identifiables. Les eaux souterraines s'écoulent latéralement sans atteindre la surface et leur proximité induit des effets en surface se traduisant par une végétation typique de zone humide.

En dépit de l'importance des eaux souterraines dans le bilan hydrologique des zones humides, il faut bien admettre que c'est un domaine encore mal connu en général, et en particulier dans les sols organiques.

Pour passer à la quantification des flux, on peut utiliser la loi de Darcy ($Q = k.a.s$) qui comporte les paramètres physiques suivants : la pente de la surface piézométrique (s, ou gradient hydraulique), la conductivité hydraulique (k, ou perméabilité) et la surface de la section considérée (a).

Le tableau 1.9 donne quelques valeurs de perméabilité ou conductivité hydraulique pour des états de surface caractéristiques de zones humides. Celles-ci varient en fonction du contenu en fibres naturelles. La perméabilité du sol peut être calculée en fonction de ce contenu en fibres ou de la biomasse. En général, dans les sols organiques, la conductivité hydraulique décroît avec le contenu en fibres, c'est-à-dire au fur et mesure du processus de décomposition. Le type de plantes en décomposition constitue également un facteur important selon Williams et Ingram (1975) qui notent des ordres de grandeurs variant de 10 à 1 m/s.

La présence de circulations dans les sols des zones humides est souvent une source d'éléments dissous et de nutriments, ou encore un facteur de dilution des eaux saumâtres par un apport d'eau douce.

Tableau 1.9 - Conductivité hydraulique de quelques milieux

Nature de la zone humide	Conductivité en cm/s *10 ⁻⁵	Référence
Tourbières U.Kingdom Amérique du Nord Russie (carex-fen, 0-50cm)	0,02-0,006 1,2-150 310	Ingram, 1967 Verry et Boelter, 1979 Romanov, 1968
Marais côtiers Great Sippewissett Marsch conductivité verticale transition sable-tourbe	1,8 9,4	Hemond et Fifield, 1982
Sols non tourbeux Cypress Dome, floride argile légèrement sableuse sable Okefenokee Swamp bassin-versant (Géorgie) alluvion Seine	0,02-0,1 30 2,8-834 2,5-8,5	Smith, 1975 Hyatt et Brook, 1984 Tajjar, 1993
Milieux typiques Argile Calcaire sable	0,05 5 5000	Linsley et Francini, 1979

(source : Rycroft et al., 1975 ; Mitsch et Gosselink, 1993 ; Fustec et Frochot, 1995)

Dans la plaine côtière guyanaise, quelques rares études permettent de préciser les relations entre le réseau de drainage et la nappe. Les analyses sont pour la plupart qualitatives et procèdent de l'analyse pédologique (Turenne, 1975 ; Boulet et al., 1982). Deux milieux distincts s'individualisent nettement :

- dans la basse plaine côtière, non loin des marais permanents, on constate que le réseau est fortement structuré autour des barres pré littorales quand elles sont présentes. Il existe de longs cheminements parallèles aux barres qui se dirigent vers les drains actifs ("criques", rivières). Dans les espaces inter-barres, le système de drainage y est le plus souvent perpendiculaire, avant de rejoindre le système d'interfluves parallèles aux barres. En amont des marais côtiers, lorsque les barres sont absentes, le réseau observé se dirige vers les marais côtiers, selon une orientation "naturelle" de plus grande pente, c'est-à-dire vers la mer. La nappe semble donc toujours très proche de la surface, dans des milieux quasiment saturés en permanence. Selon l'analyse de Novitzki (1979), exposée plus haut, les cas de figure correspondants seraient "a", "b" et "f" ;
- dans la haute plaine côtière, comme par exemple dans les grandes savanes de Kourou ou vers la zone du site Diane, le système d'interfluves est totalement différent de celui de la basse plaine côtière : il n'existe pas de direction préférentielle et l'on observe plutôt une structure "maillée" (voire anastomosée) dont le sens des écoulements est parfois difficile à déterminer. Ces systèmes ont été bien analysés par Boulet et al. (1982), qui expliquent cette complexité par une podzolisation des barres plus avancée, en relation avec un aplanissement du relief et une ramification plus importante du réseau d'interfluves.

Néanmoins, après des trajets assez longs, le réseau finit par se "connecter" géométriquement aux systèmes de drains actifs. Il est cependant souvent difficile d'établir une limite nette de partage des eaux, entre les savanes s'écoulant vers les drains, même en s'appuyant sur les informations topographiques des cartes IGN au 1/25 000e.

Dans ces systèmes d'interfluves, également décrits par Turenne (1975) et Andrieux (1990), la dynamique de l'eau est encore difficile à préciser. Il existe peu de mesures physiques de terrain permettant de préciser la dynamique latérale de l'eau et de décrire le fonctionnement hydrodynamique des interfluves alimentant les marais.

Récemment, Andrieux et al. (1996) ont étudié un interfluve de la plaine côtière ancienne dans la Savane de Corossony (non loin de Sinnamary). Ces auteurs montrent que l'interfluve peut être considéré comme hydrauliquement isolé des apports voisins appartenant aux zones de socle et que la dynamique de la nappe phréatique est sous la dépendance directe des pluies locales : ainsi, la recharge de la nappe s'effectue par le système d'interfluves. Les valeurs de conductivité hydraulique ("oblique", résultante des composantes horizontale et verticale) mesurées à la tarière à charge variable, sont comprises entre 10^{-4} et 10^{-6} m.s⁻¹, c'est-à-dire que les transferts d'eau s'effectuent à des vitesses de l'ordre de 3 heures à 12 jours, pour 1 mètre de terrain. Nous serions alors dans les cas "c", "d" ou "e" de la classification de Novitzki.

Il apparaît que le système d'interfluves est un ensemble essentiel à considérer dans le système d'alimentation et de "soutien" du niveau d'eau des marais. En effet, la plupart des systèmes d'interfluves sont saturés en quasi-permanence, assurant une continuité hydraulique entre les pluies arrivant au sol, la nappe phréatique et les circulations superficielles.

2.2.5. Marées

Parmi les termes du bilan hydrologique, les marées peuvent avoir une importance prépondérante par la grande quantité d'eau océanique qui peut être mise en jeu quotidiennement dans les marais.

Le phénomène périodique de la marée et les phases d'inondation qui en résultent pour les zones humides proches de la côte peuvent être séparés en deux types d'effets observables dans les chenaux (Bellesort et Migniot, 1972) :

- flux d'eau salée, avec variation de niveau d'eau et déplacement des masses d'eau. Le "contact" entre l'eau douce et l'eau de mer s'effectue en général par l'effet de "coin salé" en

estuaire (fig. 1-20 a et b) et peut, selon la morphologie, se traduire en surface par une zone de contact agitée accumulant les petits débris végétaux ;

- variations de niveau d'eau, sans circulation de masses d'eau, correspondant à la propagation d'une onde de variation des hauteurs. Ce cas est typique des estuaires, mais on peut aussi le retrouver dans les zones humides littorales lorsqu'elles sont en continuité hydrodynamique avec l'océan.

Du point de vue qualitatif, les marées ont des effets pouvant aller jusqu'au stress de la végétation par submersion, ou encore par sursalure (Blasco, 1991) et appauvrissement des éléments nutritifs par lessivage. Dans d'autres cas, la marée peut rétablir des conditions d'aérobie, apporter des nutriments, ou encore transformer la sédimentation.

Les types de marée

Un typologie peut s'appuyer sur deux clés de description :

- les propriétés *géographiques* : selon la zone du globe, elle sont diurnes ou semi-diurnes. Les amplitudes sont également très variables (de 0,5 à 12 mètres) ;
- propriétés *temporelles* : en plus du cycle proche de 12 heures, il faut citer les variations d'amplitude de 14 jours de période (syzygies, fig. 1-14), ou marées de mortes et vives eaux, qui ont des effets importants sur les zones humides. Parmi les 27 composantes luni-solaires explicatives du mécanisme de la marée, Rouch (1948) et Gougenheim (1954) montrent qu'il en existe 3 de longue période qui entraînent des variations d'amplitude sur des cycles semi-annuels et annuels (182 et 365 jours), et pluriannuels (18,6 années). Ce dernier cycle affecte l'amplitude d'une variation de $\pm 4\%$. Bien que faibles, ces variations peuvent prendre des valeurs décimétriques et avoir leur importance dans des zones très plates, comme le sont beaucoup de zones humides côtières, et être explicatives de variations à l'échelle pluriannuelle.

En Guyane, la proximité du littoral et des bassins-versants étudiés, nous conduit à fournir quelques éléments sur le "signal océanique", que l'on retrouvera déformé, déphasé, sur certains enregistrements de hauteur d'eau. Ces effets perturbent et compliquent l'estimation des débits des chenaux à marée par les méthodes classiques.

On relèvera différentes périodicités de phénomènes marins :

- marée semi-diurne (période : 12 heures environ) ;
- syzygies (période : 14 jours, entraînant les variations d'amplitude dites de "mortes eaux" et de "vives eaux") ;
- inversion des hauteurs maximales du matin et du soir (période : 6 mois) ;
- effets de houle due aux alizés (période : 6 mois) ;
- effets des composantes luni-solaires à 182, 365 jours et 18,6 ans qui induisent des variations de ± 10 cm sur les amplitudes des marées.

La marée est considérée comme de type semi-diurne, et comme ayant la plus grande amplitude d'une marée théorique de vives eaux maximale : 3,84 m (tableau 1.10). Soit une demi-amplitude de 1,92 m, différence entre le niveau moyen (à mi-marée) et la basse mer. Un nivellement à l'exutoire du chenal à marée d'Amarante (savane Sarcelle) montre (fig. 1-21) que la position du cordon sableux de plage est proche de la valeur maximale théorique (3,84 m) et que la vasière du marais, se trouvant à 0,7 m au-dessus du niveau moyen, est exondée 80 % du cycle, soit 3 jours sur 14, laissant la possibilité aux processus d'induration ou de développement d'algues de se mettre en place.

Fig 1-20

Fig 1-21

En considérant que le niveau de référence IGN terrestre correspond au niveau moyen de la mer (hauteurs à la mi-marée), il a été défini un "zéro marin" aux îles du Salut, à 1,92 m sous le "zéro IGN".

Les amplitudes maximales des marées décroissent régulièrement de l'embouchure de l'Amazone (10 m), au Surinam (3 m). Il n'est donc pas surprenant de trouver un "zéro marin", défini comme précédemment, situé à 1,96 m, sous le "zéro IGN", dans les parages de l'île de Cayenne. Enfin, au Surinam, il est situé à 1,50 m en moyenne sous le niveau de référence topographique.

Pour la Guyane, on trouve les valeurs suivantes de marnage :

Tableau 1.10 - Caractéristiques des amplitudes des marées en Guyane (régime mésotidal, hauteurs par rapport au "zéro marin")

	Pleine mer	Basse mer	Marnage
Vives eaux	3,50 m	0,60 m	2,90 m
Marées moyennes	2,95 m	1,10 m	1,85 m
Mortes eaux	2,40 m	1,60 m	0,80 m

Dans ces conditions de variations d'amplitude à l'échelle mensuelle et annuelle, ce sont les limites spatiales des domaines marin et saumâtre qui peuvent se déplacer. Les seuils hydro-pluviométriques qui ont été observés et qui peuvent déclencher certaines réponses du milieu (marais de Mana, annexe 6) s'en trouveraient modifiés avec, pour conséquence, l'extension d'une unité au détriment de l'autre et des répercussions sur le fonctionnement du marais d'eau douce lui-même.

2.3. Incidence de l'hydrologie sur le fonctionnement physico-chimique d'une zone humide

La physico-chimie et les processus biochimiques des zones humides sont en forte relation avec les cycles marins et en interaction forte les uns avec les autres.

On peut néanmoins essayer de tirer quelques principes de base (fig. 1-22) :

- 1) le cycle de l'eau contraint le milieu vers une végétation monospécifique, mais peut favoriser ou limiter cette richesse spécifique ;
- 2) la production primaire est favorisée par les processus dynamiques comme les variations de niveau (concept d'hydro-période) et les cycles de crues. A l'inverse, cette production primaire est ralentie, voire arrêtée dans les conditions de stagnation ;
- 3) l'accumulation organique est contrôlée par le cycle de l'eau et, au travers de ses effets sur la production primaire, par la décomposition et l'exportation de matière organique particulaire ;
- 4) la disponibilité et le cycle des nutriments sont directement liés au fonctionnement hydrologique.

Fig 1-22

Temps de renouvellement et temps de résidence

Un concept très utilisé en limnologie est celui de temps de renouvellement des volumes d'eau des plans d'eau naturels (Meybeck et Pouvriot, 1996) :

$$t^{-1} = Q/V$$

avec Q débit en m³/s et V en m³

Les propriétés chimiques et biologiques seront largement dépendantes de ce facteur, traduisant le degré d'échange du système avec l'extérieur.

Le concept inverse nommé "temps de résidence" (t) est une variable importante, surtout dans le cas où les zones humides sont utilisées dans un système d'assainissement des eaux usées.

2.4. Composition et richesse spécifique

L'action du cycle de l'eau peut avoir des effets opposés sur les espèces aquatiques, soit en limitant, soit en stimulant la richesse spécifique, en fonction de l'hydrodynamisme marine.

En hydrodynamisme faible, on observera une végétation euryhaline, c'est-à-dire à forte tolérance aux salinisations, mais à faible diversité.

Il est tout de même difficile de généraliser, surtout dans les cas d'inondation prolongée. Pour caractériser l'hydrodynamisme, on construit un indice, produit de la variation de hauteur par le temps :

$$\Delta h * T \text{ (en m.s)}$$

L'hydrodynamisme dû aux marées est donc élevé quand l'indice est fort. En Guyane, on aurait une valeur moyenne dans les chenaux à marée de l'ordre de 40. 10³ m/s.

McKnight et al. (1981) décrivent les zones d'inondation de lits majeurs de rivières en soulignant que, lorsque l'on passe d'un milieu humide à un milieu sec, les possibilités de mélange des espèces augmentent. On constate aussi qu'il y a stimulation lorsque les transports solides créent, à la faveur d'une crue, un milieu assez hétérogène avec des "niches" écologiques. Mais, selon la géomorphologie, une crue peut aussi être à l'origine d'une uniformisation sédimentaire du milieu et renforcer la monospécificité.

2.5. Production primaire

Le potentiel de production primaire est fortement lié aux flux hydrologiques. C'est la sensibilité à ces flux, selon leur importance qui va conditionner la productivité : les zones humides ouvertes aux crues auront une productivité primaire forte, tandis que les marais inondés en permanence auront une faible productivité. Brown (1981) ainsi que Mitsch et Ewel (1979) démontrent cette relation dans les zones à *Taxodium* de Floride : les hydro-périodes courtes favorisent l'aération des racines pendant les épisodes secs de longue durée et contribuent, pendant les épisodes humides de courte durée, à éliminer les espèces moins tolérantes à l'inondation. L'apport de nutriments par les crues est le second processus qui maintient un niveau de production primaire élevé.

Brown (1981) précise que bon nombre de variations de la productivité primaire des zones à *Taxodium* étudiées en Floride peuvent s'expliquer par les variations d'apports en nutriments, mesurés par le phosphore. Il confirme que les systèmes isolés et à faibles précipitations sont pauvres, à l'inverse des zones traversées par les flux hydrologiques. Mais ces relations sont

également dépendantes des processus de décomposition de la matière organique, de la biochimie, et de la salinité des eaux.

Le contact d'une zone humide avec l'océan va provoquer des échanges et des variations de salinité énergiques. Whigham et al. (1978) pensent que la production primaire est plus forte en milieu saumâtre et relativement stable, que dans les zones soumises quotidiennement à la marée. En effet, dans ce dernier cas, il peut exister un "stress halin" défavorable et une hydrodynamique trop importante qui provoquent un lessivage des sols.

L'hydrologie joue donc un rôle important dans les processus de production primaire. L'eau est le véhicule des nutriments et la production primaire est d'autant plus importante que la dynamique de circulation de l'eau est forte (fig. 1-23).

2.6. Accumulation organique et exportation

Les zones humides peuvent accumuler de la matière organique en excès lors d'une production primaire importante, ou être le siège d'une diminution de la décomposition et des exportations. Bringson et al. (1981) indiquent que les taux de décomposition ne sont pas obligatoirement liés à la fréquence ou à la durée d'inondation. Ils suggèrent, par contre, que l'alternance des périodes sèches et humides aurait un rôle principal dans les taux maxima de décomposition de la litière, tandis que les conditions totalement anaérobies, lors des inondations permanentes, constitueraient les conditions minimales favorables à cette décomposition de litière.

D'autres mesures (Bringson, 1977) ne confortent pas totalement l'idée précédente puisque, dans l'étude d'une plaine alluviale de Caroline du Nord, la décomposition de la litière est plus rapide dans la rivière et plus lente dans le marais humide, et d'autant plus lente que le marais est plus sec.

Chamie et Richardson (1978) suggèrent qu'une inondation permanente ou régulière du sol conduit à une baisse d'activité de la faune du sol et favorise une lente décomposition anaérobie. Deghi, Ewel et Mitsch (1980), en étudiant la décomposition des aiguilles de *Taxodium* des zones humides de Floride, trouvent que leur dégradation est d'autant plus rapide que le terrain est plus humide, mais sans relation avec la profondeur.

L'importance du cycle hydrologique dans les exportations est primordial. Les zones ripicoles contribuent aussi à une large exportation de végétaux, lors des crues et notamment des troncs d'arbres entiers. Dans les milieux de mangrove et de marais saumâtres, certains auteurs ont mesuré que 45 % de la production était exportée (Teal, 1962), pour un marais saumâtre, et 28 % pour une zone de mangrove (Heald, 1969).

Dans les zones humides isolées, à cycle hydrologique peu dynamique, c'est seulement 6 % qui est exportée (Bazilevitch et Tishkov, 1982), dans une étude sur un marécage tourbeux.

2.7. Cycle des nutriments

Les apports en nutriments au système humide s'effectuent par toutes les entrées identifiables en hydrologie : pluie, ruissellement de surface, crues, marées et eau souterraines. Les relations et l'évolution du cycle des nutriments suivent les mêmes règles que celles décrites dans le cas de la décomposition de la matière organique et la production primaire : plus le cycle de l'eau est rapide, plus le cycle des nutriments est élevé. L'inverse est également vrai.

L'hydro-période est un facteur important dans la transformation et la disponibilité des nutriments pour la végétation : toutes les réactions biochimiques sont activées lors de variations rapides du plan d'eau.

Fig. 1-23

2.8. Conclusion

L'étude scientifique des zones humides est typiquement pluridisciplinaire (Fustec et Frochot, 1995). Le champ d'investigation est nécessairement très large, puisqu'il se pose souvent une problématique de gestion du milieu. Historiquement, les aspects de gestion et d'aménagement ont été négligés au profit d'études satisfaisant une communauté scientifique de tradition plutôt naturaliste, ce qui explique leur caractère souvent mono-disciplinaire. Par ailleurs, ce milieu géographique n'a jamais été solidement identifié, sauf comme "interface" océan / continent ; il était donc naturel que ni les océanographes, ni les disciplines "continentales" (pédologie, hydrologie) ne se penchent sur ces zones géographiques.

C'est sans doute là l'originalité de la zone humide : son fonctionnement complexe, aux conséquences souvent régulatrices. On connaît depuis longtemps son pouvoir écrêteur et déphaseur sur les crues (bien qu'on l'ait sans doute négligé dans la vallée du Mississippi, entraînant les conséquences graves de l'année 1994), mais on commence seulement à comprendre le pouvoir épurateur des zones humides (ou pouvoir "tampon") et les processus biochimiques qui s'y déroulent.

Les études hydrologiques ont été réalisées la plupart du temps à l'occasion d'aménagements, mais trop rarement dans un contexte de recherche. Pourtant, les techniques et les connaissances scientifiques acquises en hydrologie de surface du domaine purement continental sont largement transférables à ces milieux. Nous avons vu comment du concept simple d'hydro-période (qui n'est ni plus ni moins qu'un limnigramme annuel) à la description des termes du bilan hydrologique, il existe des similitudes de problématique pour utiliser toutes les ressources de la science hydrologique dans la connaissance de ces milieux humides (de même en hydrogéologie, pour quantifier des flux d'origine souterraine).

Les études hydrologiques des zones humides, souvent difficiles d'accès, demandent une connaissance du terrain, mais aussi une reconnaissance spatialisée des sites. Pendant les études, il est important de pouvoir également spatialiser certaines composantes du bilan. Dans le chapitre suivant, nous allons exposer l'apport de la donnée satellitale à l'hydrologie, en vue d'enrichir l'investigation et la connaissance des zones humides tropicales dans ce domaine.

Chapitre 2 - Les données satellitales et leur apport à l'hydrologie des zones humides

Introduction

La diversification des capteurs (optique et radar) permet une exploitation des données satellitales en hydrologie, par une utilisation de type "représentation spatiale interprétée" (ex. : pluie, neige, qualité de l'eau, surface en eau), mais aussi en utilisant l'information en tant que "flux mesuré" pouvant être introduite dans les termes du bilan hydrologique comme l'humidité et l'évapotranspiration : c'est une approche de type "géophysique".

Dans cette partie, il nous est apparu nécessaire de montrer l'apport des données satellitales dans les descriptions "spatialisée" et "temporelle" de phénomènes physiques intéressant l'hydrologue, tout comme leur intérêt pour certains termes du bilan hydrologique, afin de cerner leurs avantages et les limites de leur utilisation sur nos zones d'intervention. La capacité "tout temps" des radars imageurs leur confère un intérêt supplémentaire en milieu tropical humide, notamment par les possibilités d'acquérir des données en pleine saison des pluies (voir caractéristiques au tableau 2.1).

En abordant les propriétés optiques des surfaces en eau, nous exposerons les différentes applications potentielles de ce domaine (charge en suspension, qualité de l'eau, chlorophylle) et celles réalisées sur les eaux des marais et des estuaires de Guyane. Nous traiterons également de la donnée thermique de Landsat TM sur les zones humides continentales, afin d'évaluer le potentiel de cette information pour caractériser les milieux étudiés.

Les applications générales du radar pour l'estimation de l'humidité et son apport dans le calcul de l'évapotranspiration seront discutés et illustrés à partir d'éléments bibliographiques et des données sur la Guyane obtenues dans le cadre du projet pilote de l'ESA n°12.

Enfin, pour toute utilisation de données spatialisées dans les bases de données, il nous a paru important de mettre en garde le lecteur sur les problèmes théoriques et méthodologiques qui se posent lors des changements d'échelle.

Tableau 2.1 : Domaines spectraux et propriétés de quelques “ objets ” au sol

1. Qualité de l'eau

1.1. Propriétés spectrales de l'eau liquide

1.1.1. Théorie dans le spectre "optique"

Une partie du rayonnement solaire atteignant la surface est réfléchi spéculairement sans être affecté spectralement. Il y a donc une simple diminution d'intensité. Une autre partie est réfractée vers le bas et le signal est absorbée et rétrodiffusé (Cassanet, 1981, fig. 2-1).

Certaines grandeurs physiques doivent être explicitées, notamment par rapport aux grandeurs mesurables physiquement par les capteurs et à partir de l'approche modélisatrice (Guyot, 1989 ; Gaussorgues, 1984). On note :

$E_i(\lambda)$	éclairage incident à la longueur d'onde λ
$E_a(\lambda)$	éclairage absorbé par l'eau
$M_{sp}(\lambda)$	l'existance de l'eau due à la réflexion spéculaire
$M_d(\lambda)$	l'existance de l'eau due aux processus de diffusion

L'éclairement énergétique E (en watt par m^2) est la puissance reçue par unité de surface. En un point de la surface, c'est le rapport du flux reçu par la surface dS d'un élément infiniment petit.

L'existance énergétique M (en watt par m^2) est le pouvoir émissif qui est la puissance rayonnée par une source étendue, par unité de surface. C'est le quotient du flux émis par un élément de surface dS infiniment petit.

On écrit que : $E_i(\lambda) - E_a(\lambda) = M_{sp}(\lambda) + M_d(\lambda)$

La composante de la réflectance due à la réflexion spéculaire est :

$$e_{sp}(\lambda) = M_{sp}(\lambda) / E_i(\lambda)$$

La composante de la réflectance due à la diffusion en volume est :

$$e_v(\lambda) = M_d(\lambda) / E_i(\lambda)$$

On définit alors un coefficient d'absorption qui est la diminution du flux incident le long d'un trajet dx :

$$\partial \Phi(\lambda) = -a(\lambda) \cdot \Phi(\lambda) \cdot \partial x$$

Ce coefficient a une dimension en L^{-1}

La solution de l'équation différentielle est :

$$\Phi(\lambda) = \Phi_0(\lambda) \cdot \exp(-a(\lambda) \cdot x)$$

1.1.2. Coefficient total de diffusion et d'atténuation

On peut définir de même un coefficient total de diffusion $b(\lambda)$:

$$\Phi(\lambda) = \Phi_0(\lambda) \cdot \exp(-b(\lambda) \cdot x)$$

et un coefficient d'atténuation total $c(\lambda)$ qui est la somme des coefficients d'absorption et de diffusion :

$$c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda)$$

Les mesures de laboratoire montrent que ce coefficient $c(\lambda)$ prend sa valeur minimale (pour l'eau de mer) à la longueur d'onde de 500 nm. De même, on constate qu'il faut quelques centimètres pour absorber le rayonnement solaire dans le proche infrarouge, et quelques millimètres dans l'infrarouge moyen. Les surfaces d'eau pure sont donc sans signal sur un document infrarouge, facilitant leur détection.

1.2. Propriétés dans l'infrarouge thermique

L'émissivité de l'eau (fig. 2-2) dans l'infrarouge thermique est très élevée. Le domaine des 10-12 μm est donc particulièrement bien adapté à la mesure de la température de surface de l'eau.

Les données à haute résolution spatiale, comme celles de Landsat TM (pixel de 120 m) qui peuvent être utiles dans le domaine continental sont souvent d'une très faible dynamique et l'absence de second canal thermique ne permet pas de corriger les effets de l'absorption atmosphérique. Leur utilisation sera plutôt réservée aux valeurs relatives de température.

1.3. Propriétés optiques des surfaces en eau

Les propriétés optiques des surfaces en eau dépendent des substances dissoutes ou en suspension. On identifie trois catégories :

- le phytoplancton ;
- les particules minérales ou matières en suspension (MES) ;
- la matière organique dissoute.

1.3.1. Propriétés optiques du phytoplancton

Celui-ci et les débris biogènes qui lui sont associés possèdent un coefficient d'absorption global $a_p(\lambda)$ qui dépend de la concentration en chlorophylle. Afin de comparer les solutions de chlorophylles entre elles, il est défini un coefficient spécifique $a_p^*(\lambda)$:

$$a_p^*(\lambda) = a_p(\lambda) / \gamma_p$$

où γ_p est la concentration en pigments de chlorophylle "a" et phéophytine "a" (en mg/m^3).

Le coefficient d'absorption varie très largement en fonction de la longueur d'onde (Guyot 1989, fig. 2-3). On observe deux pics à 430 et 680 nm. Les cellules organiques provoquent une diffusion de la lumière qui varie en fonction inverse de la longueur d'onde (diffusion de Mie). Ceci explique une moindre dépendance vis-à-vis de la longueur d'onde et le passage à la couleur verte quand la concentration en phytoplancton augmente (minimum de la courbe longueur d'onde / coef. d'absorption vers 600 nm).

Fig 2-1 & 2-3

1.3.2. Particules minérales en suspension

Elles sont constituées par les sédiments terrigènes remis en suspension dans les estuaires ou lors des apports des rivières aux plans d'eau, après les crues. Leur coefficient d'absorption (fig. 2-4) présente un maximum vers 400 nm (bleu) et un minimum vers 500-600 nm. La diffusion de la lumière ne suit pas une loi simple car certaines particules minérales sont absorbantes, et leur distribution statistique idéale (loi normale) est tronquée par le phénomène de sédimentation.

1.3.3. Propriétés de la substance jaune

Cette dénomination concerne la matière organique dissoute entraînée par le lessivage des terres où la décomposition organique est importante, entraînant la mise en solution des acides humiques.

L'expression du coefficient d'absorption varie exponentiellement :

$$a_y(\lambda) = a_y(\lambda_0) \exp[-P(\lambda - \lambda_0)]$$

La pente P est égale à 0,014 (avec λ en nm) et varie peu selon le type d'eau.

La figure 2-5 a été tracée à partir de la relation précédente et montre une très forte absorption dans le bleu.

1.4. Réflectance des eaux naturelles

La réflectance mesurée en milieu naturel dépend des trois éléments cités, et dans une proportion de mélange variable. Bien qu'ils soient modélisables un à un (fig. 2-6), l'étalonnage de la mesure satellite peut toujours être perturbée par une forte présence d'une des trois composantes que la loi empirique ne prendra pas en compte si les conditions de terrain ont changé depuis l'étalonnage.

C'est aussi pour cette raison que l'établissement de lois empiriques, qui introduit des coefficients de calage, sera spécifique des zones géographiques étudiées. De plus, ces coefficients prendront en compte l'absorption atmosphérique qui est assez mal modélisée en milieu tropical. En zone tempérée, il existe par contre des modèles atmosphériques satisfaisants comme ceux développés en code Lowtran 6, 7 et en code 5S (Kneizys et al., 1983 ; Tanre et al., 1990).

1.4.1. Charge en suspension

Pour permettre l'établissement de relations stables dans le temps, il est nécessaire de convertir les comptes numériques en radiance (selon les facteurs de calibration du capteur) puis en réflectance pour tenir compte de l'angle solaire ($R = \text{radiance} \cdot \frac{1}{E \cdot \sin a}$, $E =$ irradiance à l'entrée de l'atmosphère et $a =$ élévation solaire).

Certains auteurs proposent des "étalonnages" entre la réflectance et la charge en suspension qui suivent, en règle générale, une loi logarithmique.

La luminance L (ou réflectance), s'exprime selon la loi empirique suivante :

$$L(\lambda) = a + b \cdot \ln C$$

où C est la concentration, a et b des constantes à déterminer.

Fig 2-5 & 2-6

Ritchie et al. (1987) ont réalisé une étude systématique, avec vérité terrain, de ces corrélations (linéaires ou logarithmiques) sur le "Moon lake" du Mississippi avec des données Landsat MSS. Les meilleures corrélations obtenues pour les sédiments en suspension sont linéaires, utilisant le canal MSS3 (700-800 nm), et dans deux modes de calcul :

- en soustrayant la valeur du pixel la plus basse aux comptes bruts
 $\text{Sed (mg/l)} = -25,2 + 6,86 * \text{MSS3}$ ($r^2 = 0,86$, 70 valeurs)
- en transformant en réflectances
 $\text{Sed (mg/l)} = -138,5 + 2025,86 * \text{MSS3}$ ($r^2 = 0,84$, 70 valeurs)

Ritchie et al. (1990) montrent sur le même site, que les canaux 3 et 4 de Landsat TM sont les plus corrélés avec les mesures de sédiments en suspension (fig. 2-7).

Moll (1988) établit une relation linéaire avec le canal 2 de Spot (610-680 nm) sur le lac Jatiluhur (ouest Java) :

$$C \text{ (kg/m}^3\text{)} = -0,21 + 0,017 * \text{Spot2}$$
 ($r = 0,97$, 15 valeurs)

Lavery et al. (1993) ont travaillé sur l'estuaire de Peel (Australie occidentale) avec quatre passages Landsat TM, synchrones avec des mesures au disque de Secchi⁸, sur 25 sites. Ils proposent une relation de la forme :

$$\text{SDD(mètres)} = 0,74 - 0,05\text{TM3} + 1,80\text{TM1/TM3}$$
 ($r^2 = 0,81$)

Le principal problème dans l'établissement de ces relations est la coïncidence entre la mesure de terrain et le passage du satellite, un jour de bonnes conditions météorologiques. Le faible nombre d'expérimentations et de points utilisés dans les relations empiriques est dû cette difficulté. En Guyane, où le couvert nuageux est parfois important, nous avons pu utiliser une seule acquisition de Landsat MSS en 1976 et une de Spot en 1986, pour aborder la description de la qualité des eaux des estuaires.

1.4.2. Qualité de l'eau des estuaires de Guyane

1.4.2.1. Panaches turbides

L'analyse des données SPOT (30 oct. 1986, 1 heure avant la marée basse), autour de la presqu'île de Cayenne, fournit une information qualitative sur les panaches turbides (fig. 2-8). La remise en suspension des vases d'embouchure, sous l'effet des courants de marée, montre une extension importante du panache de la rivière de Cayenne (débit moyen annuel : 40 m³/s). Dans cette classification utilisant les canaux 1 et 3 de SPOT, on notera la décroissance vers le large des teneurs en suspension. Cette distribution traduit nettement le phénomène d'accumulation des vases à l'embouchure.

Les surfaces des "plumes" turbides sont respectivement de 90 km² (rivière de Cayenne) et 30 km² (rivière Mahury), alors que le débit moyen annuel de ce dernier est de 200 m³/s, 5 fois plus élevé que celui de la rivière de Cayenne. Cette observation montre le rôle important des effets océaniques sur les petits bassins-versants à faible débit. La surface du panache turbide est inversement proportionnelle au débit propre de la rivière. Ce constat est réalisé par S. C.Dinnel (1990) sur la "Mobile Bay" en Alabama. Ces valeurs nous permettent d'estimer la quantité (à un facteur 2 près) de vases d'embouchure remises en suspension à chaque marée à partir des éléments suivants :

⁸ Disque peint en blanc dont on mesure la profondeur de disparition dans l'eau. Cette profondeur est en relation avec la turbidité de l'eau.

Fig 2-7

Fig 2-8

Fig 2-8 dos

- teneur à marée basse : 0,5 g par litre, mesurée dans l'estuaire de la rivière de Cayenne entre 1988 et 1990.
- bathymétrie moyenne : 2 mètres

On obtient un ordre de grandeur de 30 000 tonnes pour la rivière du Mahury et 90 000 t. pour celle de Cayenne.

1.4.2.2. *Aspect qualitatif de la distribution de la turbidité de l'estuaire du Sinnamary, en étiage.*

Les mesures de terrain (Lointier M., 1984, 1990, annexe 7) dans cet estuaire montrent que l'opacité est élevée, avec une disparition du disque de Secchi entre 0,5 et 1,2 mètres. La bathymétrie mesurée étant, dans tous les cas, supérieure à 1 mètre, on ne peut attribuer les variations de la radiométrie enregistrée aux variations de profondeur du chenal. Par ailleurs, les concentrations en chlorophylle a ont une distribution homogène comprise entre 0,16 et 0,75 mg.m⁻³ (Noguès, 1984), ce qui est faible (valeurs les plus basses de la figure 2-6).

Les canaux homologues 1 et 2 de Spot (20 octobre 1986) et 4 et 5 de Landsat (30 octobre 1976) ont été utilisés pour comparer la qualité des eaux de l'estuaire à dix années d'intervalle. Un index de brillance a été utilisé ($\sqrt{c_1^2 + c_2^2}$) pour cette comparaison (fig. 2-9). Cet index montre la distribution graduelle des masses d'eaux de surface pour un débit du Sinnamary voisin (64 m³/s le 30 octobre 76 et 80 m³/s le 20 octobre 1986). Il est remarquable de constater la similitude de la distribution des différentes masses d'eau, avec quelques variations dues aux heures de marée différentes (respectivement pleine mer et basse mer - 1 h). On notera que les faibles valeurs de l'index de brillance sont situées en rive droite et les plus élevées en rive gauche, au niveau de l'élargissement de l'estuaire.

En attribuant la réflectance enregistrée aux phénomènes de charge en suspension de surface (qui peut avoisiner de 1 à 20 g/l), on cartographie les zones de remise en suspension des vases, dont les maxima correspondent aux petits fonds (2 m en rive gauche) reconnus par les mesures bathymétriques in situ. On met ainsi en évidence une certaine stabilité de l'hydrodynamisme de l'estuaire, dans un contexte de mouvement de bancs de vase qui ne semble pas avoir affecté l'estuaire.

1.4.2.3. *Extension des vases océaniques en estuaire.*

L'alimentation en eau des populations s'effectue en Guyane en général par une seule prise d'eau, située en amont du coin salé (20-30 km des embouchures ou plus) sur le fleuve ou la rivière la plus proche. Afin de préciser l'extension de la remontée saline en étiage et d'étudier d'autres estuaires pour diversifier la ressource en eau, nous avons utilisé les données du Landsat MSS sur ce problème de limite du coin salé.

L'acquisition des données Landsat MSS, en 1976, en marée haute et en période d'étiage, se s'est déroulée à un instant favorable à la localisation de l'extension maximale vers l'amont de la remontée des vases d'embouchure et du coin salé. L'étude hydrologique de l'estuaire du Kourou (Roche M.A. 1977) et du Sinnamary (Lointier, 1988, 1990) a permis de montrer que les limites coin salé / vases d'embouchure étaient très proches.

Une composition colorée met parfaitement en évidence le contact entre les eaux fluviales et celles qui ont subi un mélange océanique par l'effet de turbidité. Par ce biais, on détermine ainsi la limite de la remontée saline dans les deux estuaires.

fig. 2-9

fig. 2-9 dos

Cette extension est plus importante vers l'amont pour le fleuve Kourou que sur le Sinnamary : ceci s'explique par la valeur différente du rapport entre le volume d'eau douce apporté par le fleuve et le volume déplacé dans l'estuaire pendant un cycle de flot. Ce rapport, V_{riv}/V_{flot} , est de 20 % pour le Sinnamary (Lointier, 1990) et seulement de 2 % pour le Kourou (Roche, 1977), qui subit une influence océanique plus profonde.

Cette méthode peut simplifier les investigations de terrain pour une reconnaissance préliminaire, sans toutefois remplacer les mesures au sol.

1.4.2.4. Spatialisation des valeurs de turbidité de surface

Une partie des prélèvements d'eau réalisés pendant l'étiage de 1976 sur le Kourou s'est déroulée la veille et le jour même du passage du satellite, sur cinq sites répartis entre l'embouchure et 30 km en amont (fig. 2-10).

En dépit du faible nombre de pixels situés en rivière, sans effets de bordure, nous avons testé une relation entre la radiométrie et la turbidité. La seconde composante d'une Analyse en Composantes Principales (ACP) sur les quatre canaux MSS donne une corrélation acceptable, dans laquelle le canal 6 se révèle très important. Ce calcul est effectué à partir des valeurs radiométriques "brutes", comme l'a suggéré Ritchie (1987), qui montre aussi l'importance du canal MSS6 (0,7 - 0,8 μm) pour définir ce type de relation.

La combinaison linéaire retenue sur les 4 canaux est de la forme :

$$P_i = S(i) + K(i,1) * MSS4 + K(i,2) * MSS5 + K(i,3) * MSS6 + K(i,4) * MSS7$$

$$\begin{aligned} P_i &= \text{valeur du pixel dans la seconde composante (i = 2)} \\ S(i) &= 103,187 \\ K(i,1) &= 0,7896 ; K(i,2) = 0,7244 ; K(i,3) = -0,1787 ; K(i,4) = -0,5776 \end{aligned}$$

Les valeurs radiométriques repérées sur chaque site sont comparées aux mesures *in situ*. La relation obtenue est (fig. 2-11) :

$$\log(T_{urb}) = 0,0495 * ACP2 - 4,6709 \quad (r = 0,99 \text{ 5 valeurs})$$

Cet étalonnage permet ensuite de classer tous les pixels du fleuve (fig. 2-12) et de son estuaire en cinq groupes de turbidité de 10 mg/l à 10 g/l, avec une incertitude que nous estimons à $\pm 25\%$ mais qui ne doit pas surprendre, vu la résolution spatiale du capteur MSS (80 mètres) et la représentativité d'un prélèvement ponctuel (Lointier, 1994c).

La relation exploitée ici s'accorde avec celles qui sont exposées dans la littérature, de type $R = f(\log T)$, avec un résultat cartographique en accord avec les observations et une réalité physique de la distribution des eaux.

A partir de la même combinaison linéaire des quatre canaux, la relation a été appliquée à l'estuaire du Sinnamary, montrant une distribution des masses d'eaux décalée vers l'aval, du fait du débit plus élevé de ce fleuve.

En reprenant l'hypothèse de travail de la limite proche entre la dispersion des vases d'embouchure et le coin salé, on peut estimer la position maximale de ce dernier à la limite entre les classes 2 et 3, soit une distance de l'embouchure de 25 km pour le Kourou et 13 km pour le Sinnamary.

fig. 2-10 & 2-11

fig. 2-12

dos 2-12

1.4.3. Chlorophylle

La chlorophylle totale et la chlorophylle a sont déterminées, à 50 % près, uniquement avec les valeurs brutes du canal 1 de Landsat TM (450-520 nm) mais, comme le note l'auteur (Ritchie, 1990), c'est encore insuffisant pour réaliser un suivi opérationnel de ce paramètre. Dekker (1993) a développé des algorithmes plus performants pour la cartographie de ces éléments pour des plans d'eau hollandais (détection de la chlorophylle-a entre 0 et 200 µg/l), mais qui nécessitent toujours le synchronisme des réalités de terrain avec le passage du satellite.

Lavery et al. (1993) proposent deux relations spécifiques dans une étude sur deux estuaires australiens avec des données Landsat TM :

$$\log C(\mu\text{g/l}) = 3,09 - 1,61 \text{ TM2/TM3 (Peel inlet)} \quad (r^2 = 0,72)$$

$$\log C(\mu\text{g/l}) = 3,65 - 1,91 \text{ TM2/TM3 (Harvey Estuary)} \quad (r^2 = 0,76)$$

Bien que de nature empirique et d'utilisation très localisée, toutes ces relations conduisent à des résultats synoptiques et cartographiques qui peuvent être le point de départ d'une constitution d'une base de données spatialisée sur la qualité des eaux. C'est un début de "monitoring" qui peut apporter des éléments nécessaires à la gestion de ces plans d'eau.

1.5. Emissivité des eaux naturelles

1.5.1. Applications générales

Nous avons indiqué que l'émissivité de l'eau dans la bande 10-12 µm était maximale et voisine de l'unité. Dans la réalité, plusieurs phénomènes viennent limiter cette émissivité :

- la concentration en particules ;
- les effets de "peau froide" (film de surface) ;
- la rugosité de surface.

La figure 2-13 (Guyot G., 1989) montre ces variations en fonction de la concentration, pour l'eau douce et deux types d'eau de mer. On constate que :

- l'émissivité de l'eau douce est supérieure à celle de l'eau de mer ;
- il y a absence de variation jusqu'à des concentrations en sédiments de 50 g/l ;
- la concentration en sel dans l'eau de mer n'affecte pas l'émissivité.

Les concentrations exprimées sur le graphique sont représentatives des eaux côtières, les charges maximales étant observées sur le fleuve Jaune, en Chine.

Ces données thermiques présentent un intérêt pour séparer des masses d'eaux continentales de celles de l'océan, ou enrichir la thématique spécifique des zones humides par l'étude de leur température relative avec une précision de l'ordre de 1 K.

Ritchie et al. (1990) ont testé sur les eaux de lac la transformation des données thermiques brutes en température absolue, par la calibration des capteurs de Landsat (Markham et Barker, 1986). Le résultat s'écarte en moyenne de 3 à 8°C (fig. 2-14) et montre qu'il serait nécessaire de prendre en compte les effets atmosphériques dus à l'absorption du signal par la vapeur d'eau.

fig. 2-13

fig. 2-14

En effet, les formules d'évaluation directe de température (en K) s'effectuent en calculant la radiance spectrale L_λ ($\text{mW.cm}^{-2}.\text{ster}^{-1}.\mu\text{m}^{-1}$) :

$$L_\lambda = L_{\min} + ((L_{\max} - L_{\min}) / 255) * DN$$

avec $L_{\min} = 0,1238$ et $L_{\max} = 1,56$ pour Landsat
 DN = compte radiométrique brut

Puis la température (en K) (Wukelic et al., 1989)

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)}$$

T : température mesurée par le satellite, en K°
 $K_1 = 60,776$ et $K_2 = 1260,56$ pour Landsat 5

De nombreux travaux ont été réalisés dans le domaine des capteurs à basse résolution spatiale (NOAA-AVHRR, ATSR de ERS1) car la présence de deux bandes thermiques permet d'utiliser des méthodes de correction atmosphérique comme la "split window" (Gu et Seguin, 1993), basée sur les différences relatives des signaux dans les deux bandes spectrales. La basse résolution spatiale trouve surtout une application dans la mesure de température des océans.

Pour les capteurs à une seule bande, comme Landsat TM, des radiosondages sont nécessaires en synchronisme avec l'acquisition ainsi que des méthodes de modélisation du transfert radiatif (Lowtran 7). Néanmoins, la qualité des radiosondages est très critique, et il est constaté des écarts absolus inférieurs de 10 K à la réalité sol pour le Landsat (Gu et Seguin, 1993).

1.5.2. Application en Guyane

Malgré la forte charge en suspension des eaux côtières de Guyane (exceptionnellement 40g/l ; Roche et al., 1974 ; Jouanneau et al., 1987), nous avons vu qu'il était possible d'accéder à une mesure de la température de surface de l'eau de mer. Nous avons utilisé les données thermiques de Landsat TM (canal 6) à la résolution de 120 mètres pour dresser une carte des températures de surface de l'environnement marin de l'estuaire du Sinnamary ainsi que de la partie continentale. Ceci permet d'étalonner l'ensemble des données avec une précision relative de $0,5^\circ\text{C}$ et absolue d'environ 2°C . La calibration s'effectue en utilisant les transformations des comptes numériques bruts en température (Wukelic et al., 1989). Une première transformation des données est effectuée pour lisser le signal à l'aide d'un filtrage spatial linéaire passe-bas (qui ne transforme pas les comptes numériques). On effectue le passage en radiance spectrale L (en $\text{mW.cm}^{-2}.\text{ster}^{-1}.\mu\text{m}^{-1}$),

$$L_\lambda = L_{\min \lambda} + \left(\frac{L_{\max \lambda} - L_{\min \lambda}}{Q_{\text{cal max}}} \right) * Q_{\text{cal}}$$

Q_{cal} : valeur de radiance en DN
 L_{\min} : radiance spectrale min (ici 0,1238)
 L_{\max} : radiance spectrale max (ici 1,5600)
 Q_{calmax} : gamme des valeurs (255)

On obtient ainsi une grandeur physique relative au système terre-atmosphère, qui peut être convertie en températures par la relation du § 1.5.1.

Le résultat obtenu est considéré comme acceptable en valeurs relatives, puisqu'il n'est pas corrigé des effets atmosphériques (précision 0,5 K). Nous proposons néanmoins une échelle en valeurs absolues, sachant qu'à cette date la température la plus basse observée est celle du fleuve Sinnamary, dont la valeur est de 27°C. On obtient ainsi un recalage approximatif des valeurs en température de surface, pour l'ensemble de la zone côtière.

Tableau 2.1 - Résultat de la conversion des données thermiques du canal 6 de Landsat 5 (en °C), le 18 juillet 1988 sur la zone de Sinnamary.

Compte numérique (CN)	Radiance spect. (mW.cm ⁻² .ster ⁻¹ .µm ⁻¹)	K° at-satellite	Températures absolues (°C)	Températures relatives (°C)
124	0,82219	292,0	19,0	27,0
125	0,82782	292,5	19,5	27,5
126	0,83345	292,9	19,9	28,0
127	0,83908	293,4	20,4	28,5
128	0,84472	293,9	20,9	29,0
129	0,85035	294,3	21,3	29,5
130	0,85598	294,8	21,8	30,0
131	0,86161	295,2	22,2	30,5
132	0,86724	295,6	22,6	31,0
133	0,87288	296,1	23,1	31,5
134	0,87851	296,5	23,5	32,0
135	0,88414	297,0	24,0	32,5
136	0,88977	297,4	24,4	33,0

On obtient une relation linéaire entre les comptes numériques et les températures estimées :

$$T (°C) = -35,0 + 0,50 \text{ CN}$$

Le résultat spatialisé est présenté à la fig. 2-15 : le fleuve Sinnamary présente les valeurs les plus basses (27 à 28°C). La limite terre/mer n'est pas marquée et la mangrove de front de mer a la même température que l'océan. En mer, on distingue des masses d'eau de même température que les eaux de fleuve, entourées de masses plus chaudes (28-29°), proches de la côte, qui permet d'apprécier la répartition hydrodynamique des eaux de rivière en mer.

Au sol, la limite forêt /savane est bien marquée : la zone de forêt a une température inférieure (28-29 °C) à celle de la savane (30-31°), avec des zones centrales présentant un maximum (32-33°) correspondant, selon les vérités terrain, aux parties où la végétation est la moins dense.

Les valeurs plus hautes se rencontrent dans les zones aménagées (petits centres urbains, bâtiments importants).

fig. 2-15

dos 2-15

2. Humidité des sols

2.1. Position du problème

L'humidité d'un sol est à attribuer à la variabilité dans le temps et dans l'espace de la "phase liquide" du sol, variable d'état, selon les définitions de Musy et Soutter (1991), et qui concerne la zone non saturée sub-superficielle du sol. L'évolution de cette variable d'état découle d'une dynamique de transfert qui est conditionnée par les propriétés spécifiques de la phase liquide et par les caractéristiques des espaces lacunaires du sol. La dynamique globale de la phase liquide résulte de phénomènes externes aux sols, qui constituent les apports (pluie, ruissellement) ou les pertes (évaporation, nappe), et de phénomènes internes comme les changements de phase. L'eau stockée est redistribuée soit vers la zone saturée de la nappe phréatique, soit vers l'atmosphère au travers du système sol-plante-atmosphère. La variabilité spatiale de ce paramètre est très grande, à cause des propriétés du sol et des conditions topographiques. Traditionnellement, c'est la mesure la plus difficile à extrapoler, puisque la mesure ponctuelle n'est représentative que d'elle-même (Engman et Gurney, 1991).

Il y a de nombreuses questions à résoudre pour réaliser l'approche par satellite, notamment si l'on recherche des unités hydrologiques relativement "homogènes" et pour définir l'échelle de spatialisation de l'humidité. Par les questions qu'elle pose, mais aussi par les mesures originales qu'elle apporte, la télédétection optique et radar a un potentiel important de solutions dans ce domaine.

2.2. Approche du problème

Tout le domaine du spectre électromagnétique est utilisable. Néanmoins, c'est celui des micro-ondes qui présente le moins de sources de bruit ou de phénomènes parasites (tableau 2.2). L'avantage à souligner est la mesure "tout-temps", sans gêne par le couvert nuageux.

Tableau 2.2 - Principales techniques utilisées pour mesurer l'humidité des sols

Domaine spectral	Grandeur observée domaine physique	Avantages	Inconvénients ou source de "bruit"
Réflexion solaire	réflectance	données disponibles	pas de relation univoque; épaisseur de sol très fine; nuages.
IR thermique	température de surface ou de canopée	bonne résolution spatiale; relation indépendante du type de sol	sols nus exclusivement ; nuages; topographie, conditions météo locales ; concerne une zone de 2 à 4 cm
Micro-ondes actives (de 1 à 100cm)	coef. de rétrodiffusion ; constante diélectrique du sol	tout temps; jour et nuit bonne résolution spatiale	liée à la rugosité ; végétation effets topographiques.
Micro-ondes passives (de 1 à 100cm)	température de brillance ; constante diélectrique du sol ; température du sol	tout temps; jour et nuit large couverture spatiale	résolution spatiale faible ; température du sol; rugosité ; végétation ; radiocommunications.

Citons pour mémoire les techniques à rayons gamma utilisées au sol, mais aussi à partir d'avions : le signal est considérablement atténué par la distance et par l'absorption atmosphérique. Elles ne peuvent donc être encore utilisées à bord de satellites. La mesure de l'humidité est réalisée après étalonnage préalable, sachant que le flux gamma est plus faible pour les sols humides que pour les sols secs.

Une approche couplée micro-ondes actives et passives est indispensable pour accéder au paramètre humidité qui est, pour ce type de détection, en relation avec la teneur en eau du sol (exprimée en % de masse ou en g.cm^{-3}).

2.2.1. Les micro-ondes passives

Longueurs d'ondes de 1 à 100 cm : l'émission de surface d'un sol est proportionnelle au produit de la température de surface par l'émissivité de surface ; il y a dépendance avec la constante diélectrique, paramètre physique dépendant de l'humidité. Les facteurs interférants sont la rugosité du sol et la végétation.

L'émissivité d'un sol, communément exprimée en température de brillance (T_b), peut s'écrire ainsi (Engman et Gurney, 1991) :

$$T_b = t(H) [rT_{\text{ciel}} + (1-r)T_{\text{sol}}] + T_{\text{atm}} \text{ (en K)}$$

où $t(H)$ est la transmission atmosphérique

r la réflectance de la surface

T_i les températures de brillance, du ciel, du sol et de l'atmosphère.

Cette équation dérive de simplifications de la loi de Planck sur l'émittance spectrale du corps noir et de la loi de Stephan-Boltzmann $M = \epsilon \cdot \sigma T^4$ (intégration de la loi de Planck sur l'ensemble du spectre) où ϵ est l'émissivité du corps (compris entre 0 et 1) et σ la constante de Stephan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8}$, en $\text{W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$). Alors que dans ce domaine de l'émissivité des corps la température intervient à la puissance quatrième, la simplification dans le domaine hyperfréquence (valable si $T < 300 \text{ K}$ et fréquence $< 300 \text{ GHz}$) fait intervenir la température à la puissance première (loi de Rayleigh-Jeans). On peut alors écrire :

$$T_b = \tau(\epsilon T_o + \rho T_r) + (1 - \tau) T_s$$

où τ est la transmittance de l'atmosphère entre l'objet et le capteur (compris entre 0 et 1)

ϵ est l'émissivité du corps (compris entre 0 et 1)

T_o la température absolue de l'objet (K)

ρ la réflectance (comprise entre 0 et 1)

T_r température équivalente de radiation incidente sur l'objet (K)

T_s température absolue de la couche de l'atmosphère entre l'objet et le capteur (K)

(d'après Précis de télédétection, 1992)

A des longueurs d'ondes supérieures à 5 cm, qui sont plus appropriées pour mesurer l'humidité, les effets atmosphériques peuvent être négligés, et l'équation devient :

$$T_b = (1-r) T_{\text{sol}} \text{ (K)} \quad \text{où } (1-r) \text{ est l'émissivité } (0 < \epsilon < 1)$$

Température de brillance et émissivité dépendent de la texture, de la rugosité du sol et de la végétation : on est donc obligé de réaliser des étalonnages avec des réalités de terrain.

Notons que, pour l'instant, les résolutions au sol en micro-ondes passives disponibles à bord des satellites sont pluri-kilométriques. Néanmoins, l'utilisation de ces micro-ondes passives est sans doute une bonne solution pour accéder à l'humidité, car elles sont peu sensibles aux effets de la rugosité telle qu'on la définit dans le domaine des micro-ondes actives.

2.2.2. Les micro-ondes actives

Comprises entre 1 et 100 cm, elles permettent d'accéder à la mesure du coefficient de rétrodiffusion, d'où une information sur la constante diélectrique et, après étalonnage, à l'humidité. Les facteurs altérants sont la rugosité du sol, la végétation et la topographie.

Un modèle simple peut être développé :

La puissance rétrodiffusée (S_t) dépend de la rétrodiffusion de la végétation (S_v), du sol (S_s) et de l'atténuation par la canopée (L) :

$$S_t = S_v + S_s/L \text{ (dB)}$$

avec $S_s = R \beta M_v$ où :

R exprime la rugosité de surface

β est une constante liée à l'humidité du sol

M_v représente l'humidité volumique

R et β sont liés à l'angle d'incidence, à la longueur d'onde et à la polarisation.

Il n'y a pas de théorie satisfaisante pour exprimer tous ces termes indépendamment.

Rugosité : au sens électromagnétique, on définit selon les critères de Rayleigh, une rugosité de surface qui dépend de la longueur d'onde (λ), de l'angle d'incidence (γ) ou de dépression du faisceau radar (par rapport à l'horizontale) et de l'écart type (h) de la variation des irrégularités de surface (hauteur quadratique moyenne). On dira qu'une surface est:

- rugueuse si : $h > \frac{\lambda}{8 \sin \gamma}$
- et lisse si h est inférieur à cette expression.

L'approche couplée par micro-ondes passives et actives est toujours tributaire de mesures au sol et peut s'appliquer en toute rigueur uniquement aux sols nus.

C'est plutôt dans une démarche en termes relatifs et de changement d'humidité que l'on peut minimiser les effets parasites liés aux cibles. Heureusement, température de brillance et rétrodiffusion sont des quantités qui varient à peu près linéairement avec l'humidité du sol. Par ailleurs, pour la plupart des applications hydrologiques, ce sont les variations d'humidité des sols qui sont importantes à observer, bien avant d'accéder à sa valeur absolue.

2.3. Applications

Il existe encore un gros travail de conception de nouveaux capteurs dans ce domaine, car il n'y a pas de satellite à micro-ondes actives mettant à disposition de l'utilisateur l'information complète de la matrice de diffusion $[S]$, reliant le champ rétrodiffusé E_s au champ incident E_i en fonction des polarisations :

$$\begin{bmatrix} E_{hs} \\ E_{vs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{hi} \\ E_{vi} \end{bmatrix}$$

$h =$ polarisation horizontale

$v =$ polarisation verticale

$hv =$ premier indice : en réception, second indice : à l'émission

La modélisation théorique permet de décrire une à une certaines relations physiques entre la température de brillance en K° et l'humidité d'un sol sableux homogène (fig. 2-16 ; Jackson et Schmugge, 1986) et d'étudier l'effet de l'humidité et de la fréquence de l'émission sur la profondeur d'investigation (fig. 2-17 ; Ulaby et al., 1982). Il est encore impossible aujourd'hui de modéliser l'ensemble des paramètres d'un terrain couvert de végétation avec les grandeurs physiques qui correspondent à la théorie de l'interaction entre l'onde électromagnétique et la cible. C'est pour cette raison que l'on rencontre bon nombre de loi semi-empiriques qui procèdent par simplification des équations fondamentales.

2.3.1. Effets perturbant la mesure d'humidité

- **Dans le domaine des micro-ondes passives**

Le premier effet constaté est une atténuation du signal, auquel se rajoute l'émissivité propre de la végétation. Le signal recherché dépend de la longueur d'onde et est affecté par la masse végétale. Les procédures expérimentales montrent (Barton, 1978) qu'à une longueur d'onde de 2,8 cm, la relation signal / humidité est significative pour les sols nus mais disparaît lorsque la masse végétale est importante.

Il faut se placer dans des domaines du spectre correspondant à la bande L (15 à 30 cm) pour observer une relation modélisable, comme le proposent Jackson et al.(1982) :

$$Mv = 78,9 - 78,4 [1 + (e - 1) \exp (0,22 W)]$$

où Mv est l'humidité volumique du sol (%),
e l'émissivité mesurée,
W l'estimation du contenu en eau de la végétation (%).

En additionnant les résultats d'un index de végétation (PVI, perpendiculaire par exemple), on peut obtenir des corrections de l'émissivité qui améliorent la relation entre l'humidité du sol et les mesures faites par satellite.

- **Dans le domaine des micro-ondes actives**

Dans ce cas, la rugosité du sol a une grande importance qui va, dans certains cas, masquer le signal lié à l'humidité. Le choix de la longueur d'onde, de la polarisation et de l'angle d'incidence doit être optimisé, afin de minimiser les effets de cette rugosité. Une illustration de ce problème est présentée dans les figures 2-18 pour une surface en blé. L'atténuation du signal est faible en polarisation horizontale, tandis que le signal en polarisation verticale est affecté par la structure même du couvert.

2.3.2. Les expérimentations *in situ*

Fellah et al. (1994) ont utilisé des données de ERS1 sur une zone bien instrumentée en paramètres agronomiques de la plaine du Rhin supérieur (Ried Centre Alsace). Ils ont mis en évidence la corrélation entre le coefficient de rétrodiffusion de ERS1 et un cumul des précipitations antérieures (sur quelques jours précédant le dernier passage du satellite). Après correction (par une zonation de la pluie, basée sur les isohyètes) et calibration des données de ERS1, il est obtenu une relation linéaire (fig. 2-19) satisfaisante, en accord avec la théorie. Deux types de couvert végétal ont été testés (prairies et cultures) montrant néanmoins une faible différence du coefficient de rétrodiffusion σ^0 (0,3 dB) pour ces deux thèmes.

fig. 2-16, 17, 18, 19

Le coefficient de rétrodiffusion σ^0 (dB) est exprimé par une relation déduite de l'équation radar :

$$\sigma^0 = \frac{K \cdot R^4 \cdot Pr}{Sr}$$

avec K coefficient de calage, R distance cible (m), Pr puissance reçue (dB), Sr aire de la surface visée (m²).

Des expérimentations sur parcelles ont été menées par Mérot (1991) pour des conditions de source identiques à celles de ERS1, sur un sol nu et dans des conditions d'excès d'eau en surface : la modélisation hydrologique, qui prend en compte la notion de zone contributive, nécessite la mesure dans le temps et dans l'espace de l'extension des zones saturées. L'auteur montre la pertinence du pourcentage de la surface saturée pour expliquer la décroissance du signal rétrodiffusé, jusqu'à la réflexion spéculaire et l'identité de cette relation pour une surface lisse et rugueuse. Enfin, il est souligné la nécessité de séparer ces sols de ceux qui ne sont pas saturés par une mesure supplémentaire (température par exemple).

Prévoit et al. (1993) ont testé une modélisation semi-empirique, devant le nombre imposant de variables explicatives des modèles théoriques et des problèmes créés lors de leur inversion : le "water cloud model" ou modèle "goutte d'eau*" (Attema et Ulaby, 1978) a été employé sur des parcelles de blé, pour déterminer le LAI (Leaf Area Index) et l'humidité du sol par l'utilisation conjointe de la bande X (VV 40°) et de la bande C (HH 20°), avec le scattéromètre RAMSES. Les résultats obtenus (fig. 2-20) montrent la possibilité d'inversion du modèle pour le LAI, sur toute la gamme de mesure (de 0 à 9 m².m⁻²), mais une moins bonne précision pour la détermination de l'humidité.

* Le modèle "goutte d'eau" relie les paramètres biophysiques au σ^0 en décomposant le coefficient de rétrodiffusion radar en :

- une diffusion de surface issue du sol σ_s^0
- une diffusion en volume issue de la végétation
- un signal résultant des interactions entre le sol et la végétation
- un facteur atténuateur du signal radar par la végétation (aller et retour)

Il a été démontré que pour une configuration radar et une rugosité donnés, le σ_s^0 est relié à l'humidité du sol θ_s , par :

$$\sigma_s^0 \text{ (dB)} = C + D\theta_s$$

avec C constante sol sec et D sensibilité du signal à l'humidité du sol.

Plusieurs auteurs ont montré que dans la configuration de ERS1, la diffusion en volume issue de la végétation est proche de 0 lorsque la biomasse est faible, surtout à cause de la polarisation VV.

(D'après Troufleau D., 1996.)

Ce type d'expérimentation de laboratoire pose également le problème en termes de changement d'échelle et de son application à la mesure métrique pratiquée par ERS1. Mérot (1994) montre l'ambiguïté des données ERS1 devant les effets opposés de l'augmentation de la constante diélectrique (donc du σ^0) avec l'humidité et la diminution du σ^0 par effet spéculaire, lors de l'apparition de zones d'eau libre en milieu saturé.

Pour différents types de culture et de maturation, Dabrowska-Zielinska (1995) souligne l'importance de l'effet de rugosité (traduite par le LAI) sur les relations entre le σ^0 de ERS1 et l'humidité du sol : pour des LAI compris entre 0,5 et 1,5 la corrélation est de pente négative, et pour des LAI supérieurs à 3, la corrélation est de pente positive.

Fig 2-20, 21, 22

La simulation des configurations de ERS1, au regard de la détermination du paramètre d'humidité, a été discutée par Benalegue (1993) lors de l'expérimentation sur le bassin d'Orgeval : pour les modèles de prévision hydrologique dans la caractérisation des surfaces potentiellement ruisselantes, la rugosité est un facteur prépondérant lié au support du ruissellement. A l'échelle de la parcelle, la rugosité a un rôle de piégeage superficiel de l'eau (infiltration) et de ralentissement du ruissellement. Au niveau du bassin, la rugosité intervient sur la concentration du ruissellement. Malgré la précision requise (1 à 2 dB) pour détecter des variations d'humidité volumique, il apparaît que pour les sols nus la configuration de ERS1 n'est pas performante, la dégradation due à la rugosité masquant l'information recherchée. Pour des sols en blé, il est possible d'accéder à l'humidité à condition que les sols ne subissent plus de modifications de structure, ni en surface, ni en volume. L'auteur note également que les modèles actuels, considérant le sol comme un diélectrique homogène, ne sont pas satisfaisants (devant un modèle poreux) et que les connaissances sur les profondeurs de pénétration sont insuffisantes.

2.4. Application sur les zones humides de Guyane

Les données du satellite ERS1 (cf annexe 9), acquises les 17 avril, et les 3 et 22 mai 1992 (fig. 2-31) ont été analysées et comparées à la connaissance du terrain et de l'hydrologie des bassins-versants de la Karouabo et de la Passoura (annexe 8).

2.4.1. Situation hydropluviométrique des acquisitions

La sensibilité du radar à l'humidité du sol, par sa conductivité électrique propre, rend nécessaire l'examen des conditions hydropluviométrique lors des acquisitions (fig. 2-21). Les données du 17 avril sont situées après une petite crue provoquée par une pluie de 38 mm, tombée deux jours avant la prise de données. On peut donc s'attendre à une humidité du sol plus élevée que dans les données des 3 et 22 mai, qui n'ont pas subi de pluie dans les cinq jours précédant l'acquisition (fig. 2-22).

2.4.2. Réalités de terrain

Une série de sites ont été sélectionnés sur les bassins de la Karouabo et de la Malmanoury. Leur localisation est portée sur une donnée Landsat TM4 pour améliorer leur repérage (fig. 2-23). Deux zones de forêt ont été retenues afin de disposer de référence stable dans le temps pour le calage des rétrodiffusions aux trois dates. En effet on constate que les zones forestières présentent en radar une stabilité énergétique qui permet la comparaison multitemporelle par la conversion en amplitude (dB).

La donnée du 22 mai 92 a été géolocalisée pour permettre l'identification des cibles repérées sur le terrain au GPS (Global Positioning System).

Une série de clichés aériens obliques sur toute la zone d'étude, caractérise les éléments de paysage remarquables comme le contact entre la forêt de cordon littoral et la mangrove (fig. 2-24) et les grandes étendues d'eau libre (fig. 2-25). Pour les sites terrestres testés (n° 9 à 15), les missions au sol ont été indispensables pour évaluer par exemple la présence et la profondeur de l'eau sous la végétation dense des marais et l'extension réelle de la zone en eau (fig. 2-26 et 2-27). Les sites 12 et 15 ont été étudiés afin d'observer l'organisation de la végétation indicatrice de la rugosité de surface. Dans ces sites de savanes exondées de la haute plaine côtière (fig. 2-28 2-29 et 2-30), on remarque sur les vues verticales du sol un taux de recouvrement par la végétation assez faible en saison sèche.

fig. 2-23

dos fig. 2-23

fig. 2-24, 25

dos fig. 2-24, 25

fig. 2-26, 27

dos fig. 2-26, 27

fig. 2-28,29

dos fig. 2-28,29

fig. 2-30

dos fig. 2-30

fig. 2-31

dos fig. 2-31

2.4.3. Calibration des données ERS1

Les données brutes du 3 mai ont été calibrées, selon les informations fournies par Laur (1992). Les valeurs en amplitude A (amplitude de chaque thème) et A_0 (amplitude de référence sur la forêt) ont été calculées sur les données brutes. La relation habituelle de passage entre les amplitudes et leur expression en dB permettent de comparer la donnée brute et celle qui a été calibrée :

$$E_{\text{(dB)}} = 20 \log (A/100)$$

avec $A_{0 \text{ forêt}}$ du 3 mai non calibrées = 330
 $A_{0 \text{ forêt}}$ du 3 mai calibrées = 370

Pour la partie terrestre qui nous intéresse et à partir des mesures de rétrodiffusion que nous avons réalisées, les données calibrées sont à peine différentes des données brutes (écarts de 15 % maximum ; cf. fig. 2-32).

Dans ces conditions, les autres données de 1992 seront exploitées sans calibration.

2.4.4. Etude des profils thématiques de rétrodiffusion

La stabilité énergétique de la forêt est utilisée pour comparer les énergies électromagnétiques reçues pour chaque thème, aux trois dates (fig. 2-33), avec :

$A_{0 \text{ forêt}}$ du 17 avril =	131,5
$A_{0 \text{ forêt}}$ du 3 mai =	330
$A_{0 \text{ forêt}}$ du 22 mai =	409

On constate que :

- la "crème de vase" est un "miroir" et les énergies réfléchies sont très faibles ; elles apparaissent en noir sur le document 2-31 ;
- la mangrove présente une bonne stabilité énergétique avec des valeurs homogènes entre elles et proches de celles de forêt pour les 3 dates ;
- les marais 9 et 10 à *Eleocharis mutata* ont des réponses très différentes ;
- le marais 11 est invariant aux trois dates ;
- les savanes 12 et 13 ont les mêmes propriétés, avec une énergie élevée ;
- les savanes 14 et 15 se différencient le 17 avril par une rétrodiffusion plus forte ;

En règle générale, la limite forêt-savane est peu marquée dans les conditions d'acquisition de ERS1 (mode PRI).

NB : une donnée ERS1 en RTM (*Roll Tilt Mode*, angle de dépression de 35°) montre une accentuation du contraste forêt-savane par rapport à l'angle de dépression standard de 23°.

Interprétation

L'interprétation de ces profils doit se faire sous deux aspects, rugosité et humidité, sachant que l'onde utilisée est caractérisée par sa fréquence (5,3 GHz), sa polarisation (VV) et son angle d'incidence (23° au centre de l'image). Il se trouve que les zones étudiées ont été acquises sur deux scènes distinctes (carte 1), en recouvrement, permettant d'augmenter le nombre d'images (quatre, dont une avec artefact en croix : cf. fig. 2-23). Nous avons vérifié que les variations les plus importantes se produisaient sur les mêmes paires géométriques d'images et que, apparemment, l'angle d'incidence réel d'un bord droit (19°) et d'un bord gauche (26°) n'avait pas d'effet décelable sur nos cibles.

- Rugosité : bien qu'en période de saison des pluies, une transformation rapide de la végétation est peu probable (16 jours et 19 jours entre chaque acquisition). Les marais comportent en général une couverture à joncs, dense, atteignant entre 0,60 et 1,50 m de hauteur et qui évolue peu en 1 mois, tout comme la végétation des savanes herbeuses.
- Humidité du sol : l'augmentation du σ^0 (2 dB) des savanes 14 et 15, peut s'expliquer par une augmentation de l'humidité, après la pluie du 15 avril (38 mm).
Par contre, pour le marais n° 10, l'analyse du document montre une transformation dans la morphologie du site le 17 avril, sans possibilité d'interprétation précise.

Pour le thématique, ces premières analyses des données radar montrent que le processus de lecture de l'imagerie en milieu naturel est rendu très complexe par la réponse des cibles en termes de couple rugosité-humidité et selon les configurations de l'émetteur (fréquence, angle, polarisation). Dans ces conditions, les vérités terrain deviennent encore plus indispensables qu'auparavant, en simultanéité avec l'acquisition. Une modification du système d'acquisition produit un type d'information complètement nouveau et c'est pour cette raison qu'il est important de travailler, en tant que thématique, sur des milieux connus et dans les mêmes configurations d'acquisition.

L'accès au paramètre "humidité" n'est sans doute pas encore possible dans la configuration des radars embarqués d'aujourd'hui par manque d'éléments explicatifs du signal (matrice de diffusion incomplète).

Les applications qui se voudront opérationnelles devront intégrer les aspects multifréquence et multipolarisation, ainsi que d'autres types de données spatialisées, comme la position topographique (par MNT), la température, ou encore aborder le problème par une approche semi-empirique en caractérisant les milieux par rapport aux problématiques de l'hydrologie, avec par exemple la recherche de relations entre le ruissellement et le couple humidité / rugosité qui est peut être un ensemble plus pertinent au sens hydrologique que l'humidité elle-même.

fig. 2-34

3. Evapotranspiration

3.1. Position du problème

Terme indispensable dans l'établissement de bilans, la spatialisation de l'information concernant l'évapotranspiration est proposée dans de nombreux travaux utilisant les données satellitales. La variabilité temporelle de ce paramètre conduit à exploiter les vecteurs mettant à disposition plusieurs images par jour : NOAA et Météosat offrent ces possibilités par leur nombre de prises de vue quotidiennes (la nuit pour les données thermiques), mais de faible résolution spatiale.

Comme le notent Chehbouni et al. (1995), les variables télédéctées qui permettraient de calculer l'évapotranspiration ne correspondent pas exactement aux besoins du modèle actuel du bilan d'énergie. Il est en général proposé des estimations d'évapotranspiration qui utilisent des informations exogènes de type météorologique, des coefficients d'ajustement, l'ensemble de l'information spectrale disponible (dont le thermique) et, de surcroît, dans des conditions particulières d'absence de nébulosité.

Ces méthodes sont donc très dépendantes des sites géographiques et s'intègrent seulement indirectement aux modèles hydrologiques (Ottlé et Vidal Madjar, 1993).

L'équation générale du bilan d'énergie à la surface s'exprime, en l'absence de précipitation ou d'advection, par :

$$R_n + G + H + LE + s = 0$$

- R_n : rayonnement net sur la surface évaporante
- G : quantité d'énergie utilisée pour la conduction de la chaleur dans le sol.
- H : flux de chaleur sensible, énergie utilisée pour la convection de l'air
- L : chaleur latente d'évaporation de l'eau
- E : évaporation (flux d'eau vapeur, quantité d'eau évaporée. par unité de temps)
- s : la quantité d'énergie utilisée dans la photosynthèse (moins de 1% de l'ensemble, ce terme sera négligé).

L'amplitude des termes du bilan varie selon le site géographique : en climat humide, LE est grand devant G et H ; en climat sec, c'est H qui devient le terme principal (Précis de télédétection, 1992).

Tous ces termes sont des flux exprimés en W.m⁻², et chacun peut s'exprimer en fonction des grandeurs physiques suivantes :

- pour R_n : flux de radiations de courte (R_s) et de grande longueurs d'onde (R_L), albédo (α_s), émissivité dans les grandes longueurs d'ondes (e_L), température de surface (T_s) et, constante de Stefan-Boltzmann (σ).

$$R_n = (1 - \alpha_s)R_s + R_L - e_L \sigma T_s^4$$

- pour G : gradient de température dans le sol et sa conductivité thermique (λ)

$$G = \lambda \frac{dT}{dz}$$

- pour H : température de l'air (T_a), température de surface (T_s), densité de l'air (ρ), chaleur spécifique de l'air (C_p) et résistance aérodynamique (r_a) :

$$H = \rho C_p \frac{T_s - T_a}{r_h}$$

- pour LE : pression de vapeur de l'air (e_a), pression de vapeur saturante (e_s) à la température T_s , résistance stomatique des végétaux (r) et constante psychrométrique (γ) :

$$LE = \frac{\rho C_p (e_a - e_s)}{\gamma (r_a + r_s)}$$

Dans cette modélisation, certains termes peuvent être approchés par la télédétection qui apporte des informations indirectes sur les grandeurs à mesurer, dans le domaine électromagnétique réfléchi ou émis. Par exemple :

- radiation solaire au sol (par le couvert nuageux) ;
- estimation de l'insolation (modèles radiation de surface/ insolation) ;
- rayonnement dissipé dans l'atmosphère (modèles de diffusion) ;
- albedo (mesures par temps clair dans le visible et le proche infrarouge) ;
- température de surface (émissivité dans la bande des 10 μm) ;
- propriétés diélectriques des sols qui rendent compte de l'humidité.

En région sahélienne, Monteny et al. (1994) ont étudié les interactions entre la surface continentale et l'atmosphère pour caractériser "la climatologie à méso-échelle" (opération Hapex-Sahel). Il s'agit de comprendre l'effet de la biosphère sur les caractéristiques climatiques et leur impact sur le fonctionnement de la biosphère (fig. 2-34). Les auteurs, préoccupés par le problème de spatialisation des mesures au sol, proposent le concept de "Couche Limite de Surface" (CLS) régionale. L'analyse de son fonctionnement montre l'importance d'un changement d'équilibre climatique entre la surface et l'atmosphère, qui est observé lorsque la fraction d'eau utilisable du sol devient un facteur limitant.

3.2. Applications

Deux types d'approche ont été développées : modèles empiriques, avec détermination de coefficients de calage, et modèles déterministes, par inversion des modèles décrivant les transferts d'énergie entre le sol, la végétation et l'atmosphère.

3.2.1. Approche empirique

L'évaporation d'un sol est liée à la différence entre la pression de vapeur au niveau du sol et celle de l'air, ainsi qu'à la disponibilité de l'eau dans le sol. A partir du moment où une quantité d'eau est disponible, c'est le gradient des tensions de vapeur $e_a - e_s$, de l'équation définissant LE, qui peut être exprimé en fonction d'une différence de température.

Dans le cas plus complexe d'un sol à couvert végétal, c'est l'évaluation de la résistance stomatique qui pose un problème, car celle-ci varie avec le type de plante et avec les conditions physiques environnantes. Les plantes contribuent à l'évaporation par l'ouverture diurne de leurs stomates qui assurent la transformation de l'eau liquide en vapeur. Les mesures directes sont faites au poromètre. On accède à une donnée globale en calculant l'indice foliaire des végétaux (et LAI par télédétection) et une relation à l'évaporation en

fonction du type de couvert. Mais ces éléments dépendent aussi de l'humidité du sol, paramètre sur lequel la plante cale sa propre régulation.

La référence à l'évaporation d'une nappe d'eau libre a longtemps été faite. Pourtant, le bilan horaire du pouvoir évaporant d'une plante peut être supérieur à celui de la nappe d'eau libre. Un bilan sur 24 heures est évidemment inverse, du fait de l'absence de fonctionnement du stomate la nuit.

Quoi qu'il en soit, il existe une forte corrélation entre le taux d'évaporation et les différences de température de l'air et de la canopée.

Jackson et al. (1987) utilisent les radiations thermiques émises et réfléchies du rayonnement solaire par télédétection pour accéder à l'évaporation, avec des mesures au sol, de vent, de pression de vapeur et de radiation solaire incidente. Ils utilisent une équation modifiée de Penman et une comparaison avec les valeurs du rapport de Bowen ($b = H / LE$), mesurées sur différents sites de blé et de coton.

Reginato et al. (1985) ont combiné les mesures par télédétection de la radiation solaire réfléchie et des températures de surface avec les données météorologiques au sol (température, vitesse du vent, tension de vapeur) afin d'estimer la radiation nette (R_n) et le flux de chaleur sensible (H). Les contrôles de terrain sont effectués à l'aide de cases lysimétriques.

G est estimé en fonction de R_n par une relation empirique :

$$G = (0,1 - 0,042 \cdot h) R_n \text{ (en } W \cdot m^{-2}) \quad \text{où } h \text{ est la hauteur de la végétation.}$$

Les données satellitales peuvent être intégrées à une chaîne de détermination de l'évapotranspiration (Caselles et Delegido, 1987) qui utilise comme données exogènes les informations d'un réseau météorologique, des cartes de végétation et des coefficients liés à chaque type de culture.

La relation de base est de la forme :

$$ET_0 \text{ (mm)} = A + B \cdot R_g + C \cdot R_g \cdot T_{am}$$

où ET_0 est l'évapotranspiration maximale d'une culture de référence (prairie),
 R_g est la radiation globale obtenue par les mesures d'albedo par satellite,
 T_{am} est la température maximale de l'air (obtenue par une mesure satellite vers midi),
A, B, C sont des coefficients empiriques, fonction du vent et de l'humidité relative.

La valeur calculée de ET_0 est modifiée pour chaque culture, dont on cherche l'évapotranspiration maximale (ET_m) par un coefficient cultural K_c .

$$ET_m = K_c ET_0$$

Seguin et al. (1989), proposent une spatialisation de l'évapotranspiration au Sénégal, à partir de la relation de Jackson modifiée, qui néglige le terme G de l'équation générale et introduit la mesure satellite pour déterminer la valeur de T_s (liée à H) :

$$ET - R_n = a + b(T_s - T_a)$$

où a et b sont des constantes à déterminer,
 T_s est obtenu par télédétection par temps clair (Météosat, NOAA),
 R_n , T_a par un réseau de mesures au sol,
la pente (b) est de $0,25 \text{ mm}/^\circ\text{C}$,
la relation entre $ET - R_n$ et $T_s - T_a$ prend aussi la forme : $ET - R_n = 0,021(T_s - T_a)^{3/2}$.

Vidal et Perrier (1989) utilisent la relation précédente pour évaluer l'ET à partir de données NOAA, et la représentativité des valeurs obtenues par satellite pour Ts, dans un modèle de calcul journalier sur des cultures irriguées au Maroc. Le paramètre "a" est sensible au taux d'irrigation, mais de valeur voisine de zéro, et "b" est assez stable pour un type de culture donné.

Au Sénégal, Sandholt et al. (1993) ont utilisé des données NOAA AVHRR corrigées de l'effet atmosphérique (*split window* sur les canaux 4 et 5) pour déterminer d'une part les coefficients a (-1,18) et b (-0,50) à l'aide de mesures journalières au sol, pour présenter d'autre part une spatialisation de l'évapotranspiration (même zone d'étude que pour Seguin). Il est montré que b varie en fonction du type de rugosité de surface et que, pour calculer le total de l'évapotranspiration durant la saison 87, on a estimé un taux d'aridité par le rapport 0,02.ETR/ETP, l'ETP étant calculée avec la formule de Penman.

Rosema (1993), utilise des données Météosat sur le Burkina pour spatialiser l'ETR au pas de temps décadaire, et évaluer la biomasse herbacée. La méthode est voisine de celle de Seguin. Il propose une simulation pour les zones nuageuses à partir d'une valeur d'humidité déduite de l'ETR calculée le jour précédant (par Penman-Monteith). Il développe également une méthode dite "d'analyse par régression triangulaire" pour mieux évaluer l'incertitude sur les vérités terrain. L'auteur estime ainsi à 2 % l'erreur sur la biomasse.

Les températures de surface peuvent aussi être déduites de données Landsat TM (pixel de 120 m) comme le montrent Vidal et al. (1993,1994), qui établissent la relation entre les comptes TM et la température d'un corps noir. L'accès au bilan énergétique s'effectue par des mesures extrêmes (T_{min} avec LE max, T_{max} avec LE = 0) et des résistances aérodynamiques déduites d'observations de terrain synchrones au passage Landsat.

Une cartographie de l'évapotranspiration maximale a été réalisée par Teixeira et al. (1996) à laquelle l'auteur de ce mémoire a contribué. Le bassin-versant est en zone climatique méditerranéenne (bassin de la Peyne). Les données Landsat TM multitemporelles utilisées ont été calibrées et corrigées des effets atmosphériques (quatre dates réparties sur les quatre saisons de l'année). Les mesures microclimatiques (radiation solaire globale, humidité relative, température de l'air, vitesse du vent, pluviométrie) ont été enregistrées au pas de temps de la demi-heure, sur une tour de 10 m. Un modèle numérique de terrain a été développé au pas de 75 m., puis échantillonné à 30 m.

L'originalité de la méthode a consisté à estimer le LAI corrigé de l'élévation solaire (LAI*), nécessaire à la modélisation de Penman-Monteith, à partir du calcul du NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*, canaux 3 et 4 de Landsat TM) et d'une relation entre le LAI et le LAI*. Le calcul de l'évapotranspiration a été réalisé pour chaque pixel de 30 m, en utilisant une moyenne mensuelle tirée d'un calcul au pas de temps horaire.

La modélisation de l'évapotranspiration maximale (en mm/s) a été faite en utilisant la relation de Penman-Monteith :

$$\lambda T = \frac{\Delta \cdot R_n + \rho \cdot c_p \cdot D_{sat} \cdot g_a \cdot LAI^*}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{g_a}{g_c}\right)}$$

avec :

- λ = chaleur latente de vaporisation de l'eau
- Δ = pente de la pression de vapeur saturante
- R_n = radiation nette
- D_{sat} = déficit de pression de vapeur de la canopée vers l'atmosphère
- ρ = densité de l'air
- c_p = capacité calorifique
- γ = constante psychrométrique
- g_a = conductance aérodynamique (m/s)

$$g_c = \text{conductance max de la canopée}$$

$$LAI = 6 \text{ NDVI} - 0,39 \text{ (NDVI, index de végétation normalisé)}$$

$$\text{et } LAI^* = 2 \sin \Theta \cdot \left[1 - \exp \left(\frac{0,7 LAI}{\sin \Theta} \right) \right]$$

$$\Theta = \text{élévation solaire}$$

Il est montré les effets dominants de la topographie sur l'estimation de l'évapotranspiration, devant une part moins importante de la valeur du LAI lorsque celui-ci est supérieur à 2,5.

La spatialisation (fig. 2-35) appliquée à chaque pixel de 30 mètres, montre un résultat cohérent avec la topographie et la saison. C'est une première étape indispensable pour développer la connaissance des écoulements et des flux d'énergie, avec un modèle hydrologique distribué.

3.2.2. Modélisation

D. Troufleau (1996) fait une très bonne synthèse du délicat problème de l'utilisation des données satellitales dans l'estimation des différentes composantes entrant dans le calcul de l'évapotranspiration :

- les caractéristiques de surface en relation avec les échanges radiatifs (albédo, émissivité, température radiative) sont liées physiquement aux mesures de télédétection. Les problèmes rencontrés concernent le passage d'une mesure spectrale à la totalité du spectre et la correction du filtrage atmosphérique ;
- les caractéristiques liées aux échanges convectifs de chaleur font, par contre, intervenir des caractéristiques aérodynamiques ou structurales (LAI) pour lesquelles il faut développer des méthodes particulières comme l'introduction du fameux paramètre structural " kB^{-1} " et un " $\langle kB^{-1} \rangle$ " radiométrique, différent du premier en toute rigueur, du fait de l'introduction de la température de surface du sol détectée par satellite (T_r) dans l'équation du flux de chaleur sensible à la place de T_0 (fig. 2-36). Ce type de démarche pose également le problème de la mesure de terrain par rapport à l'échelle de la mesure spatialisée (cf § 4).

Les applications en Guyane à l'estimation de l'évapotranspiration en zones de savanes seront utiles en saison sèche (août à octobre) si l'on veut proposer une modélisation du fonctionnement des systèmes bassins-versants / zone humide, mais demanderont un important dispositif de validation au sol.

3.3. Synthèse - Prospective

Depuis quelques années, la conception des nouveaux capteurs est le résultat du compromis entre les possibilités technologiques et le concept de mission spécifique : Spot a été principalement conçu pour une mission de cartographie, Landsat pour une mission de thématique, les plates-formes radar comme ERS1 pour une mission océanographique. Les nombreux travaux thématiques effectués sur la surface continentale avec les mêmes satellites ont démontré les avantages et les lacunes des capteurs actuels. Aujourd'hui, la définition des besoins spécifiques par rapport à une problématique conduit à définir des missions complètement orientées, comme EOS (Earth Observing System) qui pourra être utilisé pour recueillir les informations pour la détermination de l'évapotranspiration.

Néanmoins, il se posera encore des problèmes de validation des données acquises par rapport aux données ponctuelles de terrain et des problèmes liés à la combinaison de données de différentes résolutions au sol.

D'autre part, l'estimation nécessaire de la température de surface en présence de végétation est encore peu maîtrisée. L'utilisation indispensable des micro-ondes n'est pas encore complètement opérationnelle dans les configurations actuelles pour la détermination de

l'évapotranspiration. Néanmoins, certaines informations sont accessibles avec le radar imageur, comme la rugosité de surface, qui intervient dans la détermination du flux de chaleur sensible (H).

fig. 2-35

dos fig. 2-35

fig. 2-36

Les instruments du projet EOS couplés aux autres capteurs comme les satellites géostationnaires, permettront d'accéder aux caractéristiques de l'atmosphère et, par des mesures directes et indirectes, aux différentes composantes physiques (énergie rayonnée vers le sol, énergie radiative du sol, flux de chaleur sensible, flux de chaleur latente) nécessaires à la détermination de l'évapotranspiration.

4. Aperçu des problèmes méthodologiques liés à l'utilisation de l'information spatialisée

4.1. Problématique générale

La mise en commun d'informations de natures diverses (mesures ponctuelles, données spatialisées des SIG-outils et cartes thématiques par satellite) est devenue d'une grande simplicité technique grâce à l'évolution de l'informatique. A l'opposé de cette simplicité, ce type de fusion d'informations pose des problèmes fondamentaux et théoriques qui sont porteurs de graves conséquences sur la validité des associations et des modélisations qui en résultent. Pour schématiser, il semblerait que, depuis que l'information de télédétection existe, le scientifique n'est pas préparé à l'utilisation de la donnée spatialisée dans sa thématique : il lui manque les éléments méthodologiques pour aborder les problèmes d'agrégation et de désagrégation spatiales des données. Parmi les questions qu'il faut se poser, pour chaque thématique scientifique (ou pour une problématique spécifique), quelles échelles de temps et d'espace doit-on utiliser et quelles sont les mesures ponctuelles de terrain qui seront pertinentes par rapport à leur spatialisation ? Existe-t-il des zones d'action interdites et où en sont les limites, si l'on peut les définir ?

Plus précisément, lorsque l'on cherche à réduire l'information spatialisée (zoom arrière, désagrégation), le changement d'échelle respecte-t-il la physique du phénomène étudié ? Dans l'affirmative, on prône le raisonnement ; dans la négative, on doit proposer une stratégie de spatialisation (Raffy, 1993). Les mêmes questions sont valables également sur le plan de l'échelle temporelle des phénomènes.

On remarquera l'opposition particulière entre, d'une part, le terrain où l'on pratique la moyenne dans le temps des mesures distribuées dans l'espace et, d'autre part, la donnée satellitale qui est ponctuelle dans le temps et qui moyenne une information sur l'espace.

Pour exposer ce problème qui nécessite l'usage de méthodes purement mathématiques, nous avons préféré choisir une application explicite et qui concerne le concept de "subpixel".

La surface couverte par un champ géophysique est étudiée par Rey Jeffrey (1994) comme une fonction du champ du capteur. Les champs géophysiques comme les nuages, la glace de mer, ou les éléments d'occupation du sol sont caractérisés dans un pixel par une partie de l'information présente. En général, cette information est extraite par seuillage. Une fonction de distribution statistique (fig. 2-37) peut être choisie pour décrire la répartition de l'information dans le pixel en fonction de sa valeur, c'est-à-dire la fraction d'aire du subpixel qui possède l'information cherchée (Kerdiles, 1995).

Une conséquence de ces applications est que si la modélisation statistique du champ géophysique est satisfaisante, on peut en déduire la taille optimale du pixel pour détecter la structure recherchée. On répond ainsi en partie au problème du choix de l'échelle de travail. Ce choix est très important car, comme le montre Raffy (1993), une résolution différente sur un même objet (fig. 2-38) conduit à une évaluation des surfaces couvertes, à seuillages identiques, de 36 %, à faible résolution et de 11 % à résolution plus élevée dans l'exemple proposé. Certains réflexes technologiques poussant à la recherche d'une résolution très fine

(pixels de 5 mètres, attitude "d'observation militaire") peuvent ainsi aller à l'encontre de l'objectif souhaité par le thématicien.

Marceau et al. (1994 a) ont étudié ce problème sur des cas concrets de plantations forestières au Canada en climat tempéré : les données proviennent d'une acquisition aéroportée, de résolution au sol de 0,5 m (MEIS II, 8 bandes spectrales) progressivement agrégées pour couvrir des résolutions jusqu'à 30 m. Les résultats sont les suivants :

- l'information thématique contenue dans les données de télédétection dépend de la résolution spatiale ;
- en négligeant les problèmes d'échelle et les effets d'agrégation, on risque de "manquer" la détection optimale des objets au sol ;
- il n'y a pas de résolution optimale unique pour des entités géographiques variées comme en forêt, qui est le résultat d'un assemblage complexe de la structure du milieu naturel ;
- par l'étude de la variance des parcelles test, il est montré que l'on peut définir une résolution optimale pour chaque type de couvert forestier et montrer que les fortes résolutions au sol ont la variance la plus importante (Marceau et al., 1994 b).

Les 8 canaux du capteur ont permis d'aborder l'optimisation spatiale au regard d'une maximisation de la discrimination spectrale. Sur 156 paires de couples spectraux, 146 sont significativement différents. Il est donc également important de raisonner en termes de dimension "spectrale".

NB : On peut simplement remarquer que dans cette étude, la méthode d'agrégation des pixels (justifiée par les auteurs par une analyse de la FTM⁹ du capteur) pour obtenir différentes résolutions n'est pas vraiment une approche d'une réalité physique correspondant à l'acquisition réelle sur site, par le capteur (Zwick et al., 1978)

La théorie de M. Raffy (1993) aborde le problème d'une façon globale et justement sous les deux aspects :

- le spatial / temporel,
- le spatial / spectral.

Les résultats de cette approche mathématique du problème sont porteurs de concepts et de développements nouveaux concernant la spatialisation des modèles, la notion de degré d'hétérogénéité et la notion de cohérence des échelles.

Dans deux publications, Raffy (1994 a et b) pose l'un des problèmes fondamentaux d'échelle que l'on rencontre en télédétection. Il remarque d'abord que, dans la très grande majorité des cas, ce que l'on attend de la mesure globale est l'accès à des paramètres de surface qui sont des moyennes, par pixel, de leurs valeurs mesurables *in situ* à l'échelle microscopique. Par exemple, si l'on s'intéresse à l'humidité de surface d'un pixel, c'est la moyenne des humidités de surface que l'on aurait à partir de mesures point par point de celle-ci dans le pixel.

Autrement dit, si Ω est le pixel *in situ*, plus précisément l'IFOV (instantaneous field of view) et $\omega \in \Omega$, les points microscopiques *in situ* de Ω , si l'humidité $h(\omega)$ est ce que l'on peut mesurer *in situ* dans le pixel Ω à l'échelle de ω (quelques cm² par exemple) ce que l'on attend de la mesure spatiale (fig. 39), c'est :

$$\int_{\Omega} h(\omega) d\omega \quad [1]$$

qui représente la somme de toutes les humidités obtenues point par point dans Ω . On peut de façon équivalente rechercher l'humidité moyenne du pixel :

⁹ Fonction de transfert de modulation

fig. 2-37,38

$$\frac{1}{|\Omega|} \int_{\Omega} h(\omega) d\omega$$

où $|\Omega|$ est l'aire du pixel (cette valeur a l'avantage de s'exprimer dans la même unité que h).

L'exemple de l'humidité s'étend sans peine à la quasi-totalité des paramètres physiques que l'on peut associer à la surface. D'autre part, la télédétection ne donne jamais accès directement à une grandeur autre qu'électromagnétique. Un radiomètre ne mesure que des luminances I_1, \dots, I_n dans n canaux spectraux. Donc, si l'on veut un paramètre de la surface (par exemple h) on doit savoir le relier à la mesure de I_1, \dots, I_n . Autrement dit, on doit savoir écrire une relation ou modèle de type :

$$h = R(I_1, \dots, I_n)$$

Le problème fondamental d'échelle en télédétection est qu'un tel modèle est mis au point et validé in situ à l'échelle de la mesure ω . Pour chaque ω on a donc bien

$$h(\omega) = R(I_1(\omega), \dots, I_n(\omega)) \quad [2]$$

et d'après la relation [1], on s'intéresse à

$$\int_{\Omega} R(I_1(\omega), \dots, I_n(\omega)) d\omega \quad [3]$$

Mais la mesure globale porte sur le pixel Ω . Pour ce pixel, la mesure radiométrique est

$$L_1, \dots, L_n \text{ avec } L_i = \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Omega} I_i(\omega) d\omega$$

En utilisant la mesure globale, on calcule donc $R(L_1, \dots, L_n)$ [4], qui n'est pas, sauf exception du cas linéaire, égal à [3].

On démontre dans Raffy (1994) que tous les écarts possibles entre la mesure [3] que l'on cherche et la valeur spatiale [4] constituent un intervalle. On donne exactement cet intervalle, qui est défini par l'enveloppe convexe du graphe de R (fig. 40).

- **La spatialisation des modèles** : on montre que l'intervalle d'erreur due à la spatialisation se réduit à un point (donc aucune erreur) dans deux cas seulement : R linéaire ou Ω homogène.

Dans les autres cas, il existe donc un modèle mieux adapté à la mesure spatiale que le modèle R , mis au point in situ, bien que celui-ci soit considéré comme exact à cette échelle d'après [3]. A titre d'exemple, Raffy (1994) pose une méthode constructive pour un tel modèle appelé "modèle spatialisé". On montre dans Raffy (1994 b et 1994 c) que l'aire couverte par un thème à l'intérieur d'un pixel Ω peut s'interpréter comme un cas particulier de ce qui précède. On peut alors appliquer le modèle spatialisé pour le calcul des aires couvertes dans Ω .

- **La notion de degré d'hétérogénéité** peut également être affinée pour des points de vue particuliers : on distingue, par exemple, la K -hétérogénéité d'un pixel, du fait que ce pixel est composé de K parties homogènes. Ce concept spécifique donne lieu à des développements que l'on trouvera dans Raffy, 1994 c ; de même la notion de pixels équivalents (Raffy, IJRS à paraître).
- **La notion de cohérence des échelles pour des modélisations complexes** est un problème qui reste à aborder.

4.2. Problématique spécifique en hydrologie

4.2.1. Une approche de type spatialisation d'une connaissance

La modélisation hydrologique prend déjà en compte l'information spatialisée, sous forme de cartographies, issue d'expertises sur des données satellitales enrichies par les bases de données géographiques (SIG, MNT). Dans ces modèles, la télédétection permet une "synthèse spatialisée" d'une réalité physique du milieu :

- cartes thématiques (morphologie, pédologie, couvert végétal) ;
- cartes dynamiques : par les synthèses chronologiques et leur interprétation (données multitemporelles, principalement radar) ;
- MNT (réalisés à partir de couples optiques de SPOT ou de JERS1, par exemple).

Dans ces domaines d'utilisation des données satellitales, nous sommes dans le champ de la *représentation de la connaissance*.

Puech (1995) propose un schéma (fig. 2-41) de liaison thématique-télédétection. Il souligne "la dépendance des phases" et notamment le fait que l'on ne peut définir toutes les étapes de façon indépendante, celles-ci réagissant les unes sur les autres. De même, il doit y avoir "concordance des échelles" : les critères de découpage de l'espace doivent tenir compte de la physique des processus, comme par exemple les lois qui décrivent l'infiltration à l'échelle d'un bassin-versant (qui sont encore à préciser) et qui n'ont pas le même champ spatial que les lois de l'hydrodynamique utilisées sur une parcelle.

4.2.2. Une approche du signal physique spatialisé

Pour améliorer la performance des modèles hydrologiques, il convient d'intégrer aux méthodes de modélisation classiques la donnée spatialisée collectée par télédétection, comme par exemple une information sur la qualité de l'eau, l'humidité ou l'évapotranspiration. Certaines informations étaient depuis longtemps disponibles avec les données optiques (et infrarouge thermique), mais la réflexion scientifique est encore théorique devant les problèmes posés par cette approche. D'autre part, la démarche scientifique est tenue maintenant d'intégrer les informations nouvelles provenant des capteurs micro-ondes passives ou actives qui sont à considérer comme des mesures physiques, au travers de la spatialisation du coefficient de rétrodiffusion radar.

Nous sommes dans un champ nouveau que l'on pourrait assimiler à *l'intégration de la mesure géophysique spatialisée* en hydrologie.

En termes de quantité d'information, il est certain que la connaissance de l'humidité du sol sur un bassin-versant, avec une faible résolution spatiale et une grande incertitude sur la valeur absolue, représente une information quantitative importante, vis à vis des approximations qui sont en général faites pour satisfaire aux conditions d'utilisation des modèles analytiques. C'est tout le problème de la réalité physique d'une mesure spatialisée, devant nos méthodes actuelles de modélisation.

Cette démarche posera encore de nombreux problèmes méthodologiques, par exemple :

- le type de démarche scientifique, vu la complexité des phénomènes naturels (apprentissage par l'exemple, approche analytique, ou les deux) ;
- les types de mesures de terrain (en général ponctuelles) pertinentes pour leur comparaison aux données spatialisées, et ayant un sens en hydrologie ;
- le choix des échelles (temps/espace) de travail par rapport à une modélisation donnée ;
- l'intégration de l'information spatialisée dans les fonctions de production des modèles.

fig. 2-39

4.3. Conclusion

L'utilisation des données satellitales dans le domaine de l'hydrologie des zones humides côtières peut se décomposer en deux grandes directions :

- l'une plutôt qualitative, comme la reconnaissance des propriétés optiques de l'eau des estuaires et des plans d'eau, l'estimation des surfaces en eau, qui apporte une information nécessaire à la compréhension des mécanismes hydrodynamiques ;
- l'autre de caractère quantitative, pour préciser et spatialiser certains termes du bilan hydrologique comme l'humidité et l'évapotranspiration.

Dans tous les cas, le caractère opérationnel d'une application est bien souvent spécifique d'une aire géographique, des contraintes liées aux données utilisées et du type d'approche, soit empirique, soit par modélisation directe. Faire un bilan des possibilités des satellites dans ces domaines présente des risques d'inexactitude. Les applications que nous avons décrites notamment en utilisant les données radar avaient pour objectif de préparer des expérimentations plus poussées, en vue de validation.

Toutefois, sur les zones tropicales que nous avons étudiées, on peut retenir les éléments suivants.

La donnée optique (Landsat TM) permet d'établir des relations empiriques avec des paramètres comme la turbidité et la chlorophylle, mais qui dépendent des sites géographiques et sans doute aussi des types de cibles. La spatialisation de l'information est néanmoins possible et cohérente avec les réalités de terrain.

Dans le domaine du thermique, il est possible de réaliser une spatialisation des températures relatives dans ces milieux, tant en mer pour séparer les masses d'eau d'origines continentale et océanique, que dans les milieux humides pour disposer d'une information sur les caractéristiques thermiques de l'occupation du sol (plans d'eau, vasières, mangrove, savanes, forêt, etc.)

Pour le domaine concernant l'humidité des sols, la résolution spatiale des systèmes micro-ondes passives est encore trop faible pour être utilisée dans nos zones d'étude. En micro-ondes actives, une bonne connaissance du terrain et des conditions hydro-pluviométriques permet de mettre en évidence et de spatialiser certains changements relatifs dans des savanes à faible couvert végétal. Au-delà de ces conditions, il est encore prématuré de chercher une loi empirique ou de modéliser le signal rétrodiffusé, tant la variété des couvert végétaux des zones humides est grande. De plus, la présence d'eau non détectable sous d'importantes couvertures de plantes aquatiques peut égarer le thématicien en rendant la démarche inutile.

L'estimation de l'évapotranspiration en zone humide tropicale demande encore à être expérimentée, dans la mesure où l'on est en général proche de la valeur maximale, la demande en eau par la végétation étant satisfaite. Une spatialisation, même grossière, de cette information est possible compte tenu des travaux déjà réalisés dans ce domaine et permettrait de préciser ce terme du bilan hydrologique. Les opérations de validation seraient encore à mettre en place si l'intérêt s'en faisait sentir.

La donnée satellitale peut également être exploitée dans un domaine que l'on pourrait qualifier d'hydro-thématique : c'est ce que nous allons développer au chapitre suivant dans un objectif de gestion intégrée de ces écosystèmes.

Chapitre 3 - *Gestion intégrée des zones humides - Apports de l'information spatialisée*

Introduction

La démarche de gestion intégrée des zones côtières est par 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, qui précèdent toute la démarche. Quelle que soit la méthode de gestion proposée, l'analyse préliminaire des zones étudiées nécessite une méthodologie d'approche des milieux qui satisfasse à leur connaissance, à leur typologie et à leur classification puis, lorsque c'est possible, à leur description fonctionnelle.

Les zones humides de la Guyane, situées non loin de la ligne de rivage, font et feront l'objet de projets d'aménagement alors que, par ailleurs, elles sont reconnues, pour certaines de ces zones en relation directe 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 3 700 tonnes pêchées par an (Lhomme, 1992). L'étude de ces vastes espaces paraliques nécessite l'utilisation de données spatialisées d'origine satellitale, tant pour la description des milieux que pour leur approche fonctionnelle.

Ce chapitre aborde tout d'abord les différents concepts proposés pour élaborer une méthodologie de gestion intégrée des zones côtières et humides. Une application au cas guyanais est présentée dans le cadre d'une problématique de planification préventive des zones humides de la Guyane, dans le respect de deux objectifs :

- maintien de la biodiversité ;
- projet d'éco-développement du département.

L'approche intégrée nécessite bien entendu l'utilisation de résultats scientifiques pour la classification des zones humides, la régionalisation des résultats, mais aussi des synthèses spatialisées d'indicateurs pertinents pouvant servir à communiquer le contenu d'une connaissance. Nous examinerons les limites des méthodes de classification, puis l'intérêt de nouvelles approches associant l'aspect fonctionnel à la classification. Une démarche globale sur tout le littoral guyanais, où les données hydrologiques sont parfois absentes, a montré la nécessité d'une modélisation de la relation pluie/débit pour les apports du bassin-versant à la zone humide (annexe 11), et des hauteurs d'eau et des volumes dans les systèmes humides eux-mêmes.

Enfin, nous proposerons une spatialisation contribuant à la mise en oeuvre de la démarche et illustrée par une cartographie fonctionnelle hydrologique qui, associée aux autres thématiques, permet d'aborder la notion de vulnérabilité intrinsèque du milieu.

1. Gestion intégrée

1.1. Principes généraux

Parmi les objectifs liés à la gestion intégrée des zones côtières énoncés à la conférence de Rio en 1992 (Le monde diplomatique, 1992) figure : "permettre dans toute la mesure du possible aux particuliers, aux groupes et aux organismes d'accéder à l'information pertinente et offrir les possibilités de consultation et de participation à la planification et à la prise de décision aux niveaux appropriés :

- 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 des zones côtières et marines".

Ceci pose le problème du modèle de connaissance à représenter et de la manière de le faire. Stearns (1978) avait catalogué un certain nombre d'objectifs spécifiques pour la gestion des zones humides :

- 1) maintenir la qualité de l'eau ;
- 2) réduire l'érosion ;
- 3) protection contre les crues ;
- 4) favoriser les processus naturels pour le traitement des polluants disséminés par voie aéroportée ;
- 5) mettre en place des zones tampons pour atténuer les effets des activités humaines proches (urbanisation, industries) ;
- 6) préserver une biodiversité et maintenir des exemples d'association floristiques typiques de zones humides ;
- 7) préserver les aspects paysagers ;
- 8) contrôler la population d'insectes ;
- 9) favoriser les niches écologiques ;
- 10) gérer la production ligneuse ;
- 11) accélérer l'investigation scientifique.

Certains de ces objectifs ou actions à entreprendre font partie d'un ensemble de caractéristiques de la zone humide en relation avec l'environnement physique et social. Maltby et al. (1994) proposent un schéma général entre les processus naturels (hydrologie, biologie, chimie, physique), les fonctionnalités (écrêtage des crues), les valeurs sociales (protection contre les crues) et la production de l'écosystème humide (fig. 3-1), en relation avec la structure et les attributs d'une zone humide dans la société. L'activité scientifique est en cours d'adaptation pour décrire ces liens fonctionnels dans les hydrosystèmes. La démarche de classification et de constitution de bases de données dans l'objectif de description des espaces humides est la première action concernant le domaine de la recherche scientifique.

Le travail d'inventaire et de classification de l'espace réel permet de construire des bases de données largement exploitées désormais à l'aide des systèmes d'information géographiques (SIG). L'emploi de SIG permet de manipuler des plans d'information de façon plus souple et de produire sur support cartographique des résultats de requêtes, dont la qualité dépendra des choix de départ : type de classification et précision cartographique des documents d'origine.

A titre d'exemple, la base de données européenne *CORINE Land Cover* utilisée à des fins de gestion du littoral, comporte une trentaine de thèmes d'occupation du sol. Une utilisation sur l'espace littoral de l'Hérault et du Gard a été faite par Durand (1995) : utilisée conjointement avec une base de données altimétriques et des informations du service maritime, ce travail montre comment utiliser l'outil SIG pour intégrer la notion de risque d'érosion dans une politique globale de gestion du littoral. Le principal problème est la précision du résultat, et surtout celui des simulations :

- le maillage actuel altimétrique est trop grossier (250 m) pour faire une évaluation correcte de l'érosion côtière, dont la valeur est du même ordre de grandeur à l'échelle du siècle.
- l'intégration de mesures ponctuelles d'érosion soulève des problèmes de modélisation qui ne sont pas résolus par le logiciel d'exploitation des données utilisé.

Enfin, la typologie n'inclut pas les spécificités tropicales.

Cet exemple, parmi d'autres, montre combien il est important de définir les caractéristiques des bases de données, leur précision et leurs incertitudes relative et absolue par rapport au problème que l'on veut traiter. Cette difficulté n'est pas nouvelle pour la plupart des études, mais elle est devenue sans doute plus aiguë du fait que l'on a besoin de spatialiser l'information (résultats de mesures, résultats d'expertise, résultats de simulation).

Bon nombre de ces actions nécessitent une collecte de données, c'est-à-dire, pour certaines disciplines, organiser un plan de mesures optimisé pour la collecte de données de terrain, réaliser leur critique et connaître leurs incertitudes relative et absolue. Nous désirons évoquer ici le problème de la précision de la mesure et du plan expérimental puisque la qualité du résultat conditionnera aussi fortement la suite des étapes dans une démarche de gestion intégrée. Par exemple, il est assez rare de trouver les fameuses "barres d'erreur" dans certaines études sur la qualité de l'eau. Or celles-ci sont indispensables lorsque l'on aborde le problème des seuils réglementaires ou des seuils en général. Le scientifique a bien sûr une responsabilité en termes de qualité mais aussi, dans ce cas, une exigence de représentation de ses résultats, sachant qu'ils vont être exploités par la suite pour d'autres objectifs que la connaissance pure (indicateurs du milieu, tableau de bord sur l'environnement, etc.).

Fig 3-1

1.2. Approche actuelle intégrée trans-sectorielle

1.2.1. Analyse IUCN, 1994

Cette démarche aborde les problèmes de gestion de l'espace côtier mondial. Elle se décompose en 7 actions (fig. 3-2) au minimum, irréductibles, qui doivent être menées pour proposer un plan et un cadre de gestion qui prennent en compte la spécificité et la complexité de chaque site côtier. L'approche opérationnelle doit s'étendre au politique, à l'institutionnel, et à leurs relations avec les différents champs du milieu physique.

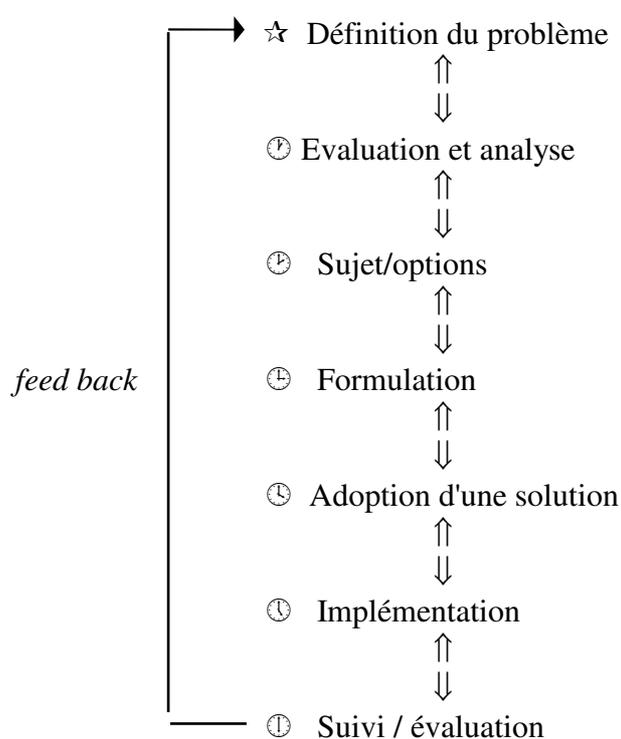


fig. 3-2 - Approche IUCN

Il y a interaction forte entre chacun de ces sept éléments : le processus à retenir est l'interaction dynamique et le consensus liant toutes les parties impliquées dans chaque point évoqué. L'action 4 (formulation) montre la nécessité actuelle de mettre en relation la communauté d'acteurs (fig. 3-3) impliqués dans le processus de décision. Ceci rend nécessaire, entre autres, l'utilisation des réseaux de communication pour un partage des données.

Dans le schéma 3-2, nous avons insisté sur la nécessité d'un *feedback*, entre l'action 1 (définition du problème) et l'action 7 (suivi/évaluation), qui montre qu'il doit y avoir un lien fort entre ces deux actions et un repositionnement du problème par rapport aux résultats. En d'autres termes, il s'agit du "retour d'expérience", étape indispensable, souvent omise.

fig. 3-3

1.2.2. Méthode UNESCO / COI de gestion intégrée des zones côtières

Dans le contexte du comité COI (Commission Océanologique Intergouvernementale), de l'UNESCO, l'auteur de ce mémoire a participé à la définition d'une nouvelle méthode (Denis et al., 1996).

Principe

Une démarche méthodologique type a été élaborée pour constituer le fil directeur des tâches qu'un futur utilisateur aurait à suivre. Elle comporte un certain nombre d'étapes qui sont destinées à construire une stratégie de gestion.

Les différents sites inventoriés seront classés selon leurs grands traits physiques et anthropiques. Ce classement est un travail qui demande des compétences pluridisciplinaires ; il est primordial car il conditionne le contexte dans lequel s'inscriront des règles de gestion.

Identification des problématiques

Les problématiques concernant l'environnement sont très variées du fait de la grande diversité des espaces à appréhender et des impacts de l'homme. Elles correspondent à des modes de gestion propres à chaque site. La connaissance et la formalisation de l'ensemble des problématiques auxquelles les gestionnaires peuvent se trouver confrontés contribuent à préparer et orienter la suite de la démarche. Il doit y avoir dans cette étape une analyse des phases du processus de décision en fonction du problème posé.

Communautés d'acteurs

Chaque cas met en présence et en interaction un nombre variable d'intervenants. La nécessité de connaître les rôles respectifs de chacun dans le cadre d'une action de gestion est justifiée. On doit donc rechercher un consensus général pour définir et atteindre l'objectif fixé dans les meilleures conditions. L'identification aussi complète que possible de la communauté d'acteurs impliqués est, par ailleurs, associée à une analyse des réglementations en vigueur. Cette connaissance initiale est primordiale car elle peut fortement influencer les prises de décision ultérieures en matière de gestion.

Unités fonctionnelles et cadres de gestion

Le mode d'approche de la zone côtière, qui se veut global, nécessite cependant des cadres de raisonnement limités dans l'espace pour en faciliter la connaissance, la compréhension et ultérieurement la gestion. La démarche s'applique alors à des unités territoriales définies par découpage de l'espace littoral. Ces unités, dites fonctionnelles, sont des sous-espaces où les liens de cause à effet vis-à-vis des perturbations qu'elles subissent sont les plus forts. Elles représentent alors autant de cadres cohérents dans lesquels les règles de gestion seront établies.

Inventaire des données

La prise en compte des problèmes de gestion fait appel à de nombreuses données provenant de domaines très variés (en premier lieu terrestre et marin) concernant les environnements à la fois naturels (composantes physique et biologique) et humains (composante socio-économique).

Les données recherchées relèvent directement des critères sélectionnés pour appréhender le complexe bassin-versant / espace littoral associé. Leur nature relève des paramètres de caractérisation de chacun de ces critères :

- critère *physique* : il regroupe les paramètres d'ordre :
descriptif, pour caractériser le milieu dans ses grandes composantes ;
dynamique, pour apprécier les facteurs d'évolution possible du milieu.
- critère *écologique* : il regroupe les principaux paramètres indicateurs de la richesse du milieu ;
- critère *activités humaines* : il regroupe les principaux paramètres indicateurs de la pression anthropique qui pèse sur le milieu ;
- critère *d'état* : il regroupe les principaux paramètres indicateurs de la qualité du milieu ou l'influençant (apports, rejets).

Indicateurs et indices

Il est important de savoir évaluer les composantes de la problématique rencontrée. Cette recherche a pour objet de mettre en avant les thèmes les plus préoccupants et les plus sensibles. Elle se base notamment sur diverses méthodes d'analyse, statistiques ou non. A chaque axe sensible ainsi identifié au sein d'une problématique donnée, seront attachés des éléments pertinents d'information sur la situation. Ce sont les indicateurs dont le rôle est déterminant pour qualifier de façon synthétique l'état des situations. Des indices peuvent ensuite être mis au point pour quantifier et représenter une situation en apportant des éléments sur les tendances d'évolution.

Du fait de la complexité des phénomènes en présence, on est obligé, pour ceux qui sont observés, d'avoir recours soit à un choix restreint d'indicateurs spécifiques (teneurs en nitrates, en mercure ou en plomb, pH, présence d'une espèce d'oiseaux, diversité de la flore, etc.), soit à des indicateurs globaux qui constituent, sous la forme d'indices synthétiques, l'agrégation d'informations. Ces indicateurs globaux peuvent être aussi obtenus à la suite d'expertises thématiques utilisant les données de télédétection. On obtient dans ce cas un indicateur spatialisé.

Enveloppe de surcharge

Cette notion, complémentaire de la précédente, permet de visualiser les situations selon les axes sensibles identifiés et évalués au moyen des indicateurs et indices. Une enveloppe dite "de surcharge" peut être définie à partir de ces éléments pour aider à représenter les fourchettes d'évolution acceptables pour le milieu. Ainsi, on peut être confronté à des situations critiques dans lesquelles un déséquilibre profond est atteint ou, au contraire, à une situation normale dont l'équilibre est considéré comme relativement stable. Les situations intermédiaires sont les plus délicates à appréhender, notamment lorsque la valeur d'un indicateur se situe autour d'un niveau critique générateur de risques d'évolution aléatoire et incontrôlable. Dans la réalité, le problème crucial réside dans la détermination des indices et la délimitation des enveloppes de surcharge (capacité d'acceptation du milieu, capacité de régénération, etc.).

1.3. Application en Guyane

Identification de la problématique

Les changements rapides du littoral peuvent faire apparaître ou disparaître des marais permanents d'eau douce ou d'eau saumâtre, pouvant ainsi remettre en cause les plans d'aménagement. Les modifications de la ligne de rivage et des zones humides ont aussi des conséquences sur la faune marine, puisque de nombreux cycles de reproduction et de croissance y sont localisés (ex : crevette pénéide).

La zone littorale située à l'ouest de Cayenne comporte l'essentiel de l'urbanisation et des activités humaines. La population de la Guyane se répartit dans les principales villes côtières, dont le nombre est inférieur à la dizaine.

Pour l'instant, la pression anthropique s'exerce plus directement sur le littoral, où se tient la majeure partie des activités : l'urbanisation et sa recherche d'espace, l'extension des terres agricoles, les activités industrielles, la pêche artisanale et industrielle crevette, les infrastructures routières et portuaires.

On peut identifier quelques domaines "à risque", compte tenu du contexte tropical, dans le domaine de la santé publique : qualité de l'eau fluviale et de nappe, assainissement des eaux usées et traitement des déchets urbains.

Néanmoins l'emprise anthropique est encore faible, puisque que l'on peut estimer à environ 66 km² (sur 1 270 km²) la surface transformée, soit 5,2 % du total, à l'ouest de Cayenne.

Enfin, parmi les questions posées qui ont une forte incidence sur des projets de gestion intégrée du littoral, il en est une qui concerne la connaissance scientifique : celle-ci est encore très parcellaire, faute de réseaux de mesure et d'observation suffisants. Les effets d'une perturbation ne sont donc pas toujours mesurables actuellement, par absence de références sur le milieu naturel.

Ces éléments montrent la nécessité de mettre en place une démarche de "planification préventive des espaces côtiers et des zones humides" dans le département de la Guyane.

Communauté d'acteurs

- 1) acteurs scientifiques : organismes de recherche (BRGM, CIRAD, ENGREF, IFREMER, ORSTOM) ; groupements scientifiques (GIS : Sylvolab, Ecolab) ; formation scientifique (Université Antilles Guyane) ;
- 2) services de l'Etat : Préfecture (actions dans le cadre des Contrat de plan Etat-Région ; ZNIEFF¹⁰ : sauvegarde de la biodiversité ; réseau d'espaces protégés) ; DIREN ; ADRIR ; Conseil Général et Régional ; ONF, DDE, DDAF, Défense Nationale, Affaires Maritimes, communes ;
- 3) agents économiques : industriels (Ariane Espace, EDF), industrie de la pêche ; associations ; consommateurs (éco-tourisme) ;

¹⁰ ZNIEFF : Zones Naturelles d'Intérêt Ecologique, Faunistique et Floristique.

- 4) instances de protection au niveau national :
- marais et cordons dunaires de Mana (réserve naturelle) ;
 - forêt sur sables blancs de Mana (arrêté de biotope) ;
 - bassin de la crique Yiyi (réserve naturelle) ;
 - savanes, mangrove et forêts du bassin de la crique Malmanoury (réserve naturelle volontaire du Centre spatial guyanais) ;
 - battures de Malmanoury (arrêté de biotope) ;
 - mornes de l'île de Cayenne et salines de Montjoly (arrêtés de biotope) ;
 - marais et montagne de Kaw (réserve naturelle) ;
 - île du grand Connétable (réserve naturelle).

Cadres de gestion et unités fonctionnelles

La définition de ces unités dépend des problèmes posés et des échelles de travail mais, dans le cas particulier de ces vastes espaces peu aménagés, nous avons essentiellement adopté une approche morphologique et fonctionnelle.

Le zonage repose sur une identification géographique des parties aval des bassins-versants (estuaire, zones humides) et de leurs relations avec l'océan qui comportent différents degrés, selon l'importance du bassin et le contexte morphologique du rivage (érosion, accrétion du littoral selon la position des bancs de vase). Des limites transversales recoupent les domaines géographiques terrestres et marins :

- limite terrestre : zone d'apparition du socle ou limite des bassins-versants en connexion avec une zone humide ;
- limite marine : bathymétrie englobant les activités de pêche côtière (au-delà de la ligne des 30 mètres) et le transit sédimentaire.

Ces limites morphologiques, difficiles à préciser dans la zone humide (demandant une bonne connaissance du terrain et de la topographie), permettent de définir 4 unités fonctionnelles dans le système bassin-versant, zone humide associée et zone côtière (fig. 3-4). Le schéma proposé concerne les zones géographiques situées à l'ouest de Cayenne. Nous proposons de séparer les ensembles situés à l'est et à l'ouest de la presqu'île de Cayenne pour des raisons morphologiques (Prost, 1990) et biogéographiques. En effet, l'herpétofaune (amphibiens, reptiles) des marais côtiers, présente à l'est des caractéristiques à affinité amazonienne, tandis qu'à l'ouest elle possède des caractéristiques du nord-est de l'Amérique du Sud (Gasc et Lescure, 1979).

Les ensembles ainsi définis sur ces critères se rapprochent d'une cohérence géographique et fonctionnelle. Par contre, leurs surfaces peuvent être très différentes (de 10 à 10³ km²).

Inventaire des données

Dans l'état actuel des études, ne seront décrits ici que les aspects relatifs au milieu physique sub-côtier. On distinguera, à un premier niveau, les données ponctuelles (acquises par réseau de mesure et d'observations de terrain), et les données spatialisées.

La base de données spatialisées est composée de nombreuses photos-aériennes datant pour les premières des années 50 (environ 3000 clichés) et de la base de données satellitale (SPOT, Landsat, radar imageur).

La base de données des mesures de terrain est gérée par chacun des organismes de recherche chargés de leur collecte et de leur synthèse.

fig. 3-4

L'inventaire des données concerne les domaines suivants :

- *sédimentologie* du système de dispersion amazonien : cartes de l'évolution de la ligne de rivage depuis 1956 ;
- *courantologie* : nombreuses séries temporelles dans le cadre des grands programmes internationaux sur la circulation océanique (WOCE) ;
- *botanique* : herbier de Cayenne ; inventaire de plus de 100 000 échantillons et base de données informatisée ;
- *pédologie* : cartes pédologiques de la plaine côtière, synthèse ponctuelle et cartographies sur la région de Sinnamary ; variabilité spatiale des caractéristiques physiques (granulométrie, porosité) et hydrodynamique dans les sols des barres pré littorales ;
- *géochimie* des eaux superficielles : mesures ponctuelles des propriétés physico-chimiques des eaux de surface (séries temporelles, région de Kourou) ;
- *géomorphologie* : mesures granulométriques, datations C₁₄, minéraux lourds (île de Cayenne, Kourou, Sinnamary, Mana), cartes de synthèse sur le littoral (régions de Cayenne, Kourou, Sinnamary, Mana) ;
- *géologie et hydrogéologie* : suivi piézométrique des nappes, cartographie des aquifères, cartes de lithologie des formations superficielles (au 1/50 000) et SIG (aptitude aux fondations et travaux routiers, ressources en matériaux BRGM) ;
- *hydrologie* : réseau de mesures de hauteurs ; publication d'un annuaire hydrologique par l'ORSTOM (ISNN n° 0988 - 4904), synthèse hydrologique sur les bassins côtiers et leur zones humides associées (île de Cayenne, Kourou, Sinnamary, Mana), études ponctuelles sur les estuaires : Sinnamary, rivière de Cayenne ;
- *hydrobiologie* : inventaire des nurseries de crevettes sur le littoral, inventaire des espèces côtières et estuariennes de poissons ;
- *avifaune* : inventaire sur sites (Cayenne, Kourou).

Indicateurs et indices

Nous avons distingué trois axes majeurs pour aborder la problématique posée.

Le *premier axe* est relatif à la valeur écologique. Il concerne des milieux marécageux en arrière du front de mer et en relation franche ou indirecte avec l'océan. Ces milieux abritent des espèces qui sont soit inféodées aux sites (flore, faune), soit en phase d'habitat temporaire (crevette par ex.). L'état de ces milieux est conditionné par un facteur important : le degré d'échange avec l'océan. Il y a une forte relation entre l'état "mécanique" du cordon sableux, la sédimentation littorale et la capacité d'échange océan / continent. L'indicateur choisi sera la "capacité d'échange avec l'océan" ; on définit alors un indice d'échange (valable à un instant donné) selon la situation morphologique du littoral.

L'intégration des différentes informations pluridisciplinaires peut s'attacher dans ce cas à réaliser une "zonation écologique" en prenant en compte par exemple des indicateurs de sensibilité du milieu et de valeur patrimoniale. On effectuera à ce stade une opération de spatialisation.

Le *second axe* concerne la pression anthropique. Il traduit l'emprise sur le littoral et les zones humides : urbanisation, extension des terres agricoles, activités industrielles, infrastructures diverses. Cet aspect n'a pas encore été abordé dans les études. Il s'agira de trouver des indicateurs de transformation du milieu.

Le *troisième axe* concerne la pollution. Il traduit surtout des aspects liés à la qualité de l'eau : assainissement urbain, qualité de la nappe phréatique littorale, qualités physico-chimique et biologique des eaux fluviales, qualité sanitaire des plages. Les indicateurs sont des paramètres physico-chimiques et biologiques représentés par des indices définis selon les normes européennes en vigueur.

Enveloppe de surcharge

Un choix de "représentation" des axes et des indicateurs est encore à imaginer car il faut pouvoir travailler avec plusieurs axes, comportant chacun plusieurs indicateurs. Cet outil permettrait de définir une enveloppe des indices de surcharge du milieu, d'état et de réglementation : la figure 3-5 illustre un cas simple à deux dimensions, dans lequel il n'y a qu'un indicateur par axe. Dans notre exemple, on construit une enveloppe d'état à partir des éléments mesurées sur le terrain. Comparée à l'enveloppe des seuils de tolérance du milieu, définis à partir des études scientifiques, on construit la notion de "distance" entre deux enveloppes qui peut être utilisée pour définir une "capacité de charge du milieu" et une "capacité de charge relative à la réglementation" par rapport à la législation en vigueur.

Une telle représentation sur tous les axes identifiés par l'analyse de la problématique serait aussi un outil de communication entre les disciplines scientifiques et les utilisateurs de la recherche. On rejoint dans cette configuration la notion de "tableau de bord" sur l'environnement.

Ce cas d'étude en Guyane est spécifique d'un pays caractérisé par des aménagements limités, une très faible population et un haut niveau de vie par rapport aux pays limitrophes. Il est donc nécessaire de définir des indicateurs adaptés pour proposer par la suite une démarche de type "éco-développement" dans laquelle on se fixe un objectif de planification environnementale préventive de la zone littorale.

2. Classification des zones humides

La recherche d'axes et d'indicateurs du milieu ne peut se faire sans avoir au préalable exploité au mieux les bénéfices des résultats de la recherche scientifique. Les approches par classification ont le mérite de bien décrire l'objet d'étude et il était nécessaire d'aborder ce domaine en milieu humide et côtier.

2.1. Présentation et objectifs

- **L'objet : un continuum**

L'espace de transition que représentent les zones humides, entre l'océan et le continent, fait l'objet de réflexions méthodologiques pour répondre au besoin de typologie nécessaire à la classification de ces milieux, et à leur gestion. Un problème se pose du fait que la zone humide représente souvent un *continuum* reliant un environnement marin à un environnement continental (Turner, 1992).

La description qualitative de ces zones est souvent désignée par les auteurs anglo-saxons par le terme "classification", tandis que la seconde activité concernant leur distribution géographique et leur extension, opération quantitative, est désignée par le terme "d'inventaire".

- **Une approche par classification**

Depuis 1960, des typologies des zones humides ont été mises en place, puis complétées par les spécialistes. Ces méthodes ont conduit à générer un vocabulaire souvent propre aux sites d'étude (et le plus souvent dans les pays industrialisés) ou aux catégories de zones humides (continentales, côtières). La typologie la plus complète actuellement est probablement celle de Cowardin et al. (1979) qui se base sur une méthode empruntée à la systématique utilisée (annexe 10).

fig. 3-5

On y distingue des systèmes, des sous-systèmes et des classes. Ces auteurs ont par ailleurs cherché à enrichir la démarche par l'identification de quatre propositions dans un objectif d'aide à la gestion (Mitsch et Gosselink, 1993) :

- 1) décrire des unités écologiques ayant une certaine homogénéité naturelle ;
- 2) proposer des unités pour l'inventaire et la cartographie ;
- 3) organiser ces unités dans un objectif d'aide à la décision en terme de gestion de la ressource ;
- 4) obtenir des concepts génériques et une terminologie commune à l'échelle d'un pays.

- **Un objectif de gestion**

La recherche d'*unités écologiques* montre le souci de trouver des méthodes répondant à des objectifs de classification plus générale, applicables à l'échelle nationale ou régionale, dans un objectif de gestion intégrée.

Les études régionales et les problèmes posés par les aménagements montrent le besoin d'une classification des zones humides à des fins d'inventaire. La gestion intégrée des zones côtières, surtout en cas d'impact sur l'environnement d'un aménagement, impose de réaliser une nomenclature des zones et d'en mesurer ensuite leur extension.

Ce besoin est d'autant plus important actuellement que les activités anthropiques sont de plus en plus fréquentes sur la frange littorale et qu'elles génèrent des conflits d'usage, d'intérêt, voire idéologiques, lorsque des valeurs écologiques sont fortement identifiées.

2.2. Historique sommaire des classifications

Les zones humides d'Europe et d'Amérique du Nord ont été les premières à faire l'objet de telles tentatives. Dès 1907, Davis propose une classification des marécages du Michigan selon trois critères : le type de zone où se développe le marécage (lac peu profond, delta) : la genèse du système humide par ses propriétés au fond ou sur les berges ; enfin, le type de végétation. En Europe, d'autres auteurs (dont Bellamy, 1974), se basant sur un travail plus ancien de Weber (1908), proposent une classification par rapport aux conditions hydrodynamiques. Trois grandes catégories sont différenciées : la première nommée "rhéophile", la seconde "de transition", la troisième "ombrophile", chacune munie de subdivisions qui rendent compte des flux d'eau de surface et souterraine.

Toutes ces démarches ont été développées pour un lieu géographique donné et leur généralisation est délicate. Néanmoins, le regroupement de ces idées est pertinent et permet de concevoir les classifications adoptées actuellement.

L'U.S. Fish and Wildlife Circular n° 39

Au début des années 50, il a été publié une classification (Martin et al., 1953) contenant 20 types de zone humide, à partir de 4 catégories principales, basées sur la qualité de l'eau (eau douce / eau saumâtre) et leur position géographique par rapport à la côte (continental / côtier). Les subdivisions sont définies en fonction de la profondeur du marais et la fréquence des inondations. Cette démarche fut très utilisée aux Etats-Unis jusqu'en 1979, où une adaptation fut réalisée en introduisant un critère de "végétation" et en ajoutant plusieurs aires géographiques, comme les zones tropicales et les zones glacées.

2.3. Classification des zones humides côtières

En 1974, H.T. Odum, Copeland et McMahan introduisent encore d'autres paramètres liés au fonctionnement propre, comme les variations de température et d'ensoleillement. La notion de *stress* est aussi proposée, en fonction du type de climat et des cycles des deux facteurs de température et d'ensoleillement.

Les mangroves et les marécages associés sont classés dans la catégorie "Type B" - écosystèmes naturels tropicaux", du fait des faibles variations de température et de luminosité annuelle, c'est-à-dire pour leur *stress* climatique réduit.

Un nouveau type est également proposé, le "Type E", relatif à la genèse d'écosystèmes anthropisés, en fonction des divers types et degrés de pollution (huiles, pesticides...).

2.3.1. Classification selon le gradient d'énergie hydrodynamique

Gosselink et Turner (1978) proposent de considérer le niveau d'énergie engendré par les pluies et les crues pour classer les zones humides.

Tableau 3.1 - Classification qualitative selon des critères hydrodynamiques

Type de zone humide	Hydrodynamisme	Exemple
1. Élevé - convexe	Variation saisonnière de la pluviométrie et de la capillarité	Marécage tourbeux ombrotrophique (bog)
1. Prairie	Variation saisonnière de la pluviométrie et de la capillarité ; quelques apports par l'amont	Marécage tourbeux stagnant (bog)
1. En dépression concave	Variation saisonnière de la pluviométrie et apports par l'amont	Marécage à bonne circulation des eaux (fen)
1. Lotique	Variation saisonnière de la pluviométrie ; circulation des eaux de surface et souterraines	Marécage inondé en permanence, à roseaux (fen, reed marsh)
1. Tidal	À marées	Marais saumâtre
1. Lentique	Inondations par les crues	Système ripicole (riparian wetland)

Les deux premières catégories concernent les zones humides à faibles apports, mis à part les précipitations. Les troisième et quatrième classes concernent les marais qui ont des apports croissants par inondation, comme les plaines et les lits majeurs des fleuves inondés lors les crues. La cinquième catégorie isole les marais sous l'influence de la marée et dont les eaux sont saumâtres.

Wharton et al. (1976) ont proposé sur la même démarche une classification des mangroves (fig. 3-6).

fig. 3-6

2.3.2. Classification actuelle dans l'inventaire national des Etats-Unis

Cette classification est basée sur une approche hiérarchisée, ressemblant aux méthodes utilisées en taxonomie : il y est défini des *systèmes*, des *sous-systèmes* et des *classes*.

- **Les systèmes :**

1. marins : ouverts sur l'océan, ils sont soumis aux fortes énergie des marées ;
2. estuariens : ils sont partiellement soumis aux marées, c'est la zone tidale en eau profonde dans lesquels les eaux océaniques sont diluées par les crues ;
3. fluviaux : zones humides et écosystèmes d'eau profonde contenant des chenaux. Deux exceptions sont à prendre en compte : la première concerne les zones humides à végétation arbustive ou à lichens ; la seconde est représenté par les milieux saumâtres d'origine marine de plus de 0,5 g/l de sel ;
4. lacustres : zones humides et écosystèmes d'eau profonde situés dans une dépression topographique ou endiguée, sans végétation arbustive, qui ont plus de 30 % de végétation de types mousse ou lichen, de moins de 8 hectares et dont la profondeur n'excède pas deux mètres aux plus basses eaux ;
5. palustres : toutes les zones humides à végétation importante (arbres, arbustes, mousses et lichens émergés) et toutes les zones tidales dont la salinité est à moins de 5 g/l.

- **Les sous-systèmes détaillent les catégories précédentes :**

1. subtidale : zone exposée en permanence à la marée ;
2. intertidale : zone submergée par le cycle de la marée ;
3. tidale : zone à faible gradient hydraulique, dans laquelle les mouvements de l'eau sont contrôlés par la marée (hauteur, vitesse) ;
4. pérenne inférieur : système à faible gradient hydrique, avec apports fluviaux continus, sans influence de la marée ;
5. pérenne supérieur : systèmes à fort gradient hydrique, avec apports fluviaux continus, sans influence de la marée ;
6. régime discontinu : système à apports fluviaux discontinus ;
7. limnique : tous types d'écosystème, comme les lacs ;
8. littoral : écosystème humide qui s'étend de la côte vers le continent jusqu'aux zones de profondeur d'au moins deux mètres (aux plus basses eaux) ou jusqu'à la limite d'extension des plantes émergentes, non pérennes.

- **Les "classes"**

Elles décrivent les écosystèmes en fonction du type de substrat (fond rocheux, non consolidé...) et du pourcentage de la végétation dominante.

Dans cette logique, la description des écosystèmes humides ou en eau profonde peut être poursuivie en subdivisant les classes avec un paramètre de permanence éventuelle de la végétation, ou par les caractéristiques de la végétation dominante.

Enfin, le régime hydrologique et surtout l'hydro-période, le pH, la salinité (tableau 3.2) et le type de sol sont introduits à ce niveau. Malgré l'importance de ces derniers paramètres dans la définition des écosystèmes humides, on les retrouve à un niveau assez bas de la hiérarchie, du fait de la difficulté à les mesurer et surtout à les spatialiser.

Tableau 3.2 - Classes de salinité

Domaine marin et estuarien	Domaine fluvial, lacustre et palustre	Salinité (‰)
Hyperhalin	Hypersalin	> 40
Euhalin	Eusalin	30-40
Mixohalin	Mixosalin	0,5-30
Polyhalin	Polysalin	18-30
Mésohalin	Mésosalin	5-18
Oligosalin	Oligosalin	0,5-5
Eau douce	Eau douce	< 0,5

La classification de Cowardin (1979) est reprise par l'IUCN (The World Conservation Union) en 1982 et dans la convention de Ramsar ¹¹ en 1990.

2.3.3. Une approche systémique

Un critère de fonctionnement obtenu par l'observation, la mesure et la modélisation.

Classification selon des critères d'hydrogéomorphie (Brinson et al., 1994)

Une première analyse, selon des critères dynamiques, a été proposée par Gosselink et Turner (1978), en considérant le niveau d'énergie engendré par les pluies et les crues : c'est une classification basée selon le gradient d'énergie hydrodynamique.

Cette approche méthodologique, complémentaire de l'approche "systématique" de Cowardin, se base sur des caractéristiques fonctionnelles des milieux : c'est une approche "systémique", qui a été reprise et développée par Brinson et al. (1994), selon des critères qui visent à intégrer les aspects dynamiques, comme la circulation de l'eau par exemple.

2.3.3.1. La démarche "descriptive / fonctionnelle"

Brinson propose une démarche en cinq étapes, nommée HGM (*hydrogeomorphic*), afin d'identifier les différentes fonctions d'une zone humide. Il suggère d'éviter les écueils d'une liste générique qui, selon lui, ne correspond jamais parfaitement au cas étudié.

Première étape : classification sur des propriétés hydrogéomorphologiques. Cette classification sommaire en classes fonctionnelles sera faite sur les critères d'hydrologie, de géomorphologie, et d'hydrodynamique (Brinson, 1993). Il s'agit de trouver un équilibre entre le "trop général" pour une information pertinente et le "trop spécifique" pour une application nationale ou régionale. Dans cet esprit, l'HGM est hiérarchique et modulaire, afin de s'adapter à tous types de régions.

¹¹ Ville iranienne où a été signée la première convention.

Les thématiques sont abordées par un découpage en classes :

- quatre grandes classes en géomorphologie : riverain, dépressionnaire, côtier et étendu ;
- trois classes d'alimentation en eau: précipitations, ruissellement et eau souterraines ;
- trois classes de circulation : verticale ; horizontale et unidirectionnelle ; horizontale et bidirectionnelle.

Seconde étape : recherche de liens fonctionnels entre les classes définies.

La démarche traditionnelle consiste à créer une liste de fonction génériques dans lesquelles va "s'adapter" l'écosystème étudié. De plus, il faut recommencer la démarche à chaque nouveau milieu naturel.

Une autre approche peut être menée sur des critères de fonctionnement. Par exemple, dans un climat où l'alimentation principale de la zone humide est réalisée à partir d'un débordement de berge dû à la crue, les effets liés à ce type de fonctionnement sont une sédimentation des éléments en suspension et un cycle biogéochimique rapide.

Deux exemples sont présentés ci-après :

Tableau 3.3 - Exemples de démarche hydrogéomorphologique (HGM)

Exemple 1	
Exemple d'alimentation	Précipitations
Echelle qualitative	Précipitations dominantes, mauvais drainage
Estimation quantitative	Les précipitations approchent ou sont supérieures à l'ETP => hydromorphie permanente
Exemple de fonction	Rabattement de la nappe rare : - favorable à l'accumulation de matière organique - favorable au paludisme
Effets :	La plante n'a pas accès aux sels minéraux. Basse production primaire.

Exemple 2	
Exemple d'alimentation :	Transfert de matériaux à partir de l'inondation de berge
Echelle qualitative :	Débordement de berge au moins une fois par an
Estimation quantitative :	Durée et fréquence de l'inondation en relation avec la hauteur d'eau et la hauteur de berge
Exemple de fonction	Débordements et hydro-période de forte amplitude favorisant un cycle biogéochimique rapide et une disponibilité des nutriments
Effets :	Forte production primaire et structure d'habitat complexe

La caractéristique explicite et ouverte de cette démarche a plusieurs avantages :

- a) les liens entre les propriétés du milieu et ses fonctionnalités obligent l'utilisateur à comprendre ces liens et à les décrire ;
- b) le risque d'omettre des fonctionnalités est diminué et oblige également à un retour au terrain.

Tout ceci évite d'avoir à établir à l'avance une liste prédéfinie et laisse également la place aux fonctions qui existent réellement et qui n'auraient pas été décrites.

Troisième étape : développement de profils fonctionnels

La relation entre les propriétés hydrogéomorphologiques et les fonctions étant établie, on peut effectuer une description plus générique d'une classe de fonctionnement de zone humide. Par exemple, une zone humide qui autorise la sédimentation et un cycle biogéochimique rapide est significative. Le profil fonctionnel sera :

- la forte production primaire,
- la complexité de la structure de son écosystème.

La combinaison d'informations provenant de plusieurs sites caractéristiques permet la définition de profils composites.

Quatrième étape : échelles de fonctions

Les profils étant déterminés, il s'agit de créer des échelles de fonctionnement afin de passer à un stade difficile mais nécessaire de la quantification. Par exemple, la mesure de la salinité est un indicateur du degré de relation avec l'océan. Le même paramètre (la salinité) devient un indicateur des apports en eaux souterraines dans un système endoreïque sans autre alimentation pluviale.

Cinquième étape : développement d'une méthode d'évaluation

- acquisition de données spatialisées sur la zone,
- phase de terrain (transects, mesures),
- recherche des "profils" (hydrodynamique, type de sol, type d'alimentation en eau...),
- évaluation d'indicateurs de fonctionnement climatique,
- description du niveau de la zone par rapport à une population de référence.

2.3.3.2. Evaluation du fonctionnement environnemental des zones humides

Dans ces approches, il faut citer les travaux de Maltby et al., (1994) qui proposent une approche de type systémique à vocation de gestion intégrée des zones humides (projet STEP, Science and Technology for Environmental Protection), sur des sites Européens (France, Irlande, Espagne et Royaume-Uni). Le concept d'unité hydrogéomorphologique (HGM) est repris pour définir des entités fonctionnelles (fig. 3-7). Deux indicateurs génériques sont utilisés pour isoler des entités fonctionnelles globales : la pente de la surface piézométrique dont dépend l'apparition de l'eau dans la zone humide et le niveau de la nappe d'eau libre. Ces éléments conditionnent différents types de sol, en fonction des régimes hydrologiques (crues, étiages), qui eux-mêmes induisent des types de végétation spécifiques des milieux. On définira ainsi des unités fonctionnelles plus localisées.

Cet ensemble d'informations, enrichies de données de terrain et d'éléments dépendant de l'échelle de travail et de la problématique, constitue une base de connaissances qui permettra

de préciser des relations fonctionnelles plus spécifiques entre les unités localisées (notamment par la modélisation).

Croisées avec les problématiques locales, ces informations doivent permettre de prévoir la réponse des écosystèmes aux transformations naturelles et anthropiques.

2.4. Classification des zones humides de Guyane

Toutes ces démarches et ces méthodes de classification montrent la nécessité de plus en plus flagrante de disposer d'informations de deux ordres :

- fonctionnements des systèmes,
- données spatialisées.

Notre première intention dans ce travail était de présenter une classification des zones humides de la Guyane (dont la liste est donnée en annexe 5) par télédétection, en caractérisant chaque milieu par ses propriétés d'occupation du sol (végétation, pédologie, géomorphologie...). En ce qui concerne la démarche que nous voulons présenter, il s'agit d'un travail d'intégration de données de terrain pluridisciplinaires et de données spatialisées sur tous les systèmes de zones humides. L'absence de certaines mesures au sol montre qu'il est prématuré (et même à fort risque d'échec) de tenter cette classification sur ces écosystèmes côtiers guyanais, de par leur complexité spatiale et la diversité des milieux rencontrés.

Par contre, il était important d'identifier les méthodes de travail, les bases de données nécessaires et l'apport des données satellite dans cette démarche. Nous proposons dans le chapitre suivant la première classification des différents types de zone humide, sur des critères obtenus à partir des informations satellitales et de la connaissance du fonctionnement hydrologique de ces écosystèmes.

3. Investigation spatialisée par télédétection

La grande diversité des compétences nécessaires à une approche intégrée des zones humides demande une mise en réseau des expertises et surtout des données qui en résultent. Dans tout projet, il apparaît essentiel de se préoccuper, dès le démarrage, des types d'information qui seront nécessaires à un objectif d'approche intégrée, ainsi que des méthodes les plus pertinentes susceptibles de répondre aux besoins de représentation des connaissances, de modélisation, de simulation et de présentation des résultats.

Depuis quelques années, la nécessité de capitaliser la connaissance scientifique, souvent mono-disciplinaire s'est cristallisée autour d'un objectif de collecte de données que l'informatique a pu présenter sous forme de *systèmes d'information* (Rouzet, 1995). Cloisonnés dans un premier temps dans un secteur d'activité, ceux-ci sont amenés maintenant à communiquer : chacun a besoin des informations produites ou gérées par les autres intervenants d'un programme de recherche.

Globalement, une mutation est déjà en cours, sous l'impulsion d'une demande sociale croissante : le système d'information nécessite une méthode (mise en place des systèmes, indicateurs pertinents...), des compétences thématiques et une maîtrise de nouvelles technologies (SIG-outils, télédétection, simulation, multimédia)

Il apparaît de plus en plus nettement qu'à chaque projet correspond un système d'information spécifique, répondant au mieux à certains problèmes, comme par exemple le choix des échelles de temps et d'espace qu'il convient de fixer pour l'analyse et la représentation d'une problématique.

fig. 3-7

On s'achemine maintenant vers des concepts comme par exemple les Systèmes d'Information à Référence Spatiale (SIRS), qui doivent être capables de gérer et de représenter l'ensemble des informations sur un espace géographique bien identifié : l'approche est résolument globale, dans cet espace qui est la "référence spatiale", autour d'un système d'information automatisé, de structure dynamique, fondé sur une "approche systémique territoriale".

La place des données de télédétection dans un tel système d'information est fondamentale : en effet, c'est actuellement le seul moyen d'obtenir une information spatialisée, modulable selon les besoins du scientifique (choix des capteurs, des résolutions, des répétitivités) et qui renvoie à la réalité physique du terrain.

Dans notre logique, l'utilisation des données satellitaires sera abordée sous un aspect principalement "géophysique", ce qui exclut, en toute rigueur, les méthodes de classification dirigées à partir de parcelles test, "forçant" (au sens statistique) le résultat. A l'inverse, l'information recherchée dans ce travail sera une spatialisation des caractères "hydro-thématiques" par voie non dirigée.

3.1. Caractéristiques cartographiques et biophysiques par données satellitaires

3.1.1. Les données satellitaires utilisées

Une série de données optiques et radar (projet pilote ESA / pp F12 UPMC / BRGM / ORSTOM) ont été acquises sur le littoral de la Guyane (tableau 3.4) :

- données SPOT : panchromatique du 28 oct 1993 ;
- données Landsat : 18 juillet 1988 ;
- données radar :
 - 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.
 - JERS1 en bande "L" en mode standard, orbites descendantes.

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.

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

Tableau 3.4 - Dates et heures des marées lors des acquisitions satellitales

Satellite	Date	Heure TU de passage	Heure locale de passage	Hauteur (m) marée au passage	Heure basse mer	Hauteur basse mer	Heure pleine mer	Hauteur pleine mer
Landsat MSS	30/10/76	13:30	10:30	2,47	17:05	1,40	23:19	2,58
SPOT XS	20/10/86	14:00	11:00	1,15	11:57	1,04	18:09	3,00
LANDSAT TM	18/07/88		10:30	1,89	13:39	1,04	19:54	2,70
ERS1 RTM	09/04/92	02:14	23:14	2,30	15:41	1,15	22:02	2,45
ERS1 PRI	17/04/92	13:55	10:55	0,64	10:54	0,60	17:04	3,10
ERS1 PRI	03/05/92	13:55	10:55	0,67	11:13	0,60	17:26	3,00
ERS1 PRI	21/05/92	13:55	10:55	1,87	14:01	1,10	20:17	2,54
ERS1 PRI	07/06/92	13:55	10:55	2,64	16:07	1,08	22:26	2,70
ERS1 PRI	29/11/92	13:55	10:55	1,93	13:59	1,30	20:11	2,70
ERS1 PRI	18/12/92	13:55	10:55	2,59	05:38	1,25	11:58	2,70
JERS1	13/02/93	14:00	11:00	2,61	16:14	1,17	22:29	2,46
SPOT P	28/10/93	14:00	11:00	1,30	09:29	1,10	15:37	2,85
ERS1 PRI	14/11/93	13:55	10:55	0,77	10:40	0,80	16:53	3,35

3.1.2. Réalités 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. Chaque relevé a été localisé par GPS¹² avec une précision de l'ordre de 20 mètres. Des prélèvements d'eau ont été réalisés afin de déterminer leur composition chimique.

Les premières missions se sont déroulées sur les sites de Diane (fig. 3-8) et de Diamant (fig. 3-9) qui ont été sélectionnés pour leur accessibilité et pour leur spécificité (les 12/10/94 et 14/04/1995) :

- le site Diane est situé sur la plaine côtière ancienne et comprend un système de drains et de marais qui alimente la Karouabo, quelques centaines de mètres en aval du pont sur la RN1.
- le site Diamant est situé sur la plaine côtière récente. Sa situation facilite l'accès aux marais appartenant au système de zones humides littorales. Les aménagements des aires de lancement et de la route de l'espace ont modifié les modes d'alimentation naturels venant de l'amont, mais ce site, proche des marais de front de mer est probablement en relation hydraulique avec le système aval de la Karouabo (en aval de la station limnimétrique, annexe 8).

A ce propos, nous devons insister sur la difficulté d'atteindre à pied certains sites aval. Même en saison sèche, une avancée vers la zone littorale est vite stoppée par les rideaux de végétation arbustive denses, ou par les marais à *Montrichardia arborescens*, avec plus de 40 cm d'eau en octobre et 80 cm en avril.

Par ailleurs, les zones de Diane et Diamant présentent des contrastes importants de réponse sur les données radar de ERS1 (Czerwinski et al., 1994, p. 63) et il est important pour l'analyse thématique d'interpréter ces phénomènes.

¹² Global Positioning System

3-8

3-9

• Le site de Diane

Ce site est accessible à partir du point n° 6 (fig. 3-8), montrant en ce point une petite crique de 4-6 mètres de large, en bordure de forêt. Les écoulements y sont très faibles, orientés vers le sud. L'eau y est très claire et quelques poissons y nichent. La crique n'est pas observable avec les données satellite dont nous disposons.

La partie D est une savane hydromorphe où l'on trouvera 5 cm d'eau en avril 95, alors qu'elle était sèche en octobre. Du point D au point E, on effectue une petite montée topographique dans une savane à *Byrsonima verbascifolia*, avant de redescendre vers un drain marqué par une végétation arbustive. Le sol y est très saturé. Ce drain est mis en évidence par les données Spot panchromatiques et Landsat TM.

Du drain au point F, on effectue une légère montée pour atteindre en F une zone de hautes herbes (2 m), sur terrain sec (en octobre et avril). Dans cette zone, les données radar de JERS1 et de ERS1 indiquent des zones à contrastes très différents, mais de structures proches et liées à la direction du drain.

Des point F à A, on remarquera de nombreuses termitières qui semblent récentes en avril 1995, et qui étaient absentes en octobre 1994. Le passage au point A s'effectue dans l'axe du drain, où une résurgence montre un écoulement d'eau marqué, de l'ordre de 1 litre par seconde.

Au point 7, la crique située en bordure de forêt a un écoulement net, vers le sud. Ce système semble donc couler vers la Karouabo, pour la rejoindre 200 m. en aval du pont.

Les points C et B devront être prospectés pour vérifier la présence de crique ou de drain sous forêt galerie.

Le point G est un marais à Cypéracées (*Eleocharis interstincta*), ayant une profondeur d'eau de 60 cm aux deux dates de mission. Il ne présente aucun écoulement décelable.

• Le site Diamant

L'accès par le point A (fig. 3-9), situé sur un léger relief allongé, permet d'arriver aux points de prélèvement 3 et 9, des zones de marais à Cypéracées (*Eleocharis interstincta*).

Du point 9 à D (le plus proche), vers l'aval, on observe de plus en plus de *Montrichardia arborescens* et le marais s'approfondit : 40 cm d'eau en octobre, 80 à 100 cm en avril. Les autres zones notées D sont également des marais à *Montrichardia*.

Autour de la zone 9, et en 10, on distingue une morphologie de thalweg (B et C), d'une profondeur d'eau de 30 à 40 cm au centre et essentiellement recouverte de Cypéracées. L'eau y est très limpide et, à la faveur de quelques zones d'eau libre, des alevins et des poissons de 10 cm ont été observés.

Ces thalwegs, d'ordres 1 et 2 dans une classification de type Horton utilisée pour les réseaux de drainage, sont directement en relation avec les marais aval proches, notés D, pour lesquels on n'observe pas de nouvelles structures de drainage. Dans toutes les zones parcourues, il n'a pas été possible de déceler la moindre circulation d'eau.

Les prospections n'ont pas pu se dérouler plus en aval et, pour l'instant, il est difficile d'imaginer le type de circulation (si elle existe) et de relation entre les eaux des marais notés D et ceux situés 500 m plus loin vers le littoral. Ces questions sont d'autant plus complexes que la morphologie de ces zones est très structurée par les alignements de forêts secondaires, parallèles au rivage (cheniers), qui s'étendent sur plusieurs kilomètres. Ainsi, il serait intéressant de traverser les structures perpendiculairement (en layonnant) et de faire une observation topographique et pédologique.

- **Singularités :**

- Sur ce site, et à 50 m au nord du point 3, il a été observé, par 50 cm d'eau, une île flottante de végétation, avec les quelques centimètres de terre accrochés aux racines. Cet îlot d'environ 10 m² montre qu'il existe des processus mécaniques ou chimiques originaux liés aux relations entre les sols et la présence d'eau quasi-permanente dans l'année.
- Comme au site exondé A, il est facile d'identifier entre B et C, des buttes de 1 m de diamètre environ et de 30 cm de haut, en ordonnancement géométrique et aligné. Ces buttes sont souvent localisées à un niveau topographique intermédiaire, entre les parties exondées et le marais où l'eau est présente, et semblent s'organiser selon une tranche hypsométrique assez étroite. Ce phénomène largement observable dans toute la bande côtière des Guyanes, a été attribué à des pratiques culturelles "en champs drainés" d'origine amériindienne, par S. Rostain (1994). D'autres auteurs, dont Verger (1994), décrivent des structures géométriques semblables, observées dans différents continents, dans les terrains à vertisols, comme des mécanismes naturels dus à l'alternance de leur hydratation et nommés "gilgais" (terme australien).

- **Survol hélicoptère**

Un survol en hélicoptère lors de chaque mission sur le terrain a permis de réaliser de nombreux documents photo et vidéo. A l'analyse de ceux-ci, on constate une grande diversité dans l'organisation des milieux aquatiques. La connaissance de la distribution végétale et d'éventuelles relations avec une caractéristique hydrologique est très importante pour la description fonctionnelle des écosystèmes. Certaines configurations de la trajectoire de vol nous ont permis de constater, par reflet spéculaire du soleil dans l'eau, que la végétation aquatique dense empêchait la détection de l'eau de ces marais par les moyens cartographiques disponibles : photos aériennes verticales, données de télédétection optique et radar.

L'extension des marais et les volumes d'eau concernés sont beaucoup plus importants que nous pouvions l'estimer au début des campagnes de terrain. La cartographie de cette étendue d'eau sous végétation pose un problème méthodologique qui pourrait être résolu par la cartographie de la végétation associée (si elle est univoque) et des mesures ponctuelles de profondeur.

Trois autres missions pluridisciplinaires se sont déroulées en juillet 1995 à l'aide d'une chenillette amphibie pour explorer les marais en contact avec le cordon de plage. Toutes les interprétations des données satellitales qui vont suivre proviennent de ces prospections.

3.1.3. Cartographie thématique avec les satellites "optiques"

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

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 le petit bassin-versant côtier de la Karouabo (100 km²), pour laquelle nous possédons une bonne réalité de terrain.

La classification est non dirigée, à partir d'une ACP des 6 bandes de Landsat TM et d'une conversion RVB-ITS géolocalisée (carte 1, du 18 juillet 1988). Ce choix a été guidé par le fait que nous avons recherché à faire apparaître une certaine homogénéité spatiale des classes, afin de préserver l'information radiométrique originale. Il en résulte des confusions thématiques.

Les principales classes qui ont une réalité thématique sont les suivantes :

- 1 : marais avec peu végétation de surface,
- 2 : forêt (tout confondu : primaire et sur cordon),
- 3 : marais avec végétation de surface importante,
- 4, 6, 9 : savanes (trois classes radiométriques différentes),
- 5 : zones de drains en savane,
- 7 : eau libre (fleuve Kourou),
- 8 : mangrove adulte ,
- 10 : terrains nus ou aménagés, bancs de vase,
- 11 : mangrove jeune.

Le retour sur le terrain avec les classements a montré quelques confusions entre la forêt primaire des zones de forêt inondable et celles 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 (cf. remarque § "terrain"). La biomasse de la végétation de marais est si importante que la présence d'eau n'est pas détectable.

Nous considérerons que la couche d'information biophysique est pertinente pour une thématique simple, ne comportant pas plus d'une dizaine de classes et pouvant ainsi permettre une première approche de classification des milieux.

L'utilisation de certaines spécificités des satellites optiques (grande résolution spatiale, données de température) apporte une couche d'informations souvent utile au thématicien, mais peu exploitée. Par exemple, la cartographie des différentes températures relatives (carte 2), de la zone de la Karouabo permet une reconnaissance thermique des zones humides. En effet, nous avons vu comment les comptes numériques du canal thermique (6) de Landsat pouvaient être transformés en températures relatives (cf. chap.2 § 1.5.2). On trouve dans ces données une discrimination thématique entre la zone de mangrove (plus froide) et la végétation de cordon sableux, qui rend compte en quelque sorte de la densité de la végétation, tant en milieu de savane qu'en milieu purement aquatique. Dans la basse plaine côtière, la partie inondée en permanence et qui n'est pas détectable avec les autres données s'individualise dans le compte numérique correspondant à la température relative calculée de 29,0 °C.

3.1.4. Compléments thématiques avec les données des radars imageurs à ROS ¹³

Les données radar actuelles présentent d'une part l'avantage d'une acquisition tout temps, complétant les lacunes d'information optique, et surtout, d'autre part, d'offrir la possibilité dans les milieux étudiés une information originale et de nature géophysique (Rudant et al., 1995) par les propriétés holographiques de l'image radar : mise en évidence du relief de faible amplitude, réseaux de circulation, structures morphologiques expliquant le réseau de drainage.

- **Radar ERS1 (Bande C, polarisation VV, incidence 23°)**

Les données radar brutes permettent de faire une discrimination des zones d'eau libre de son contexte environnant. Le filtrage spécifique comme GGMAP (maximum a posteriori, Lopès et al., 1993 ; Nezry et al., 1993), en réduisant le speckle, présente des avantages pour les classifications non dirigées et pour la mise en évidence de structures du paysage (Czerwinski, Lointier et al., 1994 ; fig. 3-10, zone de la Karouabo).

¹³ ROS : radar à ouverture synthétique

carte 1

dos carte 1

carte 2

dos carte 2

3-10

3-10 dos

3-11

dos 3-11

L'information thématique, assez pauvre, s'enrichit par fusion multitemporelle de plusieurs dates (Czerwinski, Lointier et al., 1994) ou par classification multitemporelle par une ACP (fig. 3-11, zone de la Karouabo) qui isole parfaitement les plans d'eau mais qui met également en avant les différences temporelles : bancs de vase plus ou moins couverts par la marée, variations du signal dans les savanes et en forêt inondée. Ces possibilités de cartographie ont été explorées pour les zones humides dans plusieurs travaux de l'auteur de ce mémoire (Lointier, 1993 a, b, c ; 1994 a ; Rudant et al., 1993).

- **Radar JERS1 (Bande L polarisation HH, incidence 35°)**

Une cartographie du réseau de drainage en zones humides a été réalisée à partir des informations des cartes IGN au 1/25 000e, des données SPOT et du Landsat TM pour l'identification des zones de bas-fonds susceptibles de recevoir temporairement des écoulements (en bleu sur la carte 3). Une cartographie de buttes anthropiques (champs drainés) ou "gilgais" (Verger, 1994), dont l'origine ne sera pas discutée ici, a été réalisée par Rostain (1994) et l'IGN, et reportée sur le document pour leur intérêt de positionnement hypsométrique noté sur le terrain (en jaune sur la carte 3).

L'ensemble de ces informations ont été superposées aux données radar en bande L de JERS1, sur la zone de la Karouabo. Les données brutes de ce radar imageur sont particulièrement intéressantes pour les structures que l'on y découvre (Rudant et al., 1996), alors que, du point de vue thématique proprement dit, leur pertinence est discutable (pas de distinction forêt/savane, discrimination des plans d'eau difficile).

La superposition met en évidence dans la basse plaine côtière, la structure des réseaux de drainage naturels, de forme générale longiligne (en gris clair), séparés par des espaces plus sombres. Pour la haute plaine côtière, on constate la même correspondance avec des espaces séparant le réseau de drainage de forme plus dendritique, à l'échelle de la centaine des mètres. Par ailleurs, on peut constater que :

- la plupart des zones d'inondation notoires et reconnues sur le terrain (Passoura, palmiers bâche de la Karouabo) sont de forts réflecteurs radar ;
- le réseau décrit par les moyens traditionnels est complété par l'information radar. L'identification des zones de bas-fonds est beaucoup plus complète vers l'amont des systèmes et dans le cas de la haute plaine côtière, on peut lever certains doutes sur le sens des écoulements, ce qui n'avait pas été possible avec les données de base ;
- la position des buttes est en cohérence avec les bas-fonds identifiés par JERS1. Cette vérification est importante du fait de la position de ces objets, fréquemment disposés autour des bas-fonds.

- **Interprétation**

En se reportant aux travaux des pédologues, Grimaldi (1990) sur la zone de la Karouabo et Boulet et al. (1982) sur la savane Mattitti, non loin de Kourou, on s'aperçoit que ce type de donnée radar permet d'identifier une partie du complexe pédologique, notamment dans le système des "barres pré littorales". Le réseau de drainage (qui n'est pas forcément fonctionnel) est le système de bas-fonds qui sépare les couvertures pédologiques allant du sol ferrallitique (stade I) au podzol (stade IV) identifié par Boulet. Une étude radiométrique fine sur les données brutes serait utile pour tester la discrimination de ces deux types de sols, bien que la nature de la végétation couvrante risque de perturber le signal. De plus, les réalités de terrain cartographiées par les pédologues sont peu nombreuses et de faible superficie.

carte 3

dos carte 3

Sous l'aspect de la physique du signal, l'humidité plus forte des bas-fonds explique leur plus forte rétrodiffusion que les sols voisins. La rétrodiffusion élevée des zones à végétation arbustive (Passoura, Karouabo) s'expliquerait par la double influence des sols saturés en eau et des réflexions par "effet de coin" sur les troncs. Par contre, au stade de nos investigations, il est difficile d'attribuer ces particularités du signal rétrodiffusé au type de polarisation, à la fréquence utilisée ou à l'angle d'incidence. Toujours est-il que la bande L, plus basse en fréquence que la bande C de ERS1, a une profondeur de pénétration dans les sols plus importante. C'est ainsi que l'on peut arriver au concept de caractérisation des volumes hydro-pédologiques par les données radar de ce type, en se plaçant dans une perspective de mesure "géophysique spatialisée".

Même à ce stade assez simple de détection des bas-fonds et de leur environnement pédologique en milieu tropical, il est intéressant de connaître le développement dans l'espace de ces objets. Leur cartographie permet d'abord leur localisation par rapport au réseau hydrologique fonctionnel et de comprendre le potentiel de circulation et de stockage en cas de crues, sur de vastes étendues, souvent difficiles d'accès. De plus, une investigation dans ce domaine semble fondamentale pour la cartographie des couvertures pédologiques en domaine tropical humide en général.

3.2. Approche des phénomènes dynamiques

3.2.1. 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 à 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 de 1992 (Lointier, 1995) 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 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 :

- 1 : 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) ;
- 2 : 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) ;
- 3 : échange moyen : banc de vase et mangrove jeune plus propice aux ruptures de cordon (signal absent sur bancs de vase) ;
- 4 : échange fort : marais ouvert à l'océan (signal rétrodiffusé fort et étalé au contact avec l'océan) ;

Les résultats globaux obtenus sont les suivants présentés par le tableau 3.5.

3-12

Tableau 3.5 - Classement des échanges entre l'océan et les zones humides sur le littoral de la Guyane

Classe	Longueur (km)	Pourcentage
1	56	24 %
2	90	38,6 %
3	75	32 %
4	13	5,4 %

On constate globalement (fig. 3-12) qu'un quart du linéaire analysé serait sans échanges avec l'océan et que les marais complètement ouverts à la mer sont peu nombreux (5,4 %). Ces résultats permettent de proposer un premier indicateur caractérisant le degré d'échange des zones humides littorales avec l'océan.

3.2.2. Événements hydrologiques

Une série de données ERS1 obtenues à pas de temps assez court (3 semaines d'intervalle), en 1992, a été comparée aux données hydrologiques des bassins-versants de la Karouabo (Lointier et Rudant, 1994 b). Ce travail a permis d'obtenir une cartographie locale contenant une information de type dynamique et spatialisée (fig. 3-13). 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 sur le fonctionnement des systèmes humides.

3.3. Schémas de fonctionnement des zones humides

Sur la base de l'ensemble des informations que nous venons de traiter, nous proposons trois cas génériques de fonctionnement des zones humides (Lointier, 1995). Dans les figures qui suivent, nous avons utilisé un symbolisme pour schématiser une réalité observée sur le terrain et les principaux ensembles qui sont impliqués dans le fonctionnement de la zone humide : réseaux de chenaux, marais d'eau douce et d'eau saumâtre, barrages morphologiques naturels (cheniers), zones de forêt galerie inondables. Les flèches indiquent les relations hydrauliques potentielles entre les différentes unités identifiées sur le terrain. La position des savanes et des marais par rapport aux plans d'eau et aux chenaux (criques) est également symbolisée tout comme leur mode de vidange : en contact direct avec la rivière, par un chenal ou non). Nous avons fait figurer les limnigrammes hebdomadaires types enregistrés aux différents points indiqués et qui traduisent l'effet des "entrées : pluie (flèche) et périodes de mortes ou vives eaux océaniques.

3-13

3.3.1. Zone humide ouverte à la mer

Fig. 3-14 : le cas d'étude qui a inspiré ce schéma est celui du marais de Mana ou savane Sarcelle (annexe 6). La prédominance marine est forte (flux et reflux) et s'exprime sur un réseau de drainage bien marqué, réutilisé par les pluies importantes pour écouler les excès d'eau vers la mer. Cette observation nous a conduit à qualifier ce système de "pseudo-bassin-versant". Celui-ci est en relation avec les plans d'eau saumâtres voisins qui subissent les effets dynamiques (variations de hauteur) ou mécaniques (courants) de la marée. Un marais d'eau douce intérieur est indépendant du système.

3.3.2. Zone humide avec échanges océaniques très réduits

Fig 3-15 : le cas d'étude qui a inspiré ce schéma est celui de la Karouabo (annexe 8). 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 de marée traversant le cordon littoral en un seul endroit. Ces chenaux sont de petits estuaires sous influence dynamique et mécanique de la marée, qui favorisent la sortie des eaux en mer.

3.3.3. Zone humide en relation avec un estuaire

Fig. 3-16 : le cas d'étude qui a inspiré ce schéma est celui de la Passoura (annexe 8). Les eaux douces continentales provenant de la partie amont du bassin sous forêt alimentent un système de savanes inondées en quasi-permanence. Le sous-bassin aval ainsi constitué subit uniquement l'effet dynamique de la marée (variations de hauteur).

4. Modélisation : simulation des variations du volume d'eau et de la profondeur d'un marais côtier à drain unique

4.1. Objectif et spécifications

Il était nécessaire de développer un modèle simple de fonctionnement de marais élémentaire (de surface comprise entre 1 et 15 km²), à drain unique, appartenant au système de la basse plaine côtière, pour quantifier les variations de hauteur du plan d'eau et de volume, dans différentes configurations d'alimentation. Il fallait aussi réaliser une modélisation qui respecte les ordres de grandeur connus ponctuellement par les investigations de terrain, tout en pouvant faire varier certains paramètres géométriques comme la distance à la mer et la cote IGN du fond du marais.

Afin de disposer de données réelles pour la conception, nous avons choisi le cas du marais aval de la Karouabo qui correspond au cas générique du marais à faibles relations avec l'océan (§3.3.2, fig. 3-15). Les débits d'entrée dans le marais sont connus sur plus de quatre années, au pas de temps journalier, et les hauteurs marées ont été calculées au pas de temps bi-horaire avec un logiciel de prédiction du SHOM (Service HydrOgraphique de la Marine), paramétré pour la zone de Kourou. Les entrées et les sorties océaniques ont été calculées à partir d'une formule de l'hydraulique (Chézy).

3-15

3-16

La possibilité de faire varier les paramètres géométriques (distance à la mer et cote IGN) ainsi que les paramètres décrivant les caractéristiques du drain de sortie comme l'aire de la section transversale, permet de représenter le cas du marais en contact direct avec l'océan (§3.3.1 ; fig. 3-14). Une adaptation du modèle de base, auquel il a été ajouté une fonction de vidange retardée par un stockage important, nous permet de simuler un cas de figure se rapprochant du marais en relation avec un estuaire (§3.3.3 ; fig. 3-16).

La validation au sens strict du modèle n'a pu être réalisée faute de mesures hydrologiques dans les zones humides aval (qui n'ont pu être atteintes qu'une seule fois, lors d'une mission exceptionnelle en juillet 1995).

Le modèle a été développé avec le logiciel Vensim (Ventana System, Inc.) qui présente des possibilités de simulation très souples : l'interface utilisateur permet de poser les concepts sous forme graphique et de les décrire sous la forme d'équations. On construit des variables qui seront reliées par des flux et explicitées par différentes informations exogènes. La représentation s'effectue en fonction du temps et procède par intégrations successives.

4.2. Description

Fig 3-17, le schéma général propose un calcul du volume d'eau contenu dans le marais en fonction :

- des apports positifs ou négatifs de l'océan par formule hydraulique ;
- des débits d'entrée connus par mesure hydrologique ;
- des apports par la pluie ;
- des pertes par évaporation.

Les pertes par infiltration ont été négligées à cause d'un substratum qui n'est pas bien identifié dans les parties aval : en effet, d'après les missions de terrain, il est apparu que les marais aval à *Eleocharis* comportent une tranche d'eau de l'ordre de 50 cm où se développe une zone racinaire dont la densité permet le déplacement à pied, puis en dessous, sur une profondeur de plus de deux mètres, une zone de mélange progressif d'eau et de vase (fig. 3-18).

Tous les calculs sont réalisés au pas de temps horaire afin de prendre en compte les effets océaniques, mais la validité du résultat n'est que journalière, du fait des données hydrologiques introduites au pas de temps journalier.

Les flux de pluie et d'évapotranspiration sont pondérés par la surface du plan d'eau.

Un diagramme causal ciblé sur le résultat principal (volume de marais) explicite l'organisation des variables explicatives (fig. 3-19). Un diagramme des usages centré sur l'utilisation de la variable principale (fig. 3-19) indique les boucles créées, comme pour l'évaporation et les flux océaniques, ou bien les relations avec les autres variables entrant dans le calcul.

3-17

3-18

• Données de base

Trois séries temporelles ont été utilisées à partir des mesures faites pendant 3 ans sur le bassin-versant de la Karouabo, couvrant ainsi différentes situations hydrologiques :

- du 15 mars au 13 mai 1991 : saison du "petit été de mars", avec deux crues individualisées et le début de la saison des pluies ;
- du 1^{er} janvier au 9 avril 1992 : fin de seconde saison des pluies (remontée vers le nord de la zone intertropicale de convergence) et du "petit été de mars" : trois crues bien individualisées ;
- du 15 avril au 13 juillet 1993 : saison des pluies ; 8 crues.

Nous avons retenu les données d'entrée suivantes :

- apports du bassin-versant : données de débits moyens journaliers mesurés à la station limnigraphique de la Karouabo ;
- apports de l'océan et vidange vers la mer par un drain : la cote océanique par rapport au "zéro marin" et la cote du marais (recalée par rapport au "zéro marin") permettent de calculer la pente de la ligne d'eau (S) et d'estimer les volumes entrants et sortants par un calcul hydraulique utilisant la formule de Chézy qui relie les paramètres hydrauliques entre eux :

$$\frac{v}{R_h^{2/3}} = \frac{Q}{A \cdot R_h^{2/3}} = \frac{S^{1/2}}{n} = K$$

avec :

v	vitesse moyenne de l'eau ;	A	aire de la section transversale du drain ;
S	pente de la ligne d'eau ;	n	coefficient de rugosité de Manning ;
Rh	rayon hydraulique ;	K	constante

- pluviométrie sur la surface du plan d'eau (valeurs relevées au pluviomètre de Kourou CSG¹⁴) ;
- évaporation à la surface du plan d'eau : données climatologiques de la station Kourou CSG, permettant le calcul de l'évaporation d'une nappe d'eau libre ou le calcul de l'évapotranspiration potentielle par la formule de Penman. Le choix entre ces deux options pourrait être fait selon le type de plan d'eau, soit en nappe d'eau libre, soit recouvert de végétation importante. L'incidence de ce paramètre en terme de flux, est si peu importante dans les calculs (1 %), que nous avons retenu une valeur moyenne de l'évaporation journalière mesurée à la station climatologique.

Remarques

- Coefficient de Manning pour le calcul des échanges océaniques : celui-ci a été estimé à partir des jaugeages effectués à la station de la Karouabo où la pente de la ligne d'eau et les conditions hydrauliques sont bien connues. Néanmoins, ce paramètre a une grande sensibilité et varie entre 0,019 (forts débits) et 0,6 (très faibles débits). Il a été choisi de le faire varier en fonction du flux océanique calculé au temps t-1 heure.
- Estimation des courbes volume / hauteur et hauteur / surface : ces mesures de terrain n'étant pas disponibles, il a été choisi des valeurs réelles de ces relations dans la littérature, concernant des mares tropicales (Puech, 1995). Les relations permettent de construire des tables de correspondance (*look-up table*), afin de passer au mieux par les points expérimentaux et de conserver un certain réalisme au modèle.

¹⁴ CSG : Centre Spatial Guyanais

3-19 & 3-20

4.3. Résultats

Pendant la simulation la cohérence des paramètres a été analysée. Le seul élément qui prêterait à discussion est la courbe de traduction du volume du marais en hauteur, qui demeure l'élément le plus sensible du modèle (fig. 3-20). Par contre, la courbe des hauteurs en surface est de faible sensibilité puisque les pertes par évapotranspiration et l'apport des pluies calculées par rapport à la surface d'eau libre représentent des pourcentages mineurs par rapport aux apports océaniques et du bassin-versant.

Les constantes qui peuvent être adaptées à chaque situation géographique sont :

- la distance à la mer,
- la cote IGN du fond du marais,
- l'aire de la section transversale du chenal à marée.

On peut ainsi positionner le marais dans un espace géographique situé entre la côte et la limite entre la basse et la haute plaine côtière. Le paramètre "aire de la section transversale" du chenal permet d'ouvrir ou de fermer progressivement le drain en fonction des conditions d'envasement.

Simulation n°1 (fig. 3-21 et 3-22) : elle correspond à un marais récepteur des crues du bassin-versant, avec sorties océaniques seules (exemple marais aval de la Karouabo).

Paramètres géométriques :

- distance à la mer (en linéaire) du drain : 8 km,
- cote IGN 1 : 0,5 m,
- aire de la section transversale : 23 m².

Les paramètres ont été choisis pour exclure les entrées océaniques avec une cote de 50 cm au dessus du niveau moyen de la mer (cote IGN). On observe une vidange modulée par les crues et une oscillation du plan d'eau de l'ordre de 40 cm. Les volumes mis en jeu sont de l'ordre de 1Mm³.

Simulation n°2 (fig. 3-23 et 24) : elle correspond à un marais proche de l'océan (par exemple le marais de Mana tel qu'il a été observé en 1985).

Paramètres géométriques :

- distance à la mer (en linéaire) du drain : 1 km,
- cote IGN : 0,0 m,
- aire de la section transversale : 23 m².

Les oscillations océaniques provoquent des entrées dans le marais modulées par les crues. Les volumes de jusant mis en jeu sont de l'ordre des volumes mesurés lors de l'étude de la savane Sarcelle (50 000 m³).

Simulation n°3 (fig. 3-25 et 26) : elle correspond à un marais éloigné de l'océan ou en contact avec la partie d'un estuaire proche de la mer (marais de la Passoura), avec effet de stockage. Le modèle a été modifié en paramétrant le coefficient A (aire de la section) dans la formule de Chézy, pour faire apparaître une vidange faible au-dessous d'un volume de marais fixé, et une forte vidange au-dessus. Les valeurs de ce volume ont été choisies parmi les ordres de grandeurs connus par les bilans hydrologiques réalisés sur le bassin de la Passoura.

Paramètres géométriques :

- distance à la mer (en linéaire) du drain : 12 km,
- cote IGN : 0,5 m,
- aire de la section transversale 6 m² et 25m², selon volume.

Dans cet exemple, la vidange est effective à partir de 25 Mm³ et entretenue jusqu'à 8 Mm³, comme si un nouveau drain s'était ouvert et restait fonctionnel jusqu'à la valeur inférieure. Pendant cette ouverture vers l'océan, les effets océaniques sont de nouveau pris en compte.

Les volumes mis en jeu sont plus importants que dans les deux cas précédents, et déterminés par le seuil maximum sur le volume (ici 25 Mm³)

La cote du plan d'eau calculée est relativement constante du fait des effets de stockage. Ceci correspond à une réalité observable sur le marais aval de la Passoura, bien que la hauteur soit modulée à l'échelle horaire par l'effet dynamique des marées (sans déplacement de masses d'eau) ce qui n'a pas été pris en compte ici (variations de ± 20 cm).

Synthèse

Bien entendu, la modélisation pratiquée ne peut être validée que par comparaison aux enregistrements réels dans un marais littoral.

Ces opérations sont pour l'instant encore très coûteuses et ont été rarement pratiquées dans la zone des marais côtiers. Ceci montre la nécessité de disposer de "capsules" de mesures largables par hélicoptère, très autonomes pour minimiser les coûts d'intervention et de collecte de données. Nous rappelons que c'est à cette occasion d'étude en milieu d'accès difficile que le premier cahier des charges des stations CHLOE / ORSTOM a été défini.

Nous avons pu vérifier le respect des ordres de grandeurs connus à partir de différentes mesures pratiquées sur le littoral, réalisant ainsi un contrôle de type qualitatif a posteriori. Les schémas fonctionnels bâtis lors des études antérieures ont été respectés pour réaliser ce type de simulateur qui renvoie des résultats cohérents avec les observations de terrain.

Par la suite, et s'il est validé sur quelques sites connus, il est envisageable de disposer d'un modèle générique pour chaque sous-ensemble marécageux. En s'appuyant sur les informations spatialisées (carte thématique hydrologique), il sera possible de l'adapter à chaque cas spécifique, appartenant à un même ensemble bassin-versant / zone humide. L'opération répétée sur chaque ensemble bassin-versant / zone humide du littoral guyanais peut être alors un premier modèle global sur la côte de la Guyane.

3-21

3-22

dos 3-22

3-23

dos 3-23

3-24

dos 3-24

3-25

dos 3-25

3-26

dos 3-26

5. Capitalisation de la connaissance spatialisée en hydrologie des zones humides

5.1. Présentation

Dans l'objectif de fournir des éléments nécessaires à la démarche proposée, il s'agit de trouver une représentation de l'information thématique. Cette représentation doit pouvoir s'intégrer facilement dans un système d'information, concept plus large que celui généralement couvert par les systèmes d'informations géographiques. Ici, la référence spatiale est indispensable pour intégrer la dynamique des phénomènes de circulation et d'écoulement, la connaissance du terrain ainsi que les informations radiométriques et spectrales issues des satellites.

Ce document informatif synthétique doit être produit dans l'idée d'enrichir les critères de classification des zones humides, mais aussi de s'adapter à une démarche d'identification de la vulnérabilité intrinsèque des milieux (fig. 3-27), puis de sensibilité, par rapprochement avec les autres informations thématiques. Il doit pouvoir supporter la spatialisation des indicateurs du milieu qui auront été retenus, et être utilisable dans une représentation des indices (spatialisée ou non).

Ce document doit satisfaire également aux besoins de l'objectif d'aide à la décision : être une cartographie utilisable à tout moment dans l'analyse des cas réels et simulés, dans la quantification et la comparaison des solutions proposées. Enfin, il doit répondre aux besoins de communication entre acteurs. Nous proposons dans ce travail un document hydrologique spatialisé, pensé dans cet esprit, mais dont le développement complet et l'exploitation ne peuvent se réaliser que dans un environnement industriel permettant l'intégration de tous ces concepts à un niveau pluridisciplinaire et dans un environnement informatique de pointe.

3-27

dos 3-27

5.2. Réalisation d'un document hydro-thématique : esquisse hydrologique fonctionnelle spatialisée

Un document de synthèse sur le bassin-versant de la Karouabo et sa zone humide associée a été réalisé sur la base des observations de terrain (hydrologie, hydrochimie, pédologie), des synthèses hydrologiques et des travaux sur les données Landsat TM, croisées avec les données multitemporelles radar. L'intérêt de ce document est de présenter une situation actualisée et géolocalisée des fonctions des systèmes hydrologiques de la plaine côtière (carte 4, tableau 3.7). Les limites des unités sont spatialement exactes du fait de l'utilisation d'une information de base par satellite et l'évaluation des surfaces est ainsi optimisée.

Thématique

La première classe (code 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, sa pseudo-profondeur de l'ordre de 50 cm et surtout son étendue en font une zone hydrologique très spécifique qu'il convient de bien connaître pour réaliser le bilan hydrologique.

Les quatre classes suivantes (codes 3, 4, 6, 10) sont représentatives d'une fonction de collecte et de circulation des eaux. Il reste à quantifier, pour chaque classe identifiée, les relations réelles avec la nappe et la part du ruissellement, ce qui représente un travail d'investigation de terrain important et très instrumenté.

Pour cette dizaine de classes, nous avons attribué un indice de vulnérabilité au milieu (quatre niveaux : 1 = faible à 4 = fort) qui tient compte de deux facteurs globaux :

- la dynamique de l'eau : du confinement d'un système (valeur élevée), à une dynamique forte comme en bordure de l'océan (valeur basse) ;
- le type de végétation et de sols associés.

L'extension de chaque classe a été rapportée à la surface totale de la zone côtière étudiée, mangrove comprise. Hormis les surfaces de mangrove qui varient assez rapidement, les autres surfaces demeurent assez stables, pourvu que l'on se réfère à la zone de référence prise pour réaliser les cartographies (c'est-à-dire entre les méridiens 286 500 et 312 500 UTM) et que l'on surveille les modifications anthropiques.

Les classes de vulnérabilité ont été pondérées par simple produit par les surfaces relatives des 10 classes de l'esquisse hydrologique fonctionnelle, pour générer un "index de zone". La classification selon la valeur de cet index est donnée dans le tableau 3.7.

carte 4

dos carte 4

Tableau 3.7 - Légende du document hydro-thématique (carte 4)

Code	Classe	% surface	Vulnérabilité	Index zone
1	eau libre, stockage permanent	22,57	4	90,27
3	exondée, hydromorphe, voire inondable	14,14	3	42,42
6	exondée, hydromorphe à drainage superficiel et latéral	19,00	2	38,01
10	circulation sous forêt galerie, alimentation des marais	6,05	4	24,18
4	exondée, perméable, non hydromorphes	10,61	2	21,21
7	mangrove jeune en échange avec la dynamique de l'océan	17,11	1	17,11
2	zone inondable en saison des pluies, stockage temporaire	6,42	2	12,85
5	inondable le long des cours d'eau	1,29	4	5,16
8	mangrove adulte en échange avec la dynamique de l'océan	1,87	2	3,74
9	aménagée (hors CSG)	0,94	1	0,94
11	drainage sur socle généralement superficiel et latéral (forêt primaire)	-	-	-

Hormis la mangrove (codes 7 et 8), et les zones aménagées (code 9), les deux dernières classes (2, 5) ont un faible index zone malgré la vulnérabilité de la classe 5, proche des cours d'eau, mais de faible étendue.

5.3. Exemple d'application

Carte prévisionnelle de vulnérabilité intrinsèque des formations naturelles

Jusqu'à présent, toute la démarche visant à aboutir à l'esquisse fonctionnelle hydrologique s'est déroulée en l'absence de considérations sur une éventuelle pollution du milieu et son origine géographique. En effet, nous posons pour principe que plus ces considérations seront "retardées" dans la réflexion et par rapport à la production de documents, plus ceux-ci comporteront d'informations pertinentes sur le milieu et son fonctionnement. Ce n'est pas une attitude "économique" d'étude scientifique, mais il faut bien admettre qu'il est bien difficile a priori d'optimiser la qualité et la quantité des études au regard d'un problème de pollution du milieu naturel. Il serait intéressant d'ailleurs d'établir une carte de synthèse de la vulnérabilité du milieu par rapport à des grandes familles de pollution et à des modes de dispersion types : par exemple, un type de pollution par l'air ou le déversement direct dans une rivière.

La cartographie prévisionnelle de la vulnérabilité (Huynh et al., 1996) qui est présentée a été réalisée pour un mode de dispersion d'un polluant par nuage gazeux (carte 5). Par contre, et selon le principe que nous avons évoqué plus haut, l'incidence de la complexité chimique des produits sur les sols et la végétation n'a pas été abordée, pas plus que l'origine géographique. Pour prendre en compte ce dernier point, il faudrait appliquer un gradient sur le résultat cartographique à partir de la source de pollution et en tenant compte des conditions climatologiques.

Les hypothèses de travail ont concerné le contact polluant/milieu et une notion de "rugosité de surface" a été proposée : le phénomène s'apparente à un piégeage de particules en suspension dans l'air par la végétation. La plus exposée est celle qui offre la plus grande surface de contact ou qui oppose le plus de résistance à l'écoulement des masses d'aérosols proches du

sol. La notion de vulnérabilité sera donc dépendante de cette rugosité du milieu : les unités de paysage les plus exposées seront celles qui offriront la plus grande rugosité.

Par ailleurs, il a été pris en compte l'indice de vulnérabilité cartographié dans l'esquisse hydrologique fonctionnelle : les zones de stockage sont les plus sensibles ; les zones à circulation et de stockage temporaire sont les moins sensibles.

Les formations se sont alors organisées selon le gradient de vulnérabilité croissant :

- 1) aménagements, carrières,
- 2) savanes sèches ouvertes,
- 3) savanes herbacées inondables,
- 4) savanes herbacées enclavées,
- 5) marais herbacés,
- 6) savanes arbustives denses,
- 7) savanes arbustives inondables,
- 8) mangrove jeune,
- 9) mangrove adulte,
- 10) formations arborées inondables sur flat,
- 11) formations arborées hautes,
- 12) forêts marécageuses.

Ce type de d'intégration numérique d'informations a permis de spatialiser la notion de vulnérabilité par rapport aux critères de rugosité et de circulation / stockage des eaux. Ce n'est qu'une étape qui ne prend pas en compte les risques encourus par la faune par exemple. La démarche indiquée à la figure 3-27 pour l'hydrologie peut être répétée et adaptée pour chaque thématique (végétation, pédologie...). Certains problèmes restent encore délicats à régler comme par exemple l'intégration d'indicateurs de la biodiversité ou encore de valeur patrimoniale. C'est au prix de ces recherches que l'on pourra aboutir à la cartographie de la vulnérabilité intrinsèque. Par la suite, et selon les disciplines, une carte des valeurs dans chaque domaine thématique (quand ce sera possible) pourrait y être ajoutée pour aboutir à la notion de sensibilité du milieu. Enfin, le croisement des informations concernant la localisation de la source de pollution et son mode de dispersion avec la cartographie de la sensibilité du milieu permettrait de réaliser une cartographie précise des prévisions d'impact sur l'environnement (fig. 3-28).

3-28

dos 3-28

carte 5

dos carte 5

légende

dos légende

5.4. Conclusion du chapitre 5

Dans un contexte d'aménagement et de gestion de l'espace littoral, la connaissance des caractéristiques et des fonctions globales des zones humides présente un intérêt grandissant par rapport à toute nouvelle action envisagée sur cet environnement. C'est dans ce contexte que le scientifique se trouve de plus en plus sollicité pour entrer dans la communauté d'acteurs à laquelle incombe la prise de décision. Pour apporter une connaissance essentielle aux problèmes de zonage de l'espace et au fonctionnement de ces écosystèmes, nous avons identifié les objectifs suivants, en regard de la méthodologie proposée :

- description des unités écologiques en termes de connaissance scientifique ;
- recherche d'unités fonctionnelles pour l'inventaire et la cartographie ;
- établissement de concepts génériques et d'une terminologie commune à l'échelle de la zone géographique ;
- organisation de la connaissance vers l'objectif d'aide à la décision.

Nous avons examiné les principes généraux de la démarche de gestion intégrée : définition des problématiques, recherche d'indicateurs et d'indices, notion d'enveloppe de surcharge, pour l'appliquer au cas guyanais. On a identifié une problématique de "planification préventive des zones humides" qui dégage un premier besoin d'information pour un zonage écologique dans lequel l'expertise spatialisée est nécessaire. Nous avons insisté sur la mise en place d'une méthode "auto-adaptative" qui intègre la notion de "retour d'expérience".

Nous avons vu selon quels principes on pouvait aborder les classifications des zones humides sur des critères prenant en compte l'hydrologie du milieu : stress hydrique, position limnimétrique de la zone, salure des eaux, variation saisonnière des paramètres hydrologiques. L'objectif de cette approche par classification, qui rappelle la systématique traditionnelle (systèmes, sous-systèmes, classes), est une nécessité pour réaliser un découpage de l'espace. Souvent, les critères cités ne suffisent pas à cette zonation et il est vite apparu le besoin d'introduire d'autres éléments qui vont être recherchés dans les caractéristiques de fonctionnement de l'écosystème, comme le gradient d'énergie hydrodynamique ou l'approche "hydrogéomorphologique" (HGM), qui associe des caractères descriptifs et fonctionnels.

A ce stade de connaissance du milieu, apparaît également une exigence de connaissance spatialisée que nous avons illustrée par le cas guyanais : en utilisant les données des satellites optiques (Spot, Landsat), confrontées aux données de terrain, on obtient une information biophysique actualisée sur le milieu et qui peut être utilisée dans une classification des zones humides :

- soit en tant que données interprétées (classification radiométrique à partir de parcelles test) dont le résultat est une expertise thématique,
- soit en tant que donnée brute (cette zone naturelle a telle valeur de réflectance), comme une nouvelle caractéristique physique s'ajoutant aux critères traditionnels de la classification de l'espace côtier.

L'apport des nouveaux capteurs comme le radar montre également la possibilité de générer des indicateurs originaux de classification des zones humides côtières, comme le "degré d'échange avec l'océan" ou encore des éléments liés à l'hydrodynamisme. Nous proposons une description de l'organisation du réseau de bas-fonds, nécessaire à la description des relations hydrauliques entre systèmes, et une spatialisation des phénomènes concernant l'eau de surface (par utilisation du radar en multitemporel), à l'échelle de la crue, de l'inondation saisonnière et annuelle.

Ces éléments de connaissance du terrain ponctuels, spatialisés et temporels permettent alors de proposer des cas génériques de description du fonctionnement hydrologique des zones

humides pour aborder leur modélisation. Nous avons retenu trois cas, représentatifs des principaux types de marais côtiers :

- à forte relation avec l'océan ;
- à faible relation avec l'océan ;
- à effets océaniques, atténués par un estuaire.

La recherche d'une formulation synthétique nous a conduit à élaborer une information hydro-pédologique spatialisée, sous la forme d'une esquisse fonctionnelle d'une zone humide (Karouabo). La cartographie de vulnérabilité intrinsèque du milieu a été obtenue sur des critères connus et mesurés de dynamique des eaux de surface.

Cette étape de capitalisation de la connaissance hydrologique est une étape indispensable à la logique de la démarche intégrée. Elle procède d'une synthèse d'information destinée également aux autres acteurs : scientifiques mais aussi décideurs pour lesquels l'information du spécialiste n'est pas toujours aisément déchiffrable.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Depuis 1985, la plupart des études scientifiques sur la zone côtière de Guyane ont été réalisées à partir d'une problématique d'impact sur l'environnement et d'un questionnement par une communauté d'acteurs ayant en charge la gestion de ce département continental tropical.

Devant cette demande sociale, il s'est dégagé un questionnement tourné vers les scientifiques pour décrire les caractéristiques hydrologiques et le fonctionnement des écosystèmes côtiers, et pour réaliser leur bilan hydrologique. Parmi les outils d'investigation les plus adaptés, la télédétection a permis d'aborder l'étendue spatiale des objets au sol et des phénomènes hydrologiques, puis de produire des résultats scientifiques spatialisés, nécessaires à la démarche de gestion intégrée de la zone côtière.

Notre propos a été de faire une liaison entre cet objectif de gestion intégrée et les résultats obtenus en hydrologie, avec l'objectif de fournir les meilleurs éléments de connaissance sur ces hydrosystèmes tropicaux humides.

• Principaux résultats

D'une manière générale, on constate la faible implication de la recherche scientifique en hydrologie dans les zones humides tropicales. Seulement 20 % des études mondiales concernent cette zone géographique et la principale investigation est souvent d'ordre naturaliste. La terminologie permettant de décrire ces espaces est peu précise : en Guyane, on ne peut évoquer qu'en termes assez vagues les marais maritimes saumâtres (*salt marsh*), les zones d'eau douce (*swamp*) ou les forêts inondées (*swamp forest*).

Du fait de la faible dynamique de l'eau, les mesures sur le terrain sont très difficiles et il n'est pas toujours possible de réaliser des bilans hydrologiques complets. Parmi les termes du bilan, le plus imprécis concerne actuellement l'évaluation des flux d'eaux souterraines, alors que les autres termes du bilan hydrologique (pluviométrie, débit, flux océanique, évapotranspiration) peuvent être accessibles par les méthodes traditionnelles d'analyse.

Nous avons pu réaliser l'essentiel des mesures hydrologiques de surface dans le cas de deux zones humides et d'un estuaire : le marais de Mana et la zone de la Karouabo, près de Kourou et l'estuaire du Sinnamary. Certaines relations ont pu être dégagées comme par exemple, celle reliant le coefficient de marée aux volumes de jusant (Mana, crique Amarante), sorte d'étalonnage permettant de quantifier les mouvements des masses d'eau à tout moment.

Bien que le fonctionnement hydrologique de surface de certaines zones humides ait pu être décrit en Guyane, il reste encore de nombreux points à éclaircir sur l'action du cycle de l'eau et de l'hydrodynamisme sur la richesse spécifique des milieux et leur production primaire.

L'investigation dans les zones humides a nécessité l'utilisation de l'imagerie satellitale : d'une part à cause d'un besoin de connaissance des hydrosystèmes gêné par un manque d'accessibilité et, d'autre part, à cause des possibilités de spatialisation de résultats originaux concernant la qualité de l'eau, l'humidité des sols de savane et une estimation de l'évapotranspiration.

• Qualité de l'eau

L'essentiel des éléments présents dans les estuaires de Guyane étant des MES, de valeurs assez élevées, en raison de la remise en suspension des vases d'embouchure, nous avons proposé une loi empirique qui rend compte de la répartition de la turbidité de surface dans l'estuaire du Kourou et de la Sinnamary :

$$\log(\text{turb}) = 0,0495 * \text{ACP2}_{\text{MSS}} - 4,67$$

Ces résultats, qui ont nécessité la coïncidence des observations de terrain et du passage du satellite, sont restreints à être utilisés avec la donnée MSS du 30 octobre 1976.

- **Température**

De même, en utilisant les données du canal thermique de Landsat TM et les informations sur leur calibration, nous avons pu obtenir une relation simple entre les comptes numériques calibrés et une estimation de la température des eaux et du couvert végétal des hydrosystèmes :

$$T^{\circ}\text{C} = -35 + 0,5 \text{ TM6}_{\text{calibré}}$$

Ces "instantanés" montrent une structure spatiale cohérente avec les observations de terrain et comportent une nouvelle information de type thématique pouvant enrichir les critères de classification des estuaires et des zones humides. Pour les rendre utilisables sur l'ensemble du littoral, il faudrait corriger les valeurs par un modèle de correction atmosphérique spécifique des régions tropicales.

- **Humidité du sol**

La spatialisation des informations concernant l'humidité des sols par radar actif (comme celui de ERS1) est en phase de recherche. Sur un site de la plaine côtière de Guyane (Karouabo), nous avons pu montrer que certaines savanes présentaient des variations dans le temps du signal rétrodiffusé, qui pouvaient s'expliquer par des différences de conditions hydro-pluviométriques. Néanmoins, à notre échelle de travail, il demeure encore difficile de séparer le concept de rugosité du sol (au sens électromagnétique) de l'humidité (dépendant de la conductivité électrique du sol) et dont la combinaison est explicative de l'amplitude du signal rétrodiffusé.

- **Evapotranspiration**

La spatialisation de l'évapotranspiration dans les hydrosystèmes tropicaux demandera encore beaucoup d'expérimentations et d'approches théoriques. Notre investigation sur ce domaine visait essentiellement à faire une synthèse du problème pour optimiser les futurs projets expérimentaux en zone humide. C'est en effet un domaine où il est indispensable d'utiliser les données multi-capteurs si l'on veut le modéliser : radar actif pour accéder à l'humidité et à une estimation de la température du sol, données optiques et radar pour déterminer la fraction de couvert végétal, et enfin infrarouge thermique pour accéder à une température composite du sol et de la végétation.

Ces travaux, qui débouchent sur une spatialisation d'une grandeur physique et qui demandent une phase de mesure de terrain pour l'étalonnage et la validation, ont montré l'importance d'une approche théorique concernant le problème de changement d'échelle. Cette démarche théorique déborde largement sur toute l'activité de spatialisation d'informations à partir de données satellitaires. Spatialiser une information à une échelle et une résolution données comporte des risques d'incohérence physique, par rapport aux hypothèses de travail (mesures utilisées, modélisation) si l'on n'associe pas à la fois une réflexion sur la dimension spatiale et la dimension spectrale.

Dans l'objectif de contribuer à l'élaboration d'une méthode de gestion intégrée des zones humides, nous avons analysé les besoins méthodologiques dans ce domaine. Il a été défini une activité qui revient au scientifique : la recherche d'indicateurs, spatialisés ou non, répondant à une problématique spécifique (pollution, pression anthropique...). Ces concepts permettront de construire, à partir de la connaissance du milieu, des "enveloppes" d'état du milieu, de surcharge, et de définir la capacité de régulation du milieu.

Au stade de développement des activités économiques en Guyane, il a été identifié une problématique de "planification préventive des hydrosystèmes côtiers" qui nécessite l'élaboration d'une base de données dont la plupart des constituants sont spatialisés.

Notre propos de départ étant de produire des résultats scientifiques s'intégrant aux méthodes de gestion des zones humides, nous avons recherché le matériel le plus pertinent pour permettre cette approche. Les classifications naturalistes de type systématique sur les zones humides ne suffisent pas à la définition d'unités représentatives d'une réalité pour aborder leur gestion. Afin d'interpréter et de faire la synthèse des résultats hydrologiques, nous avons dû considérer un aspect supplémentaire qui est l'aspect fonctionnel de ces systèmes et qui ouvre de nouvelles voies dans la classification.

A ces fins, l'apport thématique spécifique des différentes données satellite se révèle important. La description biophysique du milieu a été proposée dans une démarche résolument non supervisée, pour obtenir une sorte d'inventaire radiométrique et géométrique utile aux systèmes d'information. Des compléments nouveaux dans la description des réseaux de drainage en savane, en relation avec l'organisation pédologique des sols, ont été obtenus avec le radar imageur de JERS1.

Les informations multitemporelles des images radar de ERS1 ont permis de réaliser une spatialisation hydrologique de type dynamique : zones de stockage à l'échelle de l'année, du mois, de la crue et degré d'échange avec l'océan.

La synthèse de ces informations a conduit à proposer trois cas génériques de fonctionnement hydrologique des systèmes bassins-versants et zone humides associées. Cette approche fonctionnelle constitue la base d'une première classification des zones humides de Guyane, permettant d'aborder en même temps leur modélisation. Nous avons défini et modélisé les trois cas suivants :

- un système quasiment fermé à l'océan et dont les eaux douces stockées dans les marais s'écoulent en mer pendant les crues : on observe dans les simulations que le stockage d'eau dans le marais est de la durée des crues du bassin-versant ;
- un système ouvert à l'océan subissant les contraintes quotidiennes de la marée : le volume du marais est très faible, sans possibilités de stockage d'eau, même pendant les crues ;
- un système à relation indirecte avec l'océan (près d'un estuaire par exemple) : dans ce cas, le volume est modulé par les crues et les apports du débit de base. Il est stocké une importante quantité d'eau, qui s'évacue seulement lors des crues.

L'approche fonctionnelle et la synthèse développée dans ce travail nous ont conduit à proposer pour la première fois une démarche de spatialisation hydrologique de nos informations. La synthèse des éléments pour réaliser cette esquisse hydrologique fonctionnelle spatialisée s'inscrit dans une préoccupation plus globale de conception d'une carte de vulnérabilité intrinsèque des milieux côtiers indispensable à l'approche en termes de planification préventive.

Perspectives

Le fil conducteur de ce travail nous a amené à adopter une attitude dans laquelle la spatialisation de la connaissance hydrologique a été très forte, dans un but de classification de l'espace côtier. Sans atteindre cette classification au sens strict des zones humides de la Guyane, nous avons proposé trois cas génériques de fonctionnement hydrologique des hydrosystèmes côtiers, qui représentent une première base de réflexion pour la description d'unités fonctionnelles plus élargies, puisqu'elles intégreront aussi les résultats d'autres disciplines.

Pour poursuivre cette démarche, il sera nécessaire d'améliorer les dispositifs expérimentaux et les mesures de terrain, en les optimisant notamment par rapport à ce que l'on attend des possibilités des capteurs satellite et des projets de satellites spécifiques du milieu tropical (projet TROPIQUES par exemple).

Nous pouvons identifier plusieurs domaines où il est nécessaire de poursuivre l'investigation scientifique :

- la circulation des eaux souterraines pour "boucler" les bilans et parfaire l'aspect fonctionnel du système humide ;
- la spatialisation de l'humidité des sols et l'intégration à la modélisation hydrologique ;
- la recherche d'indicateurs et d'indices par télédétection, adaptés au contexte tropical présentant une capacité intégratrice et spatialisable ;
- le développement de bases de connaissances pensées par rapport à la problématique définie par une communauté d'acteurs (gestionnaires, scientifiques, utilisateurs) ;
- le développement de la notion d'enveloppe de surcharge : construction et comparaison des "enveloppes d'état" et de charge sur le milieu pour définir sa capacité de régulation ;
- le développement d'outils de représentation de cette connaissance ;

A l'inverse de bon nombre d'hydrosystèmes côtiers tropicaux mondiaux, la pression anthropique sur le système guyanais est faible. Nous sommes dans un cas assez rare, où l'état "zéro" peut être effectué en l'absence d'aménagements déjà perturbants. L'investigation scientifique sur les zones humides de Guyane, qui a commencé dans les années 80, n'est donc pas en retard par rapport à la demande sociale. Le moment est venu pour ce département français d'outre-mer de réaliser son insertion dans une politique nationale de gestion des zones humides.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Allison, M.H. (1993). Mechanisms of coastal progradation and muddy strata formation adjacent to the amazon river. A dissertation to The Graduate School in Partial Fulfillment of the Requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Coastal Oceanography. State University of New York at Stony Brook: 322 p.
- Andrieux, P., (1990) Influence de la variabilité spatiale des caractéristiques physiques des sols sur le bilan hydrologique. L'exemple d'un système de sols sur barre pré littorale (Guyane française). Thèse de troisième cycle, Université de Montpellier 11: 182 p.
- Andrieux, P., Voltz M. & A. Durbec (1996) Fonctionnement hydrologique d'un interfluve sédimentaire de la plaine côtière ancienne de Guyane française. *Revue des Sciences de l'Eau*, **1**, p. 51-74
- Aselmann, I. and P.J. Crutzen, (1990),. A global inventory of wetland distribution and seasonality, net primary productivity, and estimated methane emissions . In : A.F. Bouwman (Ed.), soils and the Greehouse Effect. John Wiley and Sons, Chichester, pp. 441-449.
- Attema E. P. W. & Ulaby F.T., (1978) Vegetation modeled as a water cloud. *Radio Science*, **13** : 357-364.
- Augustinus, P.G.E.F. (1978) - The changing shoreline of Suriname *Natuurwetenschappeliike Studiekring Suriname. Ned./Antillen utrecht.*
- Barnaud, G. , & D. Richard, (1993) Inventaire des zones humides en France. Ve session de la conférence des parties de la convention de Ramsar. Atelier conservation des sites de la Liste 10 p.
- Barton, I.J., (1978) A case study of microwave radiometer measurement over bare and vegetated surfaces. *J. Geophys. Res.* **83**, 3513-3517.
- Bay, R.R., 1969, Runoff from small peatland watersheds. *J. of hydrology*, 9:90-102.
- Bazilevich, N. I., L. Ye. Rodin, and N.N. Rozov, (1971), Geophysical aspects of biological productivity, *Soviet Georg.* 12:293-317.
- Bazilevitch, N. I., & A.A. Tishkov, (1982) Conceptual balance model of chemical elements cycles in a mesotrophic bog ecosystem, in *Ecosystem Dynamics in Freshwater Wetlands and Shallow Water Bodies*, vol II. SCOPE and UNEP, Moscow, USSR, p.236-272.
- Bellamy, D.J. (1968) An ecological approach to the classification of the lowland mires in Europe, 3rd Intern. Peat Congress Proc. Quebec, Canada p. 74-79
- Bellesort B., & C. Migniot (1972) Etude comparative des mouvements sédimentaires dans quelques estuaires. *La Houille Blanche*, vol. 8, pp. 695-702.
- Benallegue M., (1993) Etude de la faisabilité de la mesure par radar de l'humidité et de la rugosité des sols. Thèse, Paris Sud Orsay.
- Bernard E.A. (1953) Evaporation annuelle de la forêt Congolaise et l'influence de celle-ci sur la pluviosité. *Bull. de l'Inst. Royal Colonial Belge.*
- Blancanaux, P. (1981) - Essai sur le milieu naturel de la Guyane française *Travaux et documents ORSTOM*, n° 137.
- Blasco F., (1991). Les mangroves. *Revue La Recherche*, 22, n° 231 : 444-453.
- Boulé M.E., (1994) An early history of wetland ecology. *Global Wetlands : Old world and New*. Edited by W.J. Mitsch. Elsevier Science B.V

- Boulet, R., (1986), Etat des recherches sur les sols Guyanais : apport de la pédologie au développement 12p. ORSTOM Cayenne.
- 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.
- Boulet, R., Chauvel A., Humbel F.X., Lucas Y. (1982) Analyse structurale et cartographie en pédologie : II - 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 : 341-351.
- Boyé M. (1962) - Les palétuviers du littoral de la Guyane. Les cahiers d'Outre-Mer, 15 (59), 271-290, 2 fig., 3 tabl., 8 pl.
- Bringson, M.M., (1977) Decomposition and nutrient exchange of litter in a alluvial swamp forest, *Ecology* 58 : 601-609.
- Brinson M. M. , (1993) A hydrogeomorphic Classification for Wetlands. Wetlands Research Program Technical Report WRP-DE-4. US Army Engineers Waterway Experiment Station, Vicksburg MS.
- Brinson, M. M., W. Kruczynski, L. C. Lee, W.L. Nutter, R.D. Smith & D.F. Whigham (1994) Developing an approach for assessing the functions of wetlands. *Global wetlands : Old World and New*. Edited by Mitsch W. J. Elsevier Science B.V.
- Brngson M.M., A.E. Lugo, & S. Brown (1981) Primary productivity, decomposition and consumer activity in freshwater wetlands, *Annu. Rev. Systematics*, 12 123-161.
- Brown, S. L. (1981) A comparison of the structure, primary productivity, and transpiration of cypress ecosystems in Florida. *Ecol. Monogr.* 51 403-427
- Brown, S. L., (1990) Structure and dynamics of basin forested wetlands in North America, in forested wetlands, *Ecosystems of the world*, A. E. Lugo, M. M. Brinson, & S. L. Brown, eds., Elsevier, Amsterdam, pp. 171-199.
- Carter, V., M.S. Bedinger, R.P. Novitzki, & W.O. Wilen, (1979), Water resources and wetlands, in wetlands functions and values : the state of our understanding LarKed., American water resources Asso., Minneapolis, Minn., pp. 344-376.
- Caselles V. & J. Delegido, (1987) A simple model to estimate the daily value of the maximum evapotranspiration from satellite temperature and albedo images. *Int. J. Remote Sensing* 8 : 1151-1162.
- Chamie, J.P., & C.J. Richardson, (1978) Decomposition in northern wetlands, *Freshwater Wetlands-Ecological processes and Management Potential*. R.E. Good, D.F. Whigham, and R.L. Simpson, eds., Academic Press, New-YorkP. 115-130
- Chehbouni A., Qi J., Lo Seen D., Dedieu G., Moran S., Daubas M., Monteny B.M. (1995) Estimation of real evapotranspiration using remotely sensed data. *Atelier International FAO/Engref/ORSTOM*. Montpellier nov. 95.
- Choubert, B., (1978) Atlas des DOM - La Guyane, Planche 4. Ceget/CNRS-ORSTOM. n° ISBN 2-222-02501-X.
- Cintron G., A. E. Lugo & R. Martinez, 1985 Structural and functional properties of mangroves forest, in *The Botany and Natural History of Panama*, IV series : Monograph in sytematic botany, vol. 10, W. G. d'Arcy & M. D. Correa, eds., Missouri Botanical Garden, St. Louis, pp. 53-66.
- Clements, F.E., (1928) *Plant Succession and Indicators* H.W. Wilson Company, New-York, 453 P.
- Cormier-Salem M.C. (1994) Dynamique et usages de la Mangrove dans les pays des rivières du Sud (du Sénégal à la Sierra Leone. Série "Colloques et Séminaires". ORSTOM éd., Paris.

- Cowardin, L.M., V. Carter, F.C. Golet, E.T. LaRoe, (1979), Classification of wetlands and deepwater habitats of the US. US Fish & Wildlife Service Pub. FWS/OBS-79/31, Washington DC, 103 p.
- Czerwinski, L.C., Pénicand, C., Rudant, J.P., Lointier, M., (1994) Evaluation de l'apport de l'imagerie spatiale ERS1 en cartographie sur la Guyane. Rapport d'évaluation technico-opérationnelle. DGA/ETCA/CEGN/STAT/UPMC, n° 85331. DGA éd.
- Dabrowska-Zielinska K., Gruszczynska M., Janowska M. & K. Stankiewicz (1995) Use of ERS1 Sar data for soil moisture assessment. *Sensors and Environmental Applications of remote sensing*, Aske eds., Balkema, Rotterdam. p. 111-116.
- Deghi G.S., K.C. Ewel, & W.J. Mitsch (1980) Effects of sewage effluents application on litterfall and litter decomposition in cypress swamps, *J. Appl. Ecol.* 17 : 397-408
- Demerara Coastal Investigation (1962) - Hydraulics Laboratory - Delft Netherlands.
- Denis J., Hénocque Y., Grignon-Logerot C., Gérard B., Barusseau P., Brigand L., Lointier M. (1996) Guide méthodologique d'aide à la gestion intégrée de la zone côtière, Phase préparatoire, UNESCO-COI, Paris.
- Draper N. & Smith. H. (1981) *Applied Regression Analysis*. Wiley-Interscience, 2nd edition.
- Dubreuil, P. & Hiez, G. (1964) Les régimes hydrologiques en Guyane Française. *Mémoire ORSTOM*. n°3, 120 p.
- Ducrey M., Guelh J.M., Finkelstein D. (1983) Evolution comparée des microclimats en coupe rase, sous recru naturel et sous forêt primaire. *Projet Ecerex. Journées de Cayenne*, (4 mars 83), Gerdat, Inra, Museum, ORSTOM, pp.327-340.
- Dugan, P. J., (1992) La conservation des zones humides. *Problèmes actuels et mesures à prendre*, UICN-Union Mondiale pour la Nature eds., 100 p.
- Dugan, P. J., (1994) Wetlands in the 21st century : the challenge to conservation science. *Global Wetlands : Old world and New*. Edited by W.J. Mitsch. Elsevier Science B.V
- Durand H., 1995 Apports d'un S.I.G. à l'analyse des conséquences de l'érosion littorale : étude de cas sur le littoral de l'Hérault et du Gard. *Inst. Fr. de L'environnement & Gutlar*.
- Eggelsmann, R., (1963) Die Potentielle und Aktuelle Evaporation eines Seeklimathochmoores, *Intern. Assoc. Sci. Hydrol. Publication n° 62* p.88-97
- Engman E.T. & Gurney R.J., 1991 : *Remote sensing in hydrology*, Chapman and Hall, ISBN 0-412-24450-0. London.
- Fellah K., Besnus Y., Clandillon S., Ettajani A., Meyer C., & P. de Fraipont, (1994) Multi-temporal ERS1 Sar data in environmental studies : researching a quantitative approach for soil moisture retrieval. *First ERS1 Pilot Project Workshop, Toledo*. ESA n° SP-365. p.85-92
- Fetter, C.W., Jr., W.E. Sloey, & F.L. Spangler, 1978, Use of a natural marsh for waste water polishing, *J. water pollution control fed.*, 50 : 290-307.
- Franken W., Leopoldo P.R., Matsui E., Goes Ribeiro M.N. (1982a) Estudo da interceptacao da água de chuva em cobertura florestal amazônica do tipo terra firme. *Acta Amazonica* 12(2), pp. 327-331.
- Franken W., Leopoldo P.R., Matsui E., Goes Ribeiro M.N. (1982b) Interceptacao das precipitações em floresta de terra firme. *Acta Amazonica* 12(2) suplemento, pp. 15-22.
- Fritsch, J.M., (1992) Les effets du défrichement de la forêt Amazonienne et de la mise en culture sur l'hydrologie de petits bassins-versants. *Opération ECEREX en Guyane française*. Col. Etudes et Thèses. ORSTOM éd.
- Froidefond, J.M., Prost, M.T., Griboulard, R. (1985) - Etude de l'évolution morpho-sédimentaire des littoraux argileux sous climat équatorial l'exemple du littoral guyanais. *Rapport CORDET*. 189 p. Dep- Géol Océan. IGBA. Talence.
- Fustec, E., Frochot, B. (1995) Les fonctions des zones humides, synthèse bibliographique. Agence de l'Eau Seine-Normandie, Université P. & M. Curie et Université de Dijon. *Mult.* 134 p.

- Gardner, L.R., 1975, Runoff from an intertidal marsh during tidal exposure : regression curves and chemical characteristics, *Limnol. Oceanogr.* 20: 81-89.
- Gasc, J.P. & Lescure J., (1979) Amphibiens et reptiles : ensembles faunistiques et indicateurs biologiques en forêt guyanaise. *Bull. de liaison du groupe de travail Ecerex*, n°1, 35-36.
- Gaussorgues G., (1984) La thermographie infrarouge : principes, technologies, applications. coll. *Techniques & Documentation*, Lavoisier.
- Gilman, K. (1982) Nature conservation in wetlands : two small fen basin in western Britain, in *Ecosystem dynamics in fresh water wetlands and shallow water bodies*, vol. 1, D. D. Logofet & N. K. Luckyanov, eds., SCOPE and UNEP workshop, Centre of Internat. Projects, Moscow, USSR, pp. 290-310.
- Gosselink J.G., & R. E. Turner, (1978) The role of hydrology in freshwater wetland ecosystems, in *Freshwater Wetlands : Ecological Processes and Management Potential*, R.E. Good, D.F. Whigham and R.L. Simpson, eds., Academic Press, New York, pp 63-78.
- Gougenheim, A. (1954) -Cours pratique des marées. Service Hydrographique de la marine, 200 p.
- Gougenheim, A. (1954) Cours pratique des marées. Service Hydrographique de la Marine, 200 p.
- Granville de J.J. (1986) Les formations végétales de la bande côtière de la Guyane française. Le littoral Guyanais (fragilité de l'environnement). SEPANGUY- SEPANRIT Ed.: 47-63. Cayenne. Guyane.
- Grimaldi M., Grimaldi C. & B. Barthès (1990) Variations spatiales du sol des barres pré-littorales de la plaine côtière ancienne de Guyane : analyse structurale et cartographie. Evolution des côtes de la Guyane et de la zone Caraïbe méridionale pendant le Quaternaire. Symp. PICG 274. Série Colloques et Séminaires, ORSTOM éd., Paris. p. 251-264
- Grouchy, S., Rousseaux, S. (1993) Patrimoine naturel : Quelles sont les contraintes réglementaires pour les projets d'aménagement et de gestion du territoire? Association Française des Ingénieurs Ecologues. ISSN 0765-9067.
- Gu, X.F. & B. Seguin, (1993) Evaluation of correction methods for atmospheric effects on temperature measured by Ers1-Atsr, Noaa-Avhr and Landsat 5 TM sensors. Thermal remote sensing Proceedings, La Londe les Maures, France. A. Vidal, Cemagref ed.
- Guyane : Annuaire Hydrologique - (1984 - 1985) ORSTOM - Cayenne B.P. 165 - 97323 Guyane Fr. ISSN 0988 - 4904.
- Guyane : Atlas des départements français d'Outre-Mer (1979) Tome IV. La Guyane. ORSTOM - CNRS. Editions du CNRS.
- Guyot G. (1989) Télédétection Satellitaire, vol. 5, Signatures spectrales des surfaces naturelles. coll. Paradigme.
- Hall, F. R., R. J. Rutherford, et G. L. Byers, (1972) The influence of a New England Wetland on water quantity and quality, New Hampshire Water Resource center Research Report 4, univ. of New Hampshire, 51 p.
- Heald, E.J.(1969) The production of an organic detritus in a South Florida Estuary, Ph.D. Dissertation, University of Miami, 110 p.
- Heimburg, K. (1984) Hydrology of north Florida cypress domes, in *Cypress Swamps*, K.C. Ewel and H.T. Odum, eds, University Presses of Florida, Gainesville, pp. 72-82.
- Hemond, H.F. & Fifield, J.L., (1982) Sub-surface flow in salt marsh peat : a model and field study. *Limnol. Oceanogr.*, 27, 126-136
- Hoepffner M., (1974) Les bassins-versants de la crique Grégoire. Rap. ORSTOM H48. Cayenne

- Hopkinson, C.S., Jr., & J.W. Day, Jr., 1980, Modeling hydrology and eutrophication in a Louisiana swamp forest ecosystem, *Envir. Manage.*, 4 : 325-335.
- Huynh, F., Charron C., Demagestri L., Dosso M., Gardel A., Garrouste V., Grimaldi C., Grimaldi M., Hernandez B., Lamonge O., Lointier M., Loubry D., Panechou K., Prost M.T. (1996) Carte prévisionnelle de vulnérabilité intrinsèque des formations naturelles. Etude d'impact sur l'environnement de la zone de lancement n°3. Rapport final. Contrat Cnes/ORSTOM n°94/2647 lot 3. Mult. 110 pp. Cayenne, Guyane.
- Hyatt R.A. & G.A. Brook, (1984) Ground water flow in the Okefenokee Swamp and hydrologic and nutrients budgets for the period August, 1981 though July 1982. *the Okefenokee Swamp : its natural History , Geology and Geochemistry* A. D. Cohen, D. J. Casagrande, M. J. Andrejko, & G. R. Best, Wetlands Surveys, Los Alamos, N. Mex., pp. 229-245.
- Ingram H.A.P., (1967) Problems of hydrology and plant distribution in mires, *J. Ecol.* 55:711-724
- Ingram, H.A. P., D.W., Rycroft, & D. J. A., Williams, 1974, Anomalous transmission of water through certain peats, *J. of Hydrology* 22: 213-218.
- IUCN, 1994 Cross-sectoral, Integrated Coastal Area Planning : Guidelines and Principles for Coastal Area Development. 219 Huntington Road, Cambridge, CB3 0DL, UK. 64 pp.
- Jacon, G. () Manuel d'Hydrométrie, Tome V, Tracé de la courbe de tarage et calcul des débits. ORSTOM eds.
- Jackson I.J. (1975) Relationships between rainfall parameters and interception by tropical forest. *J. of Hydrology*, 24 : 215-238
- Jackson T. J., Schmugge T.J., (1986) Passive microwaves remote sensing of soil moisture. *Adv. Hydrosoci.* 14 : 123-159.
- Jackson, R.D., Moran, M.S. Gay, L.W. and Raymond, L.H., (1987) Evaluating evaporation from field crops using airborne radiometry and ground-based meteorological data. *Irrig. Sci.* 8, 81-90.
- Jackson, T. J., Schmugge T. J. & Wang, J. R. (1982) Passive microwaves sensing of soil moisture under vegetation canopies. *Water Resour. Res.* 18, 1137-1142.
- Jeantet, D. (1982) - Processus sédimentaires et évolution du plateau guyanais au cours du quaternaire terminal. Thèse de 3e cycle, Univ. de Bordeaux I, 336 p. 31 Tabl., 93 fig.
- Jordan C.F. & J. Heuveldop (1981) The water budget of an Amazonian rain forest. *Acta Amazonica*, 11(1) 87-92.
- Jouanneau, J.M. & Pujos, M. (1987). Suspended matter and bottom deposits in the Mahury estuarine system (French Guiana): environmental consequences. *Netherlands Journal of Sea Research* 21(3): 191-202.
- Junk, W.J., (1982), Amazonian floodplains : their ecology, present and potential use, in *Ecosystem Dynamics in freshwater wetlands and shallow water bodies*, vol. I, SCOPE and UNEP, center of international projects, Moscow, pp. 98-126
- Kerdiles H. & Grondona M. O. (1995) NOAA-AVHRR NDVI decomposition and subpixel classification using linear mixing in the Argentina Pampa. *Int. Journ. of Remote Sens.*, vol 16, n°7, 1303-1325.
- Kneizys, F.X., E.P. Shettle, W.O. Gallery, J.H. Chetwynd, L.W., Abreu, J.E.A. Selby, S.A. Clough and R.W. Fenn (1983) "Atmospheric transmittance/radiance: computer code LOWTRAN 6." Air Force Geophysics Laboratory, Report AFGL-TR-83-0187, Hanscom AFB, MA.
- Laur, H., (1992) - ERS-1 SAR calibration; derivation of backscattering coefficients in ERS-1-SAR-PRI product, ESA ESRIN.
- Lavery, P., Pattiaratchi C. Wyllie A., Hick, P. (1993) Water quality monitoring in estuarine waters using the Landsat TM. *Remote Sensing of Environ.*, 46 : 268-280.

- Le monde Diplomatique (1992) Une terre en renaissance. ISSN 0026-9395. Col. Savoirs, vol n°2, 111-115.
- Lee, R., (1980) Forest Hydrology, Columbia University Press, New York, 349 p.
- Leopold, L.B., M.G. Wolman & J. E. Miller, (1964), Fluvial processes in geomorphology, W.H. Freeman, San Francisco, 522 p.
- Leopoldo P.R., Franken W., Matsui E., Salati E., (1982) Estimativa de evapotranspiracao de floresta amazonica de terra firme. Acta Amazonica suplemento 12(3) 23-28.
- Les Zones Humides : Rapport d'évaluation (1994). Comité Interministériel de l'évaluation des politiques publiques. Premier Ministre - Commissariat général du Plan. La documentation Française. 391 p. ISBN 2-11-003299-5.
- Lettre du Programme Environnement, Vie et Société (1994). Supplément (décembre). Plan d'action 1995-98. CNRS. ISSN 1161-6431, 17 pp.
- 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.
- Lieutaud A. & Fillit M., (1994) Scanned airborne photography and submerged vegetation mapping. Proc. First Internat. Airborne Remote Sensing Conference, Strasbourg, France, 11-15 sept 1994. ERIM, vol 3 pp. 175-185.
- Linsley R.K. & J.B. Francini, (1979) Water Ressources Engineering, 3rd ed., McGraw-Hill, new-York, 716 p.
- Lointier, M. & Roche, M.A., (1988) Salinités et suspension des estuaires de Guyane. Méthodes et résultats. Quatrièmes journées Hydrologiques de Montpellier. Coll. Colloques et séminaires ORSTOM Ed., Paris, France. 81-124
- Lointier, M. & Rudant, J.P., (1993a) Contribution of ERS1 Sar data to hydrologic approach in tropical area : rapport au CEC/JRC. Ispra, Italy. Contrat n° 5244-93-03EDISPF. Mult.. 45 p. Illus.
- Lointier, M. & Rudant, J.P., (1994a) 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.
- Lointier, M. (1984) Dynamique des eaux et de l'intrusion saline dans l'estuaire du Sinnamary (Guyane Fr.) ORSTOM - Cayenne.
- Lointier, M., (1994b) Etude hydrologique des bassins-versants de la Karouabo et de la Passoura. Contrat Cnes n° 2621/ORSTOM. Lot 3 Rapport sur les conséquences des rejets gazeux sur l'environnement. Cayenne. Mult. 80 p.
- Lointier, M., (1994c) Variations saisonnières et flux de quelques éléments majeurs dans trois rivières de Guyane Française. Colloque Grands bassins fluviaux péri-atlantiques CNRS-Insu-ORSTOM. Col. "Colloques et Séminaires". ORSTOM éd. pp. 391-410.
- Lointier, M., (1990) Evolution de la qualité des eaux et dynamique de l'intrusion saline dans l'estuaire du Sinnamary. EDF-CNEH/ORSTOM. Cayenne. Mult. 81 p.
- Lointier, M., (1995) Gestion intégrée des bassins-versants côtiers et des zones humides en milieu tropical. Apport de la télédétection. Atelier International FAO/Engref/ORSTOM. Montpellier nov. 95. (à paraître).
- Lointier, M., Rudant, J.P. Sabatier, D. & Prost, M.T., (1993b) Contribution of ERS1 Sar data to hydrologic approach in tropical area : example in French Guiana. Second ERS1 Symposium. Hamburg. ESA Ed. SP-361, xxx
- Lointier, M., Rudant, J.P., Deroin, J.P. & Prost, M.T., (1993c) Apport des des données du Sar ERS1 à l'étude de l'environnement côtier tropical Guyanais. Colloque Cnes, "de l'optique au radar" Cnes Ed., Paris, France. 59-69.
- Lugo A.E., 1980 Mangrove ecosystems : successional or steady state? Biotropica (supplement) 12 : 845-852.
- Macnae, W., 1963, Mangrove swamps in South Africa, J. Ecol. 51:1-25.

- Maltby, E. Hogan, D.V., Immirzi, C.P., Tellam, J.H. & M.J. Van der Peijl (1994) "Building a new approach to the investigation and assessment of wetland ecosystem functioning" Global wetlands : Old World and New. Edited by Mitsch W. J. Elsevier Science B.V.
- Maltby, E., and R.E. Turner, (1983) Wetlands of the world, Geogr. Mag. 55:12-17.
- Maltby, E., Hogan D.V., Immirzi C.P., Tellam, J.H. & M. J. van der Peijl (1994) Building a new approach to the investigation and assessment of wetland ecosystem functioning. Global wetlands : Old World and New. Edited by Mitsch W. J., Elsevier Science B.V.
- Manton M. J. & M. Bonell (1993) Climate and Rainfall Variability in the Humid Tropics. Hydrology and water management in the Humid Tropics. M. Bonell, M.M. Hufschmidt & J.S. Gladwell eds. Cambridge University Press. UNESCO ISBN 92 3 102854 5. p. 13-33.
- Marceau, D. J., Gratton D. J., Fournier R.A. & J.P. Fortin (1994 b) Remote sensing and the measurement of geographical entities in a forested environment 2. The optimal spatial resolution. Remote Sens. Environ. 49 : 105 -117.
- Marceau, D. J., Howarth, P.J., and Gratton D. J., (1994 a) Remote sensing and the measurement of geographical entities in a forested environment 1. The scale and spatial aggregation problem. Remote Sens. Environ. 49 : 93-104.
- Markham B. L. & J.L. Barker, (1986) Landsat MSS and TM post-calibration dynamic ranges, exoatmospheric reflectance and at-satellite temperature, EOSAT Landsat tech. notes 1 :3-8.
- Martin A. C., N. Hutchkiss, F.M. Uhler, and W. S. Bourn, (1953), Classification of Wetlands of the United States, U.S. Fish and Wildlife Service Special Science Report - Wildlife 20, Washington, D.C., 14 p.
- Matthews, E., and I. Fung, (1987), Methane emissions from natural wetlands : global distribution, area, and environmental characteristics of sources. Global Biogeochemical Cycles, 1:61-86.
- McKnight J.s., D. D. Hook, O. G. Langdon and L. R. Johnson (1981) Flood tolerance and related characteristics of trees of the bottomland of the southern United States, in Wetlands of Bottomland Hardwood forests, Elsevier, Amsterdam, pp. 29-69.
- Mérot P. & Chanzy A. (1991) Mesure de l'humidité d'un sol nu par radar dans des conditions d'excès d'eau. Physical measurements and signatures in Remote Sensing. Proc. of the 5th Intern. Coll. Couchevel. ESA eds. n° SP-319, p. 293-296.
- Mérot P., Crave A., Gascuel-Odoux C., (1994) Effects of saturated areas on backscattering coefficient of the ERS1 synthetic aperture radar : First results. Water Resources Research, vol 30 n°2, p. 175-179.
- Mitsch W. J. & K.C. Ewel (1979) Comparative biomass and growth of cypress in Florida wetlands, Am. Midl. Nat. 101 : 417-426
- Mitsch W.J. (1994) Global wetlands. Old world and new. Elsevier. 967 p.
- Mitsch, W. J. & B. C., Reeder, (1992) Nutrients and hydrologic budgets of a Great Lake coastal freshwater wetland during a drought year, Wetland Ecology and Management, **1 (4)** : pp. 211-223.
- Mitsch, W. J., & K. C. Ewel (1979) Comparative biomass and growth of cypress in Florida wetlands, Am. Midl., Nat. 101 : 417-426.
- Mitsch, W. J., C. L. Dorge, and J. R. Wiemhoff, (1977) Forested Wetlands for Water Resource Management in Southern Illinois. Research Report n° 132, Illinois univ. Water Resources Center, Urbana, III, 225 p.
- Mitsch, W. J., C. L. Dorge, and J. R. Wiemhoff, (1979) Ecosystems dynamics and a phosphorus budget of an alluvial cypress swamp in southern Illinois, Ecology, **60** : 1116-1124.
- Mitsch, W.J., & J.G., Gosselink, (eds) (1993) Wetlands. Second edition. Van Nostrand Reinhold Compagny, New York 539 p.

- Moll J.R., (1988) Monitoring of suspended sediments in Jatiluhur reservoir using satellite images. IGARSS 88 symp., pub. ESA n° SP-284, p1403-1404.
- Monteny, B.A., Lhomme J.P., Chebouni A., Amadou M., Troufleau D., Brunel J.P., Bessemoulin P. Sicot M., Galle S., Lloyd C. Said F. (1994). Les interactions surface continentale-atmosphère en milieu sahélien. Passage de l'échelle stationnelle à l'échelle régionale. Xe Journées Hydrologiques. Série Colloques et Séminaires. ORSTOM p. xx-xx.
- Musy A. & M. Soutter (1991) Physique du sol. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. Coll. Gérer son Environnement. n°6, ISBN 2-88074-211-0. Lausanne.
- Needham, J., Lu Gwei-Djen, and Huang Hsing-Tsung, (1986). Science and civilization in China, Vol. 6, Biology and Biological technology, Part I, Botany. Cambridge University Press, Cambridge, 6 :717 p.
- Niering, W.A., (1985), Wetlands, Alfred A. Knopf, Inc., New-York, 638 p.
- Noguès, J.L., 1984. Etude de l'intrusion saline dans le Sinnamary, Dynamique, hydrochimie, phytoplancton. Mémoire de DEA, Université de Provence, St Charles/ORSTOM Cayenne.
- Novitzki, R. P. (1979) Hydrologic characteristics of Wisconsin's Wetlands and their influence on flood, stream flow, and sediment, in Wetland functions and values : The state of our understanding. P.E. Greeson, Clark, J.R. & J.E., eds., American Water
- Novitzki, R.P. (1994) EMAP-wetlands : a program for assessing wetland condition. Global wetlands : Old World and New. Edited by Mitsch W. J. Elsevier Science B.V.
- Odum, H.T., B. J. Copeland & E. A. McMahan, eds, (1974) Coastal Ecological Systems of the United States, The Conservation Foundation, Washington, D.C., 4 vols.
- Ottlé C. & D. Vidal-Madjar (1993) Assimilation of remote sensing data in a hydrological model. Workshop on Thermal Remote Sensing. Proceedings. La Londe les Maures, France. Cemagref, Pennstate, CETP, eds.
- Peverly, J.H., (1982), Steam transport of nutrients through a wetland, J. Environ. Quality 11:38-43.
- Précis de Télédétection, (1992) Vol. 1. Principes et Méthodes. Aupelf/Uref, ISBN 2-7605-0613-4, Presses de l'Université du Québec.
- Prévoit, L., Champion, I. & G. Guyot (1993) Estimating surface soil moisture and Leaf Area Index of a wheat canopy using a Dual-frequency (C and X bands) Scatterometer. Remote Sensing of Environ., 46 : 331-339.
- Prost, M.T. (1990) Sédimentation côtière et formation de cheniers en Guyane. Evolution des côtes de la Guyane et de la zone Caraïbe méridionale pendant le Quaternaire. Symp. PICG 274. Série Colloques et Séminaires, ORSTOM éd., Paris. p. 397-411.
- Prost, M.T. (1990). Les côtes des Guyanes. Programme environnement cotier. Série Géomorphologie-Sédimentologie: mult. 213 p. ORSTOM Cayenne.
- Prost, M.T. (1993) L'environnement côtier actuel de la Guyane et quelques aspects de son analyse par télédétection. Caribena, n°3, 125-158.
- Puech, C. & D. Chabi Gonni (1983) Méthode de calcul des débits de crue décennale pour les petits et moyens bassins-versants en Afrique de l'Ouest et centrale. Publication CIEH, série hydrologie. 43 p + annexes
- Raffy, M. (1994 a) Heterogeneity and change of scale in models of remote sensing. Spatialization of multi-spectral models. Int. J. Remote Sensing, vol 15, n°12, 2359-2380.
- Raffy, M. (1994 b) The role of spatial resolution in quantification problems : spatialization method. Int. J. Remote Sensing, vol 15, no. 12, 2381-2392.
- Raffy, M. (1993) Remotely-sensed quantification of covered areas and spatial resolution. Int. J. Remote Sensing, vol 14, n°1, 135-159.

- Reginato, R.J., Jackson, R.D., and pinter, Jr, P.J. (1985) Evapotranspirationcalculated from remote multispectral and ground station meteorological data. *Remote Sens. Environ.* **18**, 75-89.
- Rey Jeffrey R. (1994) The Area coverage of geophysical fields as a fonction of field-of-view. *Remote Sens. Environ.* 48 : 339-346.
- Rey, A., dir, (1992) Dictionnaire historique de la langue Française, Paris, Le Robert, 2 vol.
- Ribstein P. & J. Rodier (1990) La prédétermination des crues sur des petits bassins sahéliens inférieurs à 10 km². *International Water Ressources*, Urbana (USA) 222-232.
- Riou, C., (1975) Détermination pratique de l'évaporation. Application à l'Afrique Centrale. Coll. mémoires ORSTOM
- Ritchie J.C., Cooper C.M. & F.R. Schiebe, (1990) The relationship of MSS and TM digital data with suspended sediments, chlorophyll, and temperature in Moon Lake, Mississippi. *Remote Sens. of Environ.*, 33 : 137-148.
- Ritchie J.C., Cooper C.M. & J. Yongqing, (1987) Using Landsat MSS data to estimate suspended sediments in Moon lake, Mississippi. *Remote sensing of environment*, 23 : 65-81.
- Roche M. (1963) Hydrologie de surface. Gauthier-Villard éd., Paris.
- Roche M.A. (1982b) Comportements hydrologiques comparés et érosion de l'écosystème forestier Amazonien à Ecerex, en Guyane. Coll. ORSTOM, série Hydrologie, vol. XIX, n°2, 81-114.
- Roche M.A., 1977. Hydrodynamique et risque de pollution dans un estuaire à marée. *Cah. ORSTOM, sér. hydrol.*, vol XIV, n°4.
- Roche, M.A., Dubreuil P. & M. Hoepffner, 1974. Dynamique des eaux, des sels et des sédiments en suspension des estuaires du Mahury et de l'Approuague. ORSTOM Cayenne, 80pp.
- RocheM.A. (1982a) Evapotranspiration de la forêt Amazonienne en Guyane. Coll. ORSTOM série hydrologie, vol. XIX, n°1, pp.37-44.
- Rodier J.A., Auvray C. (1965) Estimation des débits de crue décennale pour des bassins-versants de superficie inférieure à 200 km² en Afrique Occidentale. ORSTOM-Cieh, Paris.
- Rodier, J. - Analyse chimique et physico-chimique de l'eau - Dunod 1966
- Romanov, V.V., (1968) Hydrophysics of bogs, trans from Russian by N. Kaner ed. by Prof. Heimann, Israel. Program for Scientific Translation, Jerusalem. Available from Clearinghouse for federal Scientific and Technical Information, Springfield, Virginia, 299p.
- Rosema A. (1993) Using Meteosat for Operational Evapotranspiration and Biomass monitoring in the Sahel Region. *Remote Sens. Environ.* **46** : 27-44.
- Rossignol M., (1972) Etude d'un marais de la Guyane française : le Marais Sarcelle. Biologie, écologie des crevettes *Penæus aztecus subtilis* (formes juvéniles). Rapport multigr., 39 pp. ORSTOM-Cayenne. Guyane.
- Rossignol, M. (1972) - Etude d'un marais de Guyane. Le marais Sarcelle Mult. ORSTOM - Cayenne, 39 p.
- Rostain S. (1994) L'occupation amérindienne ancienne du littoral de Guyane. Thèse d'Univ. de Paris I Sorbonne. Multi. 721 p.
- Rouch, J. (1948) Traité d'océanographie physique - Les mouvements de la mer - Payot Paris.
- Rouch, J. (1954) - Traité d'océanographie physique - Les mouvements de la mer - Payot Paris.
- Rouzet C., 1995 Méthode d'analyse pour le développement d'un projet SIRS. mult. Cemagref-Engref Laboratoire commun de Télédétection. Montpellier, 42 pp.

- Rudant J. P., Baltzer F., Deroin J.P., Fromard F., Hoff M., Lointier M., Maître H., Marinelli L., Mougin E., Pénicand C., Prost M.T. (1995a) Cartographie générale et thématique en contexte tropical humide à partir des images ERS1 : exemples en Guyane. Proc. of the second ERS Applications Workshop, London, UK, ESA SP-383, 361-368.
- Rudant J. P., Baltzer F., Deroin J.P., Lointier M., Maître H., Mougin E., Pénicand C., Prost M.T. (1996) Apport des images radar satellitales ERS1 et JERS1 dans le domaine de la cartographie générale et thématique en contexte tropical humide. Bul. S.F.P.T. n°42 (1996-2), 15-33.
- Rudant J. P., Baltzer F., Hoff M., Lointier M., Maître H., (1995b) Informations quantitatives et semi-quantitatives de nature géophysique extraites de l'analyse des images ROS satellitales ERS1 et JERS1 et utilisées pour la cartographie thématique en contexte tropical humide. Symp. Extractions de paramètres bio-géophysiques à partir des données RSO pour les applications terrestres. Cnes-IEEE, 221-226.
- Rudant J. P., Lointier M., Prost M.T., Cautru J.P., Deroin J.P., Sabatier D., Girault, Tonon M. (1993). ERS1 SAR data analysis of the French Guiana coastal plain : some thematic aspects. Second ERS1 Symposium. Hamburg. ESA Ed. SP-361, 953-959.
- Rycroft, D.W., D.J.A. Williams, & H.A.E. Ingram, (1975) The transmission of water through peat. I. review, J. Ecol. 63:535-556
- Rykiel, E. J., Jr., (1984) General hydrology and mineral budgets for Okefenokee Swamp : Ecological significance, in *The Okefenokee Swamp : its natural History , Geology and Geochemistry* A. D. Cohen, D. J. Casagrande, M. J. Andrejko, & G. R. Best, Wetlands Surveys, Los Alamos, N. Mex., pp. 212-228.
- Sandholt, I. & H.S. Andersen (1993) Derivation of actual Evapotranspiration in the Senegalese Sahel, using NOAA AVHRR data during the 1987 growing season. Remote Sens. Environ. 46 : 164-172.
- Seguin, B. Assad E., Freteaud J.P., Imbernon J., Kerr Y. & J.P. Lagouarde (1989). Use of meteorological satellites for water balance monitoring in Sahelian regions. Int. J. Remote sensing, vol 10, n° 6, 1101-1117.
- Smith, R. C. , (1975) Hydrogeology of the experimental cypress swamps, in *Cypress Wetlands for Water Management, Recycling and Conservation*. H.T. Odum & K.C. Ewel, eds., Second Annual report to NSF and Rockefeller Foundation, center of Wetlands, University of Florida, Gainesville, pp. 114-138
- Steever, E. Z., R. S. Warren, & W. A. Niering, 1976 Tidal energy subsidy and standing crop production of *Spartina alterniflora*, Estuarine Coast. Mar. Sci. 4 : 473-478.
- Storm, B., 1986 SHE. Système Hydrologique Européen. A short description. Danish Hydraulic Institute, in *Methodology for distinguishing between man's influence and climatic effects on the hydrological cycle*, by Refsgaard, J.C., W.M. Alley & V.S. Vuglinsky. IHP-III Project 6.3, PHI de l'UNESCO, Paris, 1989.
- Sverdrup H.U., Johnson, M.W., Fleming, H. (1942) - *The oceans* Prentice - hall, INC. New-York.
- Tajjar, M. H., (1993) Modélisation de l'hydrodynamique des échanges nappe-rivière : Simulation d'une lâche expérimentale en Seine en période d'étiage. Thèse Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 180 p.
- Tanre, D., C. Deroo, P. Duhaut, M. Herman, J.J. Morcrette, J. Perbos and P.Y. Deschamps (1990). "Description of a computer code to simulate the satellite signal in the solar spectrum: the 5S code." Inter. J. Remote Sensing, 11, 659-668.
- Teal, J.M. (1962) Energy flow in the salt marsh ecosystems of Georgia, Ecology 43 : 614-624.
- Teixeira Filho, J., Rambal, S., Lacaze B., Lointier, M., (1995) Mapping maximal canopy transpiration over a Mediterranean watershed. Colloque "Progress in environmental research and applications". EARSeL, 4-8 sep 95, Bâle, Suisse.

- Todd D.K., (1964) Groundwater, in Handbook of Applied Hydrology, V.T. Chow, ed., McGraw-Hill, New York, pp. 13-1-13-55.
- Troufleau, D (1996) Estimation du flux de chaleur sensible sur couverts épars par télédétection infrarouge thermique et multicapteurs. Thèse de doct., Engref, 101 p. + articles et annexes.
- Turenne, J.F., (1975) Modes d'humidification et différenciation podzolique dans deux toposéquences guyanaises. Thèse doct. Sci., Nancy, et Mém. ORSTOM n°84, Paris, 1977, 173 p.
- Turner, R. K., (1992) Défaillances des politiques dans la gestion des zones humides. Les défaillances du marché et des gouvernements dans la gestion de l'environnement : les zones humides et les forêts, p. 9-47. OCDE éd. Paris, 90 p.
- Ulaby, F.T., Moore R.K., Fung A. K. (1982) *Microwaves Remote Sensing : Active and Passive*, Addison-Wesley, Reading, MA.
- Verger, F. (1994) Un microrelief provoqué par l'alternance dessiccation/humidification : les gilgais. *Revue Sécheresse*, Aupelf-Uref, vol. 5, n°3, 211-217.
- Verry, E.S. & D.H. Boelter, (1979) , Peatland hydrology, *Wetlands fonctions & values: the state of our understanding*, P.E. Greeson, J.R. Clark & J.E. Clark, eds. American Water Resources Assoc., Minneapolis, Minn.
- Vidal A. & A. Perrier (1989), Analysis of a simplified relation for estimating daily evapotranspiration from satellite thermal IR data. *Int. J. Remote Sensing*, vol. 10, n°8, 1327-1337.
- Vidal A. Devaux-Ros C., Moran M.S. (1993) Calibration of Landsat TM thermal band using surface energy balance. *Workshop on Thermal Remote Sensing. Proceedings*. La Londe les Maures, France. Cemagref, Pennstate, CETP, eds.
- Vidal A., Devaux-Ros C. & S. Moran (1994) *Proceedings of the ISPRS 6th International Symposium 'ophysical Measurements and Signatures in Remote Sensing'*. Val d'Isère, France, 17-21 Janvier 1994, pp. 159-166.
- Wharton, C. H., H. T. Odum, K. Ewel, M. Duever, A. Lugo, R. Boyt, J. Bartholomew, E. DeBellevue, S. Brown, & L. Duever, (1976) *Forested wetland of Florida-Their Management and Use*, Center for Wetlands, Univ. of Florida, Gainesville, 421 p.
- Whigham D. F., J. McCormick, R. E. Good, & R.L. Simpson, (1978), *Biomass and primary production in freshwater tidal wetlands : Ecological process and Management Potential*, R.E. Good eds., Academic Press New-York, pp. 3-20.
- Whittaker, R.H., & G.E. Likens, (1973), *Carbon in the biota*, In: Woodwell, G.M. & E.R. Pecan (eds), *Carbon and the Biosphere USAEC Symp. Series n° 30*, Washington, DC pp. 281-300.
- Wicker, K. M., G. C. Castille, D. J. Davis, S. M. Gagliano, D. W. Roberts, D.S. Sabins, & R.A. Weinstein, 1982 *St. Bernard Parish : A study in Wetland Management*, Coastal Environments, Inc., Baton Rouge, La. 132 p.
- Winter, T. C. (1989) *Hydrologic Studies of Wetlands in the Northern Prairie*, in *Northern Prairie Wetlands*, A.G. van der Valk, ed., Iowa State University Press, Ames, Iowa, pp. 16-54.
- Wukelic G.E., Gibbons D.E., Martucci L.M., Foote H.P., (1989) Radiometric calibration of Landsat TM thermal band, *Remote sens. of Environ*, **28**, 339-347.
- Zinn J.A. & C. Copeland, (1982) *Wetland management*, Congressional Research Service, the Library of Congress, Washington D.C. 149 p.
- Zwick, H., de Villiers, J.N., and McColl, W. (1978) *Laboratory evaluation of the prototype MEIS (multi-detector electro-optical imaging scanner)*, Energie, Mines et Ressources Canada, Centre Canadien de Télédétection, Ottawa, Report 78-5, 24 pp.

LISTE DES FIGURES

Liste des figures du Chapitre 1

Fig. 1-1 - Répartition géographique des principales zones humides mondiales (d'après Mitsch, 1994).

Fig. 1-2 - Estimation de l'extension relative des zones humides mondiales (d'après Mitsch & Wu, 1994)

Fig. 1-3 - Analyse de 1384 articles durant la période 1981-1990, dans six revues spécialisées. On notera l'importance du sujet "écologie" (74 %) devant les articles traitant de la gestion des zones humides (2 %). D'après Dugan, 1994.

Fig. 1-4 - Répartition géographique des principales études citées dans la conférence "INTECOL". (d'après Mitsch, 1994).

Fig 1-6 - Mosaïque de données radar ERS1 (résolution 100m) sur le littoral de la Guyane. On distingue à l'est les deux ensembles du Marais de Béhague et du marais de Kaw. Les parties les plus sombres de ces marais permettent de cartographier les parties en eau libre avec peu de végétation couvrante. A partir de la presqu'île de Cayenne, et vers l'ouest, le contact entre le socle et la plaine côtière est net, avec la diminution progressive de la largeur de la zone côtière.

Fig 1-7 - Occurrence des bancs de vase le long du littoral entre 1955 et 1972 (Atlas de la Guyane)

Fig 1-8 - Situation géographique de la plaine côtière Guyanaise : formation des barres pré-littorales (d'après Boulet, 1986).

Fig. 1-9 : Hydro-périodes sur deux bassins-versants côtiers de Guyane :

- Karouabo, en amont de la zone humide (pas d'influence de la marée)
- Passoura, en aval de la zone humide (influence de la marée)
- Soumourou au centre de la zone humide de la Passoura (influence de la marée durant l'étiage de septembre).

nb : les cotes limnigraphiques sont relatives et indépendantes

Fig. 1-10 - Principaux termes du bilan hydrologique.

$$\Delta h = P_n + S_i + G_i - ET - S_o - G_o \pm T$$

Fig 1-11 - Bilans annuels d'un marais "perché" (a) à *Taxodium* (floride, Heimburg, 1984) et d'un marais "alluvial" (b) du sud de l'Illinois (d'après Mitsch, Dorge, & Wiemhoff, 1979).

Fig 1-12 - Modèle distribué à bases physiques d'un bassin-versant (SHE model, modèle hydrologique Européen, d'après Storm, 1986)

Fig 1-13 - Variations journalières millimétriques du plan d'eau près de la zone racinaire. Ces mesures montrent le pompage de l'eau par la végétation durant la journée. Ce processus s'inverse peu après le début du jour (ici vers 4 heures du matin) et en début de nuit.

Fig 1-14 : Syzygies (cycle des marées de 14 jours) et de leurs conséquences hydrodynamiques à l'échelle mensuelle. On observe les variations d'amplitude du cycle lui-même et les trois cas d'inondation d'un marais ouvert à l'océan en fonction de sa position altimétrique.

- 1-Inondation quotidienne du système complet par débordement des chenaux de marée
- 2-Inondation quotidienne des chenaux de marée seulement
- 3-Absence d'eau dans les chenaux

(nb : l'oscillation de base correspond à une marée de 12 heures).

Fig 1-15 - Relation entre la surface des bassins-versants Guyanais et leur débit spécifique. D'après Dubreuil (1964).

Fig 1-16 - Hauteurs et débits en fonction du temps (en heures) au chenal à marée d'Amarante (Marais de Mana, Savane Sarcelle)

Fig 1-17 - Corrélation entre coefficient de marée et volumes mesurés en jusant et en flot au chenal à marée d'Amarante (Marais de Mana, Savane Sarcelle)

Fig 1-18 - Relation entre le volume de jusant et la cote du plan d'eau en fin de jusant au chenal Amarante.

Fig 1-19 - Différents types de relation entre la nappe et la zone humide : (d'après Novitzki ,1979)

- a- niveau piézométrique en équilibre avec le plan d'eau du marais : ni entrées, ni sorties.
- b- niveau piézométrique supérieur à l'amont : flux entrant supérieur au sortant (élévation du niveau du plan d'eau libre)
- c- niveau piézométrique supérieur à l'amont et inférieur à l'aval : entrée et sorties d'eau souterraine quasiment équivalentes (circulation).
- d- niveau piézométrique totalement au dessus du plan d'eau : pas de sorties et stockage dans la zone humide.
- e- niveau piézométrique au dessous du plan d'eau : pas d'entrées, la zone humide est "perchée" et alimente la nappe.
- f- affleurement de la nappe : ni entrées ni sorties identifiables. Les eaux souterraines s'écoulent latéralement sans atteindre la surface du sol.

Fig 1-20 - Contact eau douces eaux marines dans un estuaire.

a) en coupe verticale, effet de "coin salé"

b) en plan, les effets de surface.

(D'après Bellesort et Migniot, 1972, et Lointier, 1984)

Fig 1-21 - Recalage des échelles limnimétriques de deux chenaux à marée distants de 3 km et comparaison avec les nivellements de la vasière et du cordon sableux actuel.

Le nivellement au chenal à marée d'Amarante (Savane Sarcelle) montre le façonnement (par les marées hautes) du cordon de plage et sa "proximité" altimétrique avec les plus hautes mer théoriques de vives eaux (3,84 m). Le niveau de la vasière en arrière du cordon indique qu'elle est submergée pendant 80 % du cycle marin : elle demeure donc exondée 3 jours sur 14, temps durant lequel son exposition à l'air libre peut engendrer certains processus physiques et biochimiques spécifiques (induration, développement d'algues...). Les deux chenaux, distants de 3 km, ont été "nivelés" indirectement par rapport au niveau moyen de la

marée : la pente de la slikke littorale (vases exclusivement) est ici évaluée à 17cm/km de linéaire côtier.

Fig 1-22 - Importance de l'hydrologie sur les propriétés physico-chimiques du substrat et la réponse de l'écosystème biologique. D'après Wicker et al., 1982 ; Gosselink & Turner, 1978.

Fig 1-23 - Réponse biologique de l'écosystème aux effets océaniques : production de *Spartina alterniflora* en fonction de l'amplitude de la marée dans diverses régions du monde. "Mi" concerne des mesures dans les marais du delta du Mississippi (d'après Steever et al., 1976).

Liste des figures du Chapitre 2

Fig 2-1 - Différents processus d'interaction entre le rayonnement solaire et l'eau. Une partie du rayonnement solaire atteignant la surface est réfléchi spéculairement sans être affecté spectralement. Il y a donc une simple diminution d'intensité (1). Une autre partie est réfractée vers le bas (2) et le signal est absorbé (5) et rétrodiffusé (4). (D'après J. Cassanet, 1981 ; in Guyot, 1989).

Fig 2-2 - Variation de l'émissivité de l'eau distillée entre 8 et 14 μm . L'émissivité de l'eau dans l'infrarouge thermique est très élevée. Le domaine des 10-12 μm est donc particulièrement bien adapté à la mesure de la température de surface de l'eau. (D'après Guyot, 1989).

Fig 2-3 - Chlorophylle : Variation du coefficient d'absorption spécifique (en $\text{m}^{-1} \cdot (\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$), en fonction de la longueur d'onde (en nm), pour des algues unicellulaires de 2 à 64 μm de diamètre. On observe deux pic à 430 et 680 nm. Les cellules organiques provoquent une diffusion de la lumière qui varie en fonction inverse de la longueur d'onde (diffusion de Mie). (D'après Guyot, 1989).

Fig 2-4 - Particules non chlorophylliennes : variation du coefficient d'absorption (normalisé par sa valeur à 440 nm) en fonction de la longueur d'onde. Ces particules sont constituées par les sédiments terrigènes remis en suspension dans les estuaires ou lors des apports des rivières aux plans d'eau, après les crues. Leur coefficient d'absorption présente un maximum vers 400 nm (bleu) et un minimum vers 500-600 nm. (D'après Guyot, 1989).

Fig 2-5 : Substance jaune : variation du coefficient d'absorption (normalisé par sa valeur à 440 nm) en fonction de la longueur d'onde. (D'après Guyot, 1989).

Fig 2-6 - Simulation à différentes concentrations de la réflectance de l'eau de mer en fonction de la longueur d'onde.

- A- chlorophylle (phytoplancton)
- B- particules non chlorophylliennes
- C- substance jaune

La réflectance mesurée en milieu naturel dépend d'un mélange de ces trois éléments. (D'après Guyot, 1989).

Fig 2-7 - Relations entre la réflectance et le taux de matières en suspension (MES) sur le Moon Lake (Mississippi) pour les bandes MSS3 (en haut) et MSS4 (en bas) de Landsat . (D'après Ritchie et al., 1990).

Fig 2-8 Guyane : Distribution de la turbidité de surface de l'estuaire de la rivière de Cayenne (à gauche) et du Mahury (à droite), en étiage, 1 heure avant la basse mer (Spot XS du 20 oct. 1986). Pour ces bassins-versants soumis aux effets de la marée, la surface du panache est inversement proportionnelle au débit de la rivière.

Fig 2-9 - Distribution graduelle des masses d'eaux de surface pour un débit du Sinnamary voisin (64 m³/s le 30 octobre 1976 et 80 m³/s le 20 octobre 1986. Il est remarquable de constater la similitude de la distribution des différentes masses d'eau, à dix années d'intervalle avec quelques variations dues aux heures de marée différentes (respectivement 2H avant et 3H après la pleine mer).

Fig 2-10 - Situation des prélèvements d'eau dans l'estuaire du Kourou en simultanéité avec le passage du satellite Landsat MSS du 30 octobre 1976 (D'après Roche, M. A., 1977).

Fig 2-11 -: Site du fleuve Kourou (Guyane). Relation entre les comptes numériques d'une seconde composante d'une ACP et les mesures de turbidité dans l'embouchure (site Guatemala) et la partie amont de l'estuaire (site Saramaka).

Fig 2-12 - Distribution de la turbidité de surface des fleuves Kourou (à gauche) et Sinnamary (à droite). L'étalonnage entre la radiométrie et la turbidité a été réalisé sur le fleuve Kourou, puis appliqué au Sinnamary. Cinq classes ont été définies de 10 mg.l⁻¹ à 10 g.l⁻¹, avec une incertitude de ± 25 %.

Fig 2-13 - Variations d'émissivité de l'eau douce et de l'eau de mer en fonction de la concentration en sédiments. On constate que :

- l'émissivité de l'eau douce est supérieure à celle de l'eau de mer,
 - il y a absence de variations jusqu'à des concentrations en sédiments de 50g/l,
 - la concentration en sel dans l'eau de mer n'affecte pas l'émissivité,
- (D'après Guyot, 1989).

Fig 2-14 - Relation entre les températures de l'eau du Moon Lake (Mississippi) mesurées dans l'eau et les températures estimées à partir des données du canal thermique de Landsat TM (résolution 120 m.). (D'après Ritchie et al., 1990).

Fig 2-15 - Zone de Sinnamary (Guyane). Températures relatives estimées à partir des données du canal thermique de Landsat TM (résolution 120 m.). Les parties les plus froides (violet) se trouvent en rivière, en mer et en forêt. Les plus élevées se situent dans les zones de savanes (jaune). Depuis l'ouverture d'une brèche en rive droite dans la dernière partie de l'estuaire (mars 1987), le mélange des eaux du Sinnamary avec les eaux marines s'effectue par deux systèmes de dispersion.
Echelle 1/150 000.

Fig 2-16 - Relation entre l'humidité volumique d'un sol et la température de brillance pour un sol sableux. Conditions expérimentales : angle d'incidence 0°, longueur d'onde 21 cm, polarisation horizontale, température 310 K (D'après Jackson et Schmugge, 1986).

Fig 2-17 - Relation entre la profondeur d'investigation et l'humidité volumique d'un sol (en g.cm⁻³), à trois fréquences différentes (D'après Ulaby et al., 1982).

Fig 2-18 - Illustration de l'effet de la polarisation, de l'angle d'incidence et de la fréquence sur la profondeur d'investigation (m). (D'après Engman et Gurney, 1991).

Fig 2-19 - Relation obtenue entre le coefficient de rétrodiffusion et le cumul des précipitations (mm). Deux types de couvert végétal ont été testés (prairies et cultures) montrant néanmoins une faible différence du coefficient de rétrodiffusion σ^0 (0,3 db) pour ces deux thèmes. (D'après Fellah et al., 1994).

Fig 2-20 - Inversion du modèle pour le LAI et l'humidité. Comparaison entre les mesures et leurs estimation par inversion. (D'après Prévot et al., 1993).

Fig 2-21 - Zone de la Karouabo (Guyane). Conditions hydro-pluviométriques lors des acquisitions de ERS1 les 17 avril, 3 et 21 mai 1992. La pluie (BEAP) a été mesurée en clairière, à 5 km de la station limnigraphique. La première acquisition se situe juste après une crue, tandis que les deux autres sont dans un contexte de décrue, aux écoulements faibles.

Fig 2-22 - Zone de la Karouabo (Guyane) : Cumul des pluies des 15 jours précédant les acquisitions ERS1. Aux trois dates étudiées, ce cumul de saison des pluies, est compris entre 120 et 180 mm.

Fig 2-23 : Repérage des parcelles test sur la zone Malmanoury-Kourou, analysées sur la donnée brute ERS1 aux trois dates, 17 avril, 3 et 22 mai 92. Sur la donnée radar ERS1 (ci-contre du 7 juin 1992), les données ont été altérées par la présence d'un fort réflecteur, dû aux installations du CSG. Les données Landsat TM4 permettent de situer la zone dans le contexte des bassins-versants et de leurs zones humides associées.

Fig 2-24 - Zone de la Karouabo (12/10/94) : contact mangrove (*Avicennia germinans*) et végétation de cordon littoral (principalement à *Hymenaea Courbaril*).
(cliché M. Lointier)

Fig 2-25: Vue du pripri Dégonde appartenant à la zone côtière entre les bassins de Parakou et Malmanoury. La végétation dominante est en général une Cypéracée (*Eleocharis mutata*).
(cliché M. Lointier)

Fig 2-26 - site n° 9 (18/07/95) : pripri Vogel. Eau libre couverte d'une densité importante de joncs . En arrière plan, la mangrove de front de mer.
(cliché M. Lointier)

Fig 2-27 - site n ° 11 (18/07/95) pripri Vogel. En premier plan, savane exondée. En second plan le marais et au fond la mangrove de front de mer.
(cliché M. Lointier)

Fig 2-28 - Site n° 12 (saison sèche, 08/10/94). Marais d'eau douce situé au nord de la savane Diane, sur la haute plaine côtière.
(cliché M. Lointier)

Fig 2-29 - Site n° 15 : Savane de la haute plaine côtière en saison sèche (11/10/94).
(cliché M. Lointier)

Fig 2-30 - Savane Diane : recouvrement du sol par la végétation pyrophyte, en saison sèche (08/10/94). Les interprétations des images radar doivent tenir compte de ces différents taux de recouvrement où le pourcentage de sol nu peut devenir important (b).

a) avant passage du feu.

b) après passage de feu

(cliché M. Lointier)

Fig 2-31 - Données ERS1 du 22 mai 1992 sur la zone de la Karouabo.

En haut du cliché, la mer, en sombre, les bancs de vase côtiers et la mangrove avec ses chenaux à marée (gris clair).

En arrière du cordon bordant la mangrove, les marais d'eau libre (sombre), les zones de savanes humides (gris clair). La partie rectiligne en bas du cliché correspond à une coupe sèche en forêt, de 50 mètres de large pour la ligne haute tension EDF allant vers le barrage de Petit Saut.

Fig 2-32 - Les données ERS1 du 3 mai ont été calibrées selon les informations fournies par Laur (1992). Pour la partie terrestre qui nous intéresse, les données calibrées ont été comparées sur les sites test de la Karouabo, aux données non calibrées. Il ressort de très faibles écarts de rétrodiffusion par rapport aux données brutes (10 %) et celles-ci seront donc utilisées telles quelles dans les traitements.

Fig 2-33 - Zone de la Karouabo (Guyane) : Profils thématiques aux trois dates d'acquisition de ERS1. Le thème forêt (n°17) a été choisi comme référence pour sa stabilité permettant une comparaison relative de l'évolution des autres thèmes : la mangrove, le marais 11 et les savanes 12 et 13 sont stables dans le temps. Les changements importants qui peuvent s'interpréter en termes de variation d'humidité concernent les savanes 14 et 15.

Fig 2-34 - L'importance des échanges énergétiques est fonction de l'énergie disponible (Rn-G) au niveau des surfaces. La répartition de cette quantité d'énergie en chaleur latente (évaporation) et en chaleur sensible dépend principalement de l'état de développement des couverts végétaux et de la disponibilité de l'eau dans le sol.

En région sahélienne et dans l'objectif de régionalisation des valeurs d'évapotranspiration, il est introduit le concept de couche limite de surface sahélienne (D'après Monteny et al., 1994).

Fig 2-35 - Spatialisation de l'évaporation : cartes de l'évapotranspiration maximale mensuelle calculée à partir de données Landsat TM et de données exogènes sur le bassin de la Peyne (Hérault, France) en août 93 et janvier 94 (D'après Texeira et al. 1996).

Fig 2-36 - Problème soulevé par l'introduction d'une température de surface mesurée par satellite dans les modèles uni-couche de détermination du flux de chaleur sensible (H). (D'après Troufleau, 1996).

Fig 2-37 - Trois expressions de la fonction de densité de probabilité Beta pour un subpixel à couverture fractionnée à 0,2 (D'après Rey Jeffrey, 1994).

Var : variance S : paramètre de forme.

Fig 2-38 : Effet de la résolution spatiale sur les mêmes objets au sol. Pour une dimension de pixel variant de h à h/4, à seuillage identique, on estime la surface du thème à 36 % pour la faible résolution, et à 11% pour la plus élevée (D'après Raffy, 1993).

Fig 2-39 - Mesure de terrain et mesure spatialisée (D'après Raffy, 1994).

Fig 2-40 - Enveloppes convexes et domaines de validité des modèles (D'après Raffy, 1994)

Fig 2-41 - Schéma général de liaison thématique - télédétection. Il est mis en avant l'idée de "la dépendance des phases" (ici de 1 à 5) et que l'on ne peut définir toutes les étapes d'une spatialisation de façon indépendante (D'après Puech, 1995).

Liste des figures du chapitre 3

3-1 Relations fonctionnelles globales dans une zone humide : organisation des liens entre les processus physiques (étudiés par les scientifiques) et des objectifs de gestion (qualité et alimentation en eau...). D'après Maltby et al., 1994.

3-2 Relations nécessaires à la préparation des analyses, à la gestion des conflits d'usage, à la reconnaissance des compatibilités et au choix d'un consensus (d'après IUCN, 1994).

3-3 Schéma des relations de la communauté d'acteurs impliquée dans le processus de décision.

3-4 Délimitation des unités fonctionnelles du littoral de Guyane en zone non anthropisée.

3-5 Représentation schématique, sur deux axes possédant un indicateur chacun, de la notion d'enveloppe et de capacité de charge de l'écosystème.

3-6 Un critère de classification des zones de mangrove est de considérer le niveau d'énergie hydrodynamique qu'elles subissent (d'après Wharton et al., 1976; Lugo, 1980 ; Cintron et al., 1985).

3-7 Evaluation du fonctionnement environnemental des zones humides. Deux indicateurs génériques sont utilisés pour isoler des entité fonctionnelles globales : la pente de la surface piézométrique dont dépend l'apparition de l'eau dans la zone humide et le niveau de la nappe d'eau libre. Ces éléments conditionnent différents types de sols, en fonction des régimes hydrologiques (crues, étiages), qui eux mêmes induisent des types de végétation spécifiques des milieux.

3-8 Guyane zone de Kourou, site de "Diane" : Utilisation de la donnée SPOT panchromatique du 28 oct. 1993 sur la haute plaine côtière, pour examiner le réseau de circulation de bas-fond par rapport aux réalités de terrain.

3-9 Guyane, zone de Kourou, site de "Diamant" : Utilisation de la donnée SPOT panchromatique du 28 oct. 1993 pour comprendre le sens de circulation des eaux dans la basse plaine côtière en regard des observations de terrain.

3-10 Guyane, zone de Kourou, site aval de la Karouabo. Le filtrage spécifique comme GGMAP visant à réduire le speckle, présente des avantages pour réaliser des classifications sur les données radar, mettant en évidence les structures morphologiques du paysage : les alignements des anciens cordons sableux sont nettement visibles.

3-11 Guyane, zone de Kourou, site aval de la Karouabo. Première composante d'une ACP sur trois dates, préalablement filtrées par GGMAP. Ces traitements permettent une très bonne cartographie des plans d'eau du littoral.

3-12 Guyane. Cartographie sur tout le linéaire côtier du degré d'échange avec l'océan à l'aide des informations du radar ERS1. On constate globalement que 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 % du linéaire côtier).

3-13 Guyane, zone de Kourou, site aval de la Karouabo. Synthèse de données multitemporelles ERS1 : cartographie locale sur l'aval de la Karouabo contenant une information de type dynamique et spatialisé. On obtient ainsi une "légende" comportant un terme temporel : stockage permanent, saisonnier, mensuel et à l'échelle de la crue.

3-14 Zone humide ouverte à la mer

3-15 Zone humide avec échanges océaniques très réduits

3-16 Zone humide en relation avec un estuaire

3-17 Modélisation du volume d'un marais à drain unique Le schéma général proposé comporte un calcul des apports (positifs ou négatifs) qui permet d'évaluer le volume d'eau contenu dans le marais, ainsi que sa profondeur.

3-18 Réalité de terrain : l'estimation des volumes d'eau des marais est rendue difficile par une détermination incertaine de la profondeur. La végétation développe une zone racinaire dont la densité permet le déplacement à pied, sous une tranche d'eau de 50 cm environ, puis en dessous, sur plus de deux mètres, on rencontre une zone de mélange progressif d'eau et de vase.

3-19 Diagramme causal et des utilisations de la variable "volume".

3-20 Courbes de traduction volume - hauteur et hauteur - surface.

3-21 Simulation n°1 : Profondeur du marais à drain unique, récepteur des crues du bassin-versant et avec sorties océaniques exclusivement (marais aval de la Karouabo).

3-22 Simulation n°1 : Volume du marais et entrées (apports du bassin-versant) sorties (vers l'océan).

3-23 Simulation n°2 : Profondeur d'un marais à drain unique, récepteur des crues du bassin-versant et avec entrées/sorties océaniques correspondant à un marais proche de l'océan (marais de Mana tel qu'il a été observé en 1985).

3-24 Simulation n°2 : Volume du marais et flux calculés.

3-25 Simulation n°3 : Profondeur d'un marais à drain unique, récepteur des crues du bassin-versant avec entrées/sorties océaniques déclenchées par rapport à un seuil sur le volume (marais de la Passoura).

3-26 Simulation n°3 : Volume du marais à drain unique et entrées/sorties océaniques déclenchées par rapport à un seuil sur le volume (marais de la Passoura).

3-27 Utilisation de la donnée satellitale et spatialisation de l'information thématique en hydrologie, dans la recherche d'une vulnérabilité intrinsèque des hydrosystèmes.

3-28 Démarche vers la notion de carte prévisionnelle d'impact sur l'environnement

CARTES

CARTE 1 - Information de type "biophysique : classification non dirigée sur les données Landsat TM, à partir d'une ACP des 6 bandes, puis conversion RVB-ITS.

CARTE 2 - Cartographie des différentes températures relatives sur la zone de la Karouabo. La température spatialisée dans ces conditions peut être un critère supplémentaire pour enrichir les classifications des zones humides.

CARTE 3 - Données JERS1 : Cartographie du réseau de drainage en zones de savanes (en bleu) réalisée à partir des informations des cartes IGN au 1/25 000e, des données SPOT et du Landsat TM pour l'identification des zones de bas-fonds. Les données JERS1 complètent la structure du réseau (direction, sens).

CARTE 4 - Esquisse hydrologique fonctionnelle spatialisée. Un document de synthèse a été réalisé sur la base des observations de terrain (hydrologie, hydrochimie, pédologie), des synthèses hydrologiques et des travaux sur les données Landsat TM, croisées avec les données multitemporelles radar. L'intérêt de ce document est de présenter une situation actualisée et géolocalisée des fonctions des systèmes hydrologiques de la plaine côtière.

CARTE 5 - Carte prévisionnelle de vulnérabilité intrinsèque des formations naturelles (d'après Huynh et al., 1996)

Hydrologie des zones humides tropicales

**Apport de l'information spatialisée
aux problèmes de gestion intégrée**

Applications en Guyane

Marc LOINTIER

A N N E X E S

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1	Historique des études sur les zones humides
Annexe 2	Terminologie anglaise
Annexe 3	Botanique de la plaine côtière de Guyane
Annexe 4	Mesures de terrain et méthodes en hydrologie
Annexe 5	Liste des zones humides de Guyane
Annexe 6	Hydrologie de la savane Sarcelle
Annexe 7	Hydrologie et hydrodynamique de l'estuaire du Sinnamary
Annexe 8	Hydrologie des bassins-versants de la Karouabo et de la Passoura
Annexe 9	Indications sur le ROS (Radar à Synthèse d'Ouverture)
Annexe 10	Classification de Cowardin
Annexe 11	Modélisation de la relation pluie/débit sur le bassin de la Karouabo

ANNEXE 1

Historique sur l'étude scientifique des zones humides

1. Sagesse des Anciens (Boulé, 1994)

On ne peut évoquer l'histoire de ces milieux sans l'associer fortement aux populations qui y vivent ou qui y vivaient. Avec un trait d'humour, Marshall Claggett (1955) imagine à ce propos que "l'Homme était un naturaliste, bien avant d'être un fermier, un architecte ou un politicien".

Les Sumériens étaient des fermiers, des architectes et des politiciens qui connaissaient aussi les noms des plantes et des animaux des marécages du Tigre et de l'Euphrate.

La connaissance hydrologique des régimes, des variations régionales et saisonnières, la description des zones d'inondation ont toujours été cruciales pour les civilisations antiques. Théophraste établissait une description de la végétation en relation avec l'hydrologie. L'ingénieur romain Vitruvius a recherché comment utiliser l'eau, si disponible, selon lui, dans les zones humides.

La civilisation ancienne de Chine (environ 500 ans avant Plin l'ancien) a produit des travaux très pertinents en géobotanique (à des fins de perception de taxes !), en réalisant une classification prenant en compte le relief et les caractéristiques des sols dans la vallée de la Wei. Selon Needham et al. (1986), ce travail montre des types de sol qui sont bien en relation avec un certain type de végétation, et également avec la profondeur de la nappe.

Considérées en Europe comme des lieux malsains, les zones humides ont cessé ensuite d'intéresser les Hommes pendant de nombreux siècles, jusqu'à la Renaissance où l'on commence l'aménagement des polders en Hollande et des marais Pontins en Italie.

2. A l'aube de la recherche sur les zones humides

L'origine des recherches remonte à 1729, avec un ouvrage sur les tourbières d'Irlande ("Dissertatio Physica de Turfis"), dans lequel H.J. Degner s'oppose à l'idée généralement admise que les zones humides proviennent d'une dégradation de zones forestières. Rapporté par Clements (1928), Degner signale avec bon sens que si les zones humides provenaient d'une dégradation de forêts, celles observées encore dans le monde n'existeraient plus.

Au XVIII^{ème} siècle, plusieurs scientifiques poursuivent leurs travaux sur les origines et les aménagements des zones humides : I. Biberg (1749), J. Anderson (1794) et W. Aiton (1805) posent l'hypothèse d'une origine par accumulation de la matière végétale ou animale transformée par des processus physico-chimiques.

Au début du XIX^{ème} siècle, c'est le Révérent Robert Rennie (1810) qui relance le débat avec un ouvrage intitulé "*Essays on the natural History and Origin of Peat Moss*", suivi par un fermier de Virginie, Edmund Ruffin, éditeur du "*Farmer's Register*" en 1837. L'idée est maintenant admise que l'origine ces zones humides est liée à la décomposition de nombreuses plantes en milieu aquatique. Ruffin va également plus loin en proposant l'aménagement des zones humides à des fins agricoles et surtout un maintien des pH à un niveau très bas, par l'épandage de chaux. Ce travail serait réservé aux esclaves noirs. Ruffin mit fin à ses jours lorsque la Guerre de Sécession se termina, mais il demeura un pionnier dans la réflexion scientifique de l'époque sur les zones humides.

3. Les investigations du XIX^{ème} siècle

L'étude des zones humides prit plus d'importance dans la seconde moitié du XIX^{ème} siècle, avec les travaux des naturalistes (A. Wilson, J.J. Audubon, ornithologues) et des explorateurs mandatés par le Gouvernement américain, comme le botaniste J.D. Hooker. Mais c'est surtout avec la création, par George Washington, de l'*U.S. Army Corps of Engineers* que celui-ci s'est investi dans l'aménagement des zones humides, après l'édification des *Swamplands Acts* en 1849. Charles Ellet (1853), ingénieur du Corps, responsable de l'aménagement pour l'agriculture de la vallée du Mississippi, proposa l'édification de digues pour éviter l'inondation des terres basses et des zones humides, et pour les rendre ainsi cultivables (cette politique d'aménagement, qui a été poursuivie pendant un siècle, a posé des problèmes sérieux à l'amont et l'aval, et surtout en 1993, engendrant des crues dévastatrices, par la disparition des zones de stockage des eaux).

A la création de l'*U.S. Geological Survey* (USGS), dont la mission était d'identifier les ressources minérales du pays, la tourbe des zones humides fut reconnue comme une ressource minérale : il en résulta une investigation scientifique vers les années 1880. N.S. Shaler étudia les origines de ce matériau dans l'environnement d'eau douce et d'eau saumâtre. Il proposa également à cette époque une première classification des zones humides, basée sur des critères botaniques et de physique des sols. Il évoque l'importance des phénomènes de subsidence dans l'origine des marais côtiers.

4. Subsidence et transgression

La progression des connaissances en géologie, notamment sur l'observation des modifications des lignes de rivage et des variations du niveau marin, provoque des controverses nombreuses chez les scientifiques quant à l'interprétation de leurs observations : certains milieux, étudiés notamment par le géologue Sir Charles Lyell (1845), à l'embouchure de la rivière Cooper en Caroline du sud, montrent un dépérissement de la végétation et une nette invasion des eaux marines. Y a-t-il montée des eaux ou subsidence du marais, ou les deux ? De nombreux auteurs voient des preuves de subsidence, mais il se pose un problème de datation du phénomène : ancien ou actuel ?

Une plus grande répartition géographique des études et, en même temps, l'amélioration des connaissances en sédimentologie mènent des auteurs comme N.S. Shaler (1885) à la conviction que la subsidence, ou l'élévation du niveau marin, est un phénomène global sur toute la côte Atlantique. Il conclut aussi que la pérennité naturelle des marais saumâtres côtiers s'effectue dans des zones abritées. F. Eaton (1893) et W.F. Ganong (1901), en étudiant l'originale baie de Fundy, aux fortes amplitudes de marée, sont convaincus qu'un phénomène de subsidence est permanent, entraînant une sédimentation continue. T. Kearney (1900), botaniste au *U.S. Department of Agriculture*, étudiant les milieux halophytes, voit aussi un phénomène général sur les côtes de l'Atlantique, qu'il attribue à la subsidence. Certains sites montrent également l'invasion récente des marais d'eau douce par la mer, à la suite d'une érosion du rivage. Cette observation est faite par D.P. Penhallow (1907) qui l'interprète comme une élévation du niveau marin. H. Bartlett (1909), favorable à l'hypothèse d'une subsidence, affronte alors dans une polémique W. Johnson (1910), géologue, défendant l'hypothèse d'une élévation du niveau marin. Cette confrontation d'idées a le mérite de pousser chacun dans le développement d'un argumentaire scientifique précis, basé sur l'observation de terrain, et de faire progresser la connaissance des zones humides.

Parallèlement aux débats des géologues et dans le droit fil des théories de Charles Darwin, les botanistes comme J.D. Hooker font un inventaire des distributions géographiques des plantes vivants dans des milieux identiques, tout en décrivant leur environnement physique et hydrologique. Les idées originales de Darwin supposent en effet que les espèces observées sont le résultat d'une "réponse" à un environnement physique spécifique. En même temps, si la théorie était exacte, la description de ces espèces permettrait de caractériser ces milieux. Cette démarche est reprise par le professeur E. Warming, de l'Université de Copenhague, qui est le premier à distinguer les démarches de phytogéographes classiques, de type *floristic plant geography*, d'une autre approche où l'on voit apparaître pour la première fois le terme d'écologie (*Oecological of Plants*, 1909),

faisant ainsi référence au milieu environnant, au sens large. Les travaux de A. von Kerner et A.F.W. Schimper, botanistes germaniques, montrent l'importance de la qualité de l'eau et des différents degrés de salure dans la répartition de certaines espèces végétales. Le travail de ces "écologistes" a été de construire une théorie de base essayant de décrire les effets de la salinité, de la pluviométrie, du régime hydrologique et de l'évaporation sur la morphologie des plantes inféodées aux milieux humides.

5. En Europe

Pendant une longue période et jusqu'au XIX^{ème} siècle, les marais et toutes les zones humides sont des milieux à très mauvaise réputation. Outre les légendes entretenues par la présence de "feux follets" (combustion spontanée du méthane), l'air avait la réputation de "porter le mal" (Romi, 1992), d'où le terme "mala aria" en Italien. Le terme "paludisme" est employé ensuite à partir de 1869 (Rey, 1992) et dérive du mot français "palud" qui désigne le marais. Ces fièvres étaient endémiques des régions humides (le Forez, la Bresse, la Dombes), mais aussi de certains fleuves (le Rhône, l'Arve, l'Isère, le Rhin en Alsace) et des marais côtiers du Languedoc et de Toscane. Ce n'est qu'à la fin du XIX^{ème} siècle que l'on identifie le réel vecteur de la maladie, dont la dernière expression fut, semble-t-il, en Corse en 1945 (Rapport d'évaluation sur les zones humides, Commissariat général au plan, 1994).

La salubrité publique pesa donc très lourd dans la destruction des zones humides et leur reconversion, économiquement profitable, en terres cultivables.

6. En milieu tropical

Les zones humides tropicales ont été très peu étudiées dans le passé et les premières données collectées concernent les zones côtières à mangrove, abordées en premier lieu par les navigateurs.

Cormier-Salem (1994) et Rollet (1981) recensent seulement 14 références traitant de la mangrove avant l'année 1600, 7 au XVI^{ème} siècle, puis 470 au total pour le XIX^{ème} siècle. La perception de ce milieu par les premiers Européens (la plupart navigateurs) est très négative et va à l'encontre du développement des connaissances. Les mangroves d'Afrique de l'ouest par exemple, sont considérées comme le "tombeau de l'homme blanc" (*White man's grave*) du fait de ses difficultés d'accès, mais surtout du paludisme qui s'y trouve. Comme le souligne Cormier-Salem, ces milieux sont des voies de communication pour les populations qui y vivent et qui en exploitent les ressources, tandis que les idées des Européens se focaliseront sur la notion d'insalubrité, qui peut être éliminée par un aménagement.

Il est vrai que l'Afrique est un immense foyer de paludisme (Mouchet et Carneval, 1988), mais Mouchet (199x) montre que la mangrove est un milieu un peu plus sain que l'arrière-pays et que le paludisme se développe dans la mangrove à la suite d'aménagements.

A partir du XVIII^{ème} siècle, Linné et Lamarck contribuent aux classifications et aux zonations par espèces végétales, puis on retrouve les travaux des chercheurs allemands du XIX^{ème} siècle axés sur la morphologie, la physiologie et la taxonomie des plantes.

ANNEXE 2

Liste de quelques termes anglais désignant les zones humides

<i>Bog</i>	Marécage stagnant à accumulation de tourbe
<i>Bottomland</i>	Plaine alluviale où le lit majeur est inondé temporairement et recouvert de forêt (sud des Etats-Unis)
<i>Brackish marsh</i>	Marais saumâtre
<i>Carr</i>	Forêt inondée à aulne (alder) et saule (willow) - Terme européen
<i>Fen</i>	Marécage à bonne circulation des eaux et à accumulation de tourbe
<i>Lagoon</i>	Lagune, lagon
<i>Marsh</i>	Marécage, zone inondée en quasi-permanence et recouverte de végétation herbacée adaptée aux sols saturés en eau
<i>Mire</i>	Terme générique pour les zones humides qui n'accumulent pas de matière organique en décomposition
<i>Moor</i>	Synonyme de <i>peatland</i>
<i>Muskeg</i>	Grandes étendues de marais à accumulation de matière organique (terme utilisé au Canada et en Alaska)
<i>Peatland</i>	Terme générique pour les zones humides qui accumulent de la matière organique en décomposition
<i>Playa</i>	En région aride ou semi-aride, zone humide à saison sèche et humide marquée. Terme du sud-ouest des EU pour désigner des bas-fonds inondés comme les "potholes", mais de substrat géologique différent
<i>Pothole</i>	Bas-fond inondé rencontré le plus souvent dans le Dakota
<i>Reedswamp</i>	Marécage à roseau (terme utilisé en Europe de l'est)
<i>Riparian system</i>	Système à haut niveau de la nappe phréatique dû à la proximité d'un plan d'eau ou d'une rivière (par exemple, les forêts inondées dans les lits majeurs de rivières)
<i>Salt marsh</i>	Prairie halophyte bordant des plans d'eau saumâtres
<i>Shallow</i>	Bas-fond
<i>Slough</i>	Système de lacs de bas-fond du nord et du centre-ouest des Etats-Unis
<i>Swamp</i>	Zone humide à végétation arbustive dominante
<i>Tidal fresh water marsh</i>	Marécage d'eau douce soumis aux amplitudes de la marée
<i>Vernal pool</i>	Bas-fond inondé temporairement, en région méditerranéenne, avec une saison sèche marquée
<i>Wet meadow</i>	Prairie hydromorphe avec apparition rare d'eau libre
<i>Wet prairie</i>	Plaine herbeuse avec apparition fréquente d'eau libre la transformant en marécage temporaire

ANNEXE 3

Botanique de la plaine côtière de Guyane

(sources : Prost, 1993 et Atlas des DOM, la Guyane)

I - Les mangroves

1. Zone intertidale (mudflats)

La colonisation des vases crémeuses intertidales par la mangrove est précédée ou accompagnée par une graminée, *Spartina brasiliensis*. La mangrove pionnière est formée par la *Laguncularia racemosa*, espèce supplantée ensuite par l'*Avicennia nitida* (ou *Avicennia germinans*).

Vers l'intérieur des terres (ou parfois en bord de mer, dans les zones d'érosion) la haute mangrove (arbres de 20 à 35 m) se trouve en déclin sur un substratum de vase plus consolidée et, très souvent, hypersalée en profondeur (de l'ordre de 1,50 m).

La mangrove pionnière est formée par la *Laguncularia racemosa*, espèce supplantée ensuite par l'*Avicennia nitida* (= *Avicennia germinans*).

2) La mangrove ripicole

Elle se développe - comme son nom l'indique - à l'intérieur des estuaires. L'espèce dominante est le *Rhizophora mangle*.

Vers l'amont, des *Avicennia* adultes sont en déclin, chargés d'Aracées et encombrés par les branches de *Dalbergia monetaria*. Simultanément, les populations de *Laguncularia racemosa* diminuent et disparaissent. Enfin, il y a passage à la forêt hydromorphe de berge au milieu de laquelle apparaissent des *Rhizophora mangle* et (encore) quelques *Avicennia*.

Dans l'ensemble, les *Avicennia* dominent les zones de front de mer, et les *Rhizophora* les estuaires.

II - Cordon de plage

Sur le cordon sableux de plage s'implantent des plantes rampantes : *Ipomoea pes caprae* ("salsa de praia" au Brésil), *Vigna luteola*, *Canavalia maritima* ("haricot plage" en Guyane), *Remire maritima* (en touffes, Cypéacée).

Dans l'arrière-cordon (revers) apparaissent le *Sesuvium portulacastrum*, *Iresine vermicularis*, *Mariscus ligularis* (en touffes de 1,5 m de hauteur), *Mollugo verticillata*, etc.

III - Marais d'arrière-mangrove

La transition vers le marais saumâtre est marquée par des touffes d'*Avicennia* au milieu des herbacées et des cypéacées, comme *Fimbristylis spatacea*, *Torulium ferax*, *Funastrum clausum*, *Iresine vermicularis*, passant ensuite à des *Sporobolus virginicus* (lisière des marais), *Paspalum*

vaginatus (plus vers l'intérieur des terres) et *Scirpus maritimus* (Cypéacée de 1,5 m de hauteur, inflorescences brunes). *Paspalum* et *Sporobolus* ne supportent pas les hautes salinités mais s'adaptent à des eaux saumâtres peu acides. Plus les herbacées dominent, plus les *Avicennia* se raréfient.

Les marais saumâtres à joncs (*Eleocharis mutata*), dans des eaux peu acides, sont denses, vert sombre, les plantes atteignant entre 0,60 et 1,50 m de hauteur. Dans ce milieu disparaissent *Sporobolus* v., *Paspalum* v. et *Scirpus maritimus*.

Sont associés à ce milieu : *Jussieua leptocarpa* (petits buissons à inflorescences jaunes), *Jacquemontia violacea* (sur les tiges des joncs), *Hydrocotyle umbellata* et des touffes d'*Achrosticum aureum* (fougère géante des marais). Dans l'eau libre on trouve *Nymphoea ampla*, *Azola caroliniana*, *Lemna minor*.

Le passage aux marais d'eau douce est souvent marqué par l'apparition de *Chrysobalanus icaco* ("prunier savane"), *Eleocharis interstincta*, *Montrichardia arborescens* ("moucou-moucou"). Dans les espaces d'eau libre apparaissent alors *Leersia hexandra*, *Eicchornia crassipes* ("jacinthe d'eau"), *Salvinia auriculata* ("lentille d'eau").

IV - Les cheniers (barres sableuses)

Avec une largeur variable (de quelques mètres à ± 250 m) et une hauteur d'environ 1,5 à 3 m au-dessus du niveau marin IGN (niveau moyen de la mer), les cheniers de Guyane sont formés par des sables quartzeux d'apport local.

La végétation des cheniers est formée par une association de plantes dans laquelle se distinguent des palmiers comme *Mauritia flexuosa* (palmier bêche, "buriti", "mauritia") et *Astrocaryum vulgare* (palmier awara).

ANNEXE 4

Types de mesures hydroclimatologiques

CLIMATOLOGIE

1) Précipitations (mm)

Méthodes de mesure :

- pluviomètre,
- pluviographe,
- radar météorologique (décrivant le champ de pluie),
- estimation par télédétection en milieu tropical (corrélation avec l'occurrence des nuages à sommet froid).

2) Evapotranspiration (mm)

Méthodes :

- calcul par formules empiriques de l'évapotranspiration potentielle Turc, Thornthwaite, Penman (utilisation des données climatologiques).

Eléments complémentaires pour spatialisation :

- température de surface (infrarouge thermique),
- modèle de Penman-Monteith : introduction du LAI (Leaf Area Index, en m² de feuilles par m² de terrain), dans la formule de Penman.

HYDROLOGIE

1) Hydrologie de surface

a) Bassins-versants côtiers (milieu continental)

- hauteur d'eau (m),
- débit (m³.s⁻¹).

Bilan : lame écoulée (mm) et, connaissant la pluviométrie, déficit d'écoulement (mm).

b) Marais, zones humides en général, hors influence de la marée

- hauteur d'eau, hydropériode (dh/dT),
- surface des zones d'eau libre (variations temporelles et spatiales par télédétection),
- volume par utilisation d'un MNT et de l'information de surface,
- débits entrant/sortant du système ; quand mesurables, on en déduit le temps de renouvellement ($t^{-1} = Q/V$) et temps de résidence ($t = V/Q$).

c) Marais, zones humides en général, sous influence de la marée

c.1) cuvettes, stockage d'eau :

- hauteur d'eau,
- débits entrant/sortant du système.

Bilan : par modélisation de l'hydrodynamique et la connaissance de la pluviométrie ;

c.2) drains, chenaux de marée, estuaires :

- hauteur d'eau,
- pente de la ligne d'eau ($m.m^{-1}$),
- débit oscillant,
- dérive résultante ($m.s^{-1}$),
- volume oscillant ($m^3.s^{-1}$).

HYDROCHIMIE

Critères de qualité physico-chimique des eaux

Paramètres à mesurer (éléments naturels, anthropiques) :

- matières en solution (silice, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-),
- matières en suspension (MES),
- pH, oxygène dissous, température.

a) Apports extérieurs

- par les eaux continentales (éléments naturels, anthropiques),
- par l'océan (éléments naturels, anthropiques).

b) Transformations dans le milieu

- dilution,
- concentration (ex : sursalure),
- précipitation des éléments.

c) Exportation

- vers d'autres zones humides,
- vers l'océan.

Nota - Paramètres accessibles par télédétection :

- température de surface spatialisée,
- répartition de surface des MES dans les plans d'eau.

Mesures hydrologiques en estuaire et chenaux à marée

La description des caractéristiques hydrodynamiques et physico-chimiques en estuaire associe le domaine spatial (variation des paramètres le long de l'estuaire) au domaine temporel à variation rapide (variation des paramètres dans le temps en un point). Il est indispensable de trouver des méthodes de travail sur le terrain qui soient économiques et optimisées par rapport au résultat souhaité.

Deux méthodes ont été utilisées en Guyane : l'une pourrait être qualifiée de "statique", l'autre de "dynamique".

La méthode statique consiste à mesurer une section pendant une partie du cycle de la marée ou sa totalité. Cette méthode a l'inconvénient de privilégier la qualité de la mesure sur une section, au détriment de sa représentativité spatiale : en effet, dès que le nombre de sections augmente, il est nécessaire de procéder aux mesures sur plusieurs cycles de marées différents, aux coefficients de marées légèrement différents (cycle des syzygies).

La seconde, dynamique, consiste à réaliser la mesure sur une section, en suivant l'onde de pleine mer et l'onde de basse mer le long de l'estuaire (son déplacement est de quelques kilomètres/heure). Cette méthode est appropriée pour bien quantifier le maxima, le minima et la dynamique générale, mais ne renseigne pas sur les processus intermédiaires.

1. Paramètres hydrologiques enregistrés

- Hauteur

En dehors de toute influence océanique, on choisit une section de mesure de référence qui permettra la connaissance des débits propres et l'évaluation des récurrences si l'on possède une série chronologique des débits (station appartenant au réseau hydrologique).

Dans la partie sous influence océanique, on retient les sections de mesure, équipées d'un limnigraphe et d'une échelle. En dehors des zones d'estuaire bordées de mangrove, une borne de calage de l'échelle doit être posée, afin de procéder au nivellement, permettant un recalage en cas d'étude ultérieure.

- Vitesse

* Méthode "statique"

La vitesse est mesurée aux sections choisies, au moulinet hydrométrique, toutes les heures par exemple, pendant un cycle complet de marée (12 h). La variation des coefficients de marée entre le matin et le soir peut justifier, dans certains cas, des mesures pendant deux cycles (24 h). La méthode de dépouillement des vitesses utilisera, pour une section donnée, la méthode dite "des verticales indépendantes" (Roche, 1963 ; Aldéghéri, 1984).

* Méthode "dynamique"

Trois à cinq verticales et trois points de mesure de vitesse (surface, milieu et fond) sont suffisants pour décrire le champ des vitesses, le principe de base étant de réaliser une mesure sur une verticale, sans variation importante du plan d'eau.

Pour des études complémentaires, le moulinet à génératrice muni d'un enregistreur donnera, en continu, une information ponctuelle sur l'évolution des vitesses dans le temps.

- Prélèvements

La mise en place du dispositif hydrométrique permet de réaliser des prélèvements d'eau par pompage au droit du moulinet, au moment de la mesure de vitesse. On réalise ainsi des prélèvements de 100 cm³, destinés à la détermination de la conductivité et de la teneur en suspension. Un échantillon d'eau de plus grande quantité (2 litres) est prélevé au milieu du fleuve, en surface ou à mi-profondeur, pour des analyse chimiques complètes.

2. Dispositions concernant les dates de mesures

L'évolution des paramètres physico-chimiques est conditionnée principalement par deux facteurs : le débit et le coefficient de marée. Selon le type d'étude, on choisira une ou plusieurs des quatre combinaisons de base, avec tous les intermédiaires en cas de besoin :

Coefficient de marée / débit fluvial	Vives eaux	Mortes eaux
crue	1	2
étiage	3	4

ANNEXE 5

Liste des zones humides de Guyane

Marais Béhague

- crique Vieille
- crique aux Biches
- rivière Ouanary

Marais de Kaw

- rivière de Kaw
- crique Angélique, savane Angélique

Estuaire de l'Approuague

- rivière Kourourai

Estuaire du Mahury

A l'ouest de Cayenne, marais permanents :

- en contact avec l'océan
- sans relation avec l'océan

Zone de Cayenne

- marais Leblond
- rivière du Tour de l'île

Estuaire de la rivière de Cayenne

- savane de Cavalet
- savane du petit Cayenne

Estuaire de la rivière de Montsinéry

- pripris de Soula
- crique Grand Mapéribo
- crique Grenouillet
- crique Timouthou, savane Onémark

Crique Macouria

- savane Marivat
- savane des Mornes
- pripris Maillard
- pripris Carapa
- pripris Concaribo

Estuaire du Fleuve Kourou

- rive droite : crique des Pères, marécages de Matiti
- rive gauche : grandes savanes de Kourou, grand Pripris (Charlotte), crique Passoura

La Karouabo

- pripris Trou Léonard, pripris Bassini
- savanes de Karouabo et d'Elisabeth

Estuaire de la Malmanoury

- rive droite : pripris Vogel
- rive gauche : pripris Dégonde, pripris Balata, savanes de Malmanoury

Crique Parakou

- pripris Bois Changement
- savane Renner

Estuaire de la Sinnamary

- rive droite : pripris Nango
- rive gauche : savane Brigandin

Crique Yiyi

- grand pripris Yiyi
- savanes Carré
- savane de Corossony
- savane de Trou Poissons

Estuaire de la Counamama

Crique Mal Ventre

- savane Mal Ventre

Estuaire de l'Iracoubo

- rive gauche : pripris Roche, pripris Gaudin

Crique Morpio

- savanes des Roches Blanches
- pripris de Mamaribo

Crique grand Mamaribo

Crique Organabo

- savane d'Organabo, savane grand Macoua
- savane Flèche (crique Moucaya)

Crique Irakompapi

- savanes

Estuaire de La Mana

- rive gauche : savane Fracas et zone humide de l'Acarouany (+ rizière)
- rive droite : savane Sarcelle (+ rizière)

Estuaire du Fleuve Maroni

- crique Coswine (milieu saumâtre)
- crique Vaches (milieu saumâtre)
- crique aux Boeufs Lamentins

ANNEXE 6

Hydrologie de la savane Sarcelle (marais de Mana)

Les marais étudiés se trouvent à l'ouest de la Guyane, bordés par le fleuve Mana qui a actuellement une embouchure commune avec le fleuve Maroni, frontière avec le Surinam (fig. 1). Deux rizières ont été installées : l'une en rive gauche de la Mana, l'autre en rive droite. Cette dernière n'a fait l'objet à l'époque (1000 ha ; 1980) - ni lors de son extension (2000 ha ; 1985) - d'aucune étude d'impact sur l'environnement lors de sa mise en chantier. Une polémique est née en 1985, considérant que les zones rizicoles gagnées sur le marais abritaient également la phase de croissance de la crevette Pénéide (3700 t pêchées par an), menaçant ainsi son cycle biologique.

Cette étude se situe dans ce contexte d'expertise hydrologique et scientifique sur un milieu transformé.

1. Conditions climatiques régionales

La pluviométrie dans la région de Mana est beaucoup plus faible que dans les autres régions côtières. La moyenne interannuelle est de 2 000 mm, contre 3 700 mm à Cayenne. Le maximum mensuel se rencontre en mai, et les deux minima annuels en mars, puis en octobre pour le plus accentué.

L'ensoleillement est important (2 100 h/an, soit 5,8 h par jour) et ses effets sur les nappes d'eau libre des marais côtiers vont entraîner une évaporation importante et une élévation de la température des plans d'eaux de faible profondeur (jusqu'à 35-37° mesurés in situ).

Le régime des vents est un régime d'alizés, d'est à NE (vitesse moyenne annuelle de 2,5 m/s).

2. Apports fluviaux à la mer

L'influence essentielle de ces apports fluviaux est de diluer les eaux marines surtout en saison des pluies, abaissant ainsi dans de fortes proportions la salinité et repoussant même, lors de fortes crues et dans certaines conditions météorologiques, les eaux de mer un peu plus au large.

Ces phénomènes d'échelle kilométrique s'étendant sur l'ensemble de la côte conditionnent l'évolution des plans d'eau sub-côtiers, qui pourront être réalimentés par des saumâtres côtières. Dans la région de Mana, il faut donc ajouter un nouvel élément au contexte sub-littoral, qui sera le remplissage des zones humides, par le jeu des marées océaniques, avec des eaux marines parfois sursalées en saison sèche et saumâtres en saison des pluies.

3. Environnement océanique

Fréquentées par un courant marin allant d'ouest en est, les côtes sont soumises en même temps à l'action des vagues de direction moyenne nord-est d'amplitude 0,4 à 1,4 m (Demerara Coastal Investigation, 1962) et à l'action mécanique de la marée dont l'amplitude moyenne est de 2 mètres. La marée est de type semi-diurne et conserve ses propriétés tout le long du littoral.

Non loin de l'embouchure des petits émissaires du marais, les mesures chimiques en mer montrent, par rapport à la composition des eaux de mer moyennes (Sverdrup et al., 1942), les caractères suivants :

- un pH au-dessus de 7 unités ;
- un rapport $Na + K / Ca + Mg$ oscillant, pour les mesures réparties sur sept mois, autour de 5,6 à 6,6. Ceci montre qu'en première approche les eaux marines conservent leur propriétés et sont diluées par des eaux douces provenant des apports fluviaux ;
- la dilution est maximale en juin, c'est-à-dire pendant la saison des pluies, et les teneurs en NaCl peuvent descendre à 60 % des valeurs nominales marines. Par contre, en septembre et jusqu'en novembre, on constate une légère sursalure (105 % par rapport aux analyses de référence (fig. 2). Cette sursalure est un phénomène beaucoup moins important dans le temps (saison sèche) que la dilution qui a lieu au moins 9 mois sur 12.

4. Morphologie du marais de Mana

Une coupe schématique (fig. 3 ; Prost, 1984 ; Lointier & Prost, 1988) orientée sud-nord, nous permet de distinguer les unités suivantes :

- un cordon sableux, "intérieur" (chenier), constitué de sables fins, jaunâtres, couvert par la forêt mixte dense ;
- un marais d'eau douce, domaine d'une végétation palustre constituée par des Typhacées, graminées, fougères et arbrisseaux. Le sol est composé d'argiles marines dessalées. C'est cet espace qui a été choisi pour l'implantation d'une activité rizicole ;
- le cordon littoral "intermédiaire" à sables grossiers ; cette unité constitue une séparation entre la prairie marécageuse d'eau douce et l'étang littoral ou marais saumâtre ;
- un marais saumâtre, de faible profondeur et partiellement envahi par la mangrove sur ses limites nord, (5 à 30 cm d'eau). La végétation est essentiellement composée de lentilles d'eau, d'algues (Ruppiacées en saison des pluies) et de palétuviers ;
- cordon littoral "actuel", à sables grossiers, traversé par les petits émissaires du marais et recouvert de jeunes *Avicennia* ;

- haute et basse slikkes, composées de vase meuble reprise sans cesse par les courants et les phénomènes d'accrétion et de sédimentation. Cet ensemble est recouvert d'une faible tranche d'eau de mer aux pleines-mers (20 à 50 cm) et s'étend au large jusqu'à deux kilomètres du cordon actuel.

Il existe une séquence morphologique bien marquée, qui se définit autour des accumulations sableuses formant les cheniers dits "intérieurs", "intermédiaires" et "actuels", séparant des accumulations de sédiments fins qui correspondent aux deux zones marécageuses.

Transect le long du Marais Sarcelle

(synthèse, d'après Prost, 1989)

Situation	Milieu	Soubassement	Sols	Végétation
arrière-mangrove	salé/saumâtre saumâtre eau douce	vases/argiles argiles	salés argiles salés en prof. Pégasse en surf.	joncs roseaux cypéracées fougères typhacées arbrissaux
chenier	cordon	sables en surface		palmiers-bâche
crique	fluvial	alluvions	alluviaux	palmier-bâche, forêt
lisière de forêt	marécages	argiles	acides à pégasse	palmier, "prunier" hibiscus
pinotière	marécages	argiles	acides à pégasse	palmier-pinot

5. Hydrologie du marais de Mana

Le marais de Mana, ou savane Sarcelle, est un vaste ensemble de 5 600 hectares, dont 3 000 hectares ont été mis en culture de riz irriguée.

Le marais s'étend sur 20 km dans la direction est-ouest et sur 4 km dans le sens nord-sud.

Ses limites naturelles sont constituées par la rive droite du fleuve Mana au sud et par le cordon sableux "actuel", marquant la ligne de rivage, au nord. Depuis 1972, la construction d'un canal, désormais inclus dans la rizière et devenu trait d'union entre la route et la partie marécageuse, en arrière du cordon littoral, a perturbé l'ensemble continu que formaient ces marais sub-littoraux.

Une étude, réalisée en 1972 par Rossignol, faisait apparaître l'existence de deux milieux indépendants et dont l'évolution semblait très sensible aux conditions océaniques. Cet auteur a décrit en 1973 un "tanne" vif à la place des marais à palétuviers observés depuis 1985, dans la cuvette centrale du marais.

Au cœur de celui-ci, place est laissée à plusieurs surfaces d'eau libre, chacune se prolongeant sous les palétuviers. Le plan d'eau majeur et central a une superficie de 450 ha. On y trouve en saison

des pluies une végétation aquatique à lentille d'eau et algues, et des îlots isolés d'*Avicennia* et de graminées (*Sesuvium*). La profondeur moyenne mesurée était de 50 cm.

On distinguera deux dispositifs distincts assurant l'entrée et la sortie des eaux sous l'effet de l'onde de marée. Nous définirons par la suite les deux types de milieu qui y sont afférents.

- Le premier dispositif alimente en eaux marines des zones recouvertes de mangroves : ce sont les chenaux de marée du Goulet et d'Amarante qui permettent l'intrusion, à presque toutes les marées, d'eau d'origine océanique et la vidange de ces mêmes eaux. Pour chaque chenal, Goulet et Amarante, et à proximité de l'exutoire, correspond une zone de palétuviers morts (respectivement 35 et 70 ha de superficie). Les fonctionnements de ces deux chenaux sont identiques ; seules diffèrent les surfaces de leurs bassins-versants, concept temporaire dans un cycle de marée.

Les chenaux d'Amarante et du Goulet possèdent chacun un bras latéral en rive gauche, qui assure la vidange de zones de mangroves qui ne semblent pas directement touchées par les eaux marines. A Amarante, ce petit chenal, la crique Emilie, remonte jusqu'au coeur même du marais. En fin de jusant, une différence de couleur des eaux indique que leur provenance est différente de celle des eaux du bras principal.

La crique Emilie assure la vidange du plan d'eau principal de la savane Sarcelle, à la basse mer, en sillonnant la mangrove située en arrière du cordon littoral actuel. A cette fonction s'ajoute celle de chenal à marée, qui assure l'inondation par les eaux marines des zones de mangrove, essentiellement pendant les périodes de vives eaux. Les prospections ont montré que ces eaux marines n'atteignent pas le plan d'eau saumâtre du marais principal dans les conditions de nos observations, c'est-à-dire en saison des pluies, pendant laquelle la "fonction de vidange" est effective.

- Le second dispositif d'alimentation prend naissance dans le fleuve Mana, au droit de la ville, c'est-à-dire à une vingtaine de kilomètres de l'embouchure du fleuve. Il s'agit d'une petite crique (Condillac) qui serpente dans la mangrove située au-delà de la berge droite du fleuve. Elle rejoint, par l'intermédiaire d'un seuil topographique situé à mi-parcours, un des bras du chenal à marée d'Amarante.

L'eau pénétrant dans ce chenal est celle du fleuve Mana. Même au niveau du seuil topographique, l'onde de la marée se fait encore fortement sentir, ce qui favorise une intrusion d'eau de fleuve vers l'intérieur du marais, particulièrement en période de vives eaux. Cette crique apparaît donc comme un chenal à marée dynamique.

Il existe ainsi deux dispositifs favorisant les sorties et peut-être les entrées d'eau dans le marais saumâtre, dispositifs qui sont le reflet de deux milieux différents : le premier que l'on pourrait qualifier de purement "marin" à proximité des émissaires ; l'autre que l'on qualifie de marais saumâtre et qui évolue sous l'action d'eaux plus douces (celles de la Mana) et surtout en fonction du régime pluviométrique.

6. Hydrométrie

6.1. Flot et jusant à un exutoire : crique Amarante

La superposition des mesures de hauteurs d'eau sur les enregistrements des vitesses, faites à partir d'un moulinet, à génératrice, permet de saisir les mouvements des masses d'eau (fig. 4). Dès l'arrivée du flot, le courant s'annule en 5 minutes environ et les vitesses de fond deviennent irrégulières. Les durées de flot sont de l'ordre de 3 à 4 h par marée. Les vitesses de surface sont de l'ordre de 1,2 m/s en vives eaux et de 0,5 m/s en mortes eaux. Pour certaines parties de la section, les valeurs identiques ont été mesurées au fond et à mi-profondeur. Les durées de jusant sont comprises en général entre 8 et 9 h, parfois 10 h en mortes eaux (fig. 4).

Les vitesses de jusant sont inférieures à celles du flot (de 0,5 à 0,6 m/s au fond, 1 m/s en surface, en vives eaux) et surtout beaucoup plus constantes. On observe la régularité de la vidange des chenaux et des surfaces inondées sous la mangrove, après une mise en mouvement de la masse d'eau qui dure environ 1 h30.

6.2. Cycle de débits oscillants. Débits moyens en l'absence de pluie

A l'exutoire principal, un jaugeage en continu, par verticales indépendantes, permet une évaluation précise des débits. Un exemple saisi en période de vives eaux (fig. 5) montre que les pointes de débit peuvent atteindre 60 m³/s à Amarante, alors qu'au jusant le débit ne dépasse pas 15 m³/s.

En mortes eaux, la cote d'étale de pleine mer remonte de 20 à 30 cm le plan d'eau de l'exutoire et les débits de flot sont très faibles.

En jusant, le débit moyen mesuré à Amarante oscille entre 4,5 et 0,8 m³/s pendant un cycle de vives et mortes eaux.

Au vu des mesures réalisées aussi sur la crique Emilie, au Goulet, et à Condillac, on voit le rôle primordial dans le fonctionnement actuel que prend la crique Amarante dont le débit moyen est de 6,0 m³/s en jusant pendant les périodes de vives eaux alors qu'il n'est que de 2 m³/s au Goulet, et atteint 1 m³/s en moyenne à la crique Emilie et à Condillac.

Au cours de ces mesures, il a été noté des modifications assez importantes après chaque marée du profil de la section de jaugeage. Des dépôts et des reprises de bancs de sable ou de vase d'une épaisseur de 10 à 20 cm ont été observés. Ce milieu est donc dynamique et en remaniement permanent par la mer.

6.3. Volumes oscillants à Amarante

Les courbes de débits oscillants fournissent par planimétrie les volumes entrants et sortants. En vives eaux, on constate que le volume de flot entrant dans le marais est deux fois plus important que le volume de jusant. Par exemple, sur le cycle de la figure 4, la seconde marée introduit 400 000 m³ pendant le flot et il est évacué 190 000 m³ pendant le jusant.

Il y a donc stockage temporaire d'eau océanique pendant les vives eaux. Par contre, en mortes eaux, le phénomène s'inverse mais les volumes évacués sont à peine supérieurs à ceux introduits par le flot (60 000 m³ pour un jusant et 50 000 m³ pour un flot à Amarante). Quel est alors le processus de circulation de ces eaux marines ?

L'entrée d'eau océanique par débordement sous la mangrove du marais se produit pendant 5 à 7 jours en vives eaux. Si l'on répartit le volume retenu pendant une forte marée sur une surface

obtenue en inscrivant dans une enveloppe toutes les “têtes” des chenaux de marée on obtient une lame d’eau de 10 cm de hauteur.

C’est ce qui a été mesuré lors des prospections dans cette zone du marais, que nous avons déjà qualifiée de “marine”. Par ailleurs, la permanence d’une importante quantité d’eau dans les chenaux, pendant une basse mer de vives eaux montre que ces émissaires ne permettent pas l’évacuation totale par gravité vers la mer du volume introduit par le flot. Les circulations d’eau sous la mangrove sont aussi considérablement ralenties par l’importante surface couverte par les pneumatophores des *Avicennia*.

Une part de ces eaux océaniques est ainsi retenue par la mangrove pendant quelques jours, phénomène auquel s’ajoutera un processus d’évapotranspiration. Les eaux excédentaires vont ensuite regagner la mer pendant la période de mortes eaux. Il n’y a donc pas, dans le système observé en 1985, d’intrusion d’eau océanique dans l’ensemble du marais saumâtre, la mangrove du domaine marin ralentissant les circulations naturelles.

6.4. Volumes oscillants à la crique Emilie

Cette crique a été instrumentée afin d’avoir des informations sur les volumes mis en jeux par les marées, mais aussi, du fait de sa communication avec la cuvette centrale, pour tenter d’avoir des éléments d’évolution sur l’hydrochimie de la savane Sarcelle.

Les volumes mesurés sont compris entre 20 et 50 000 m³, avec des volumes de flot et de jusant presque identiques (fig. 6), qui représentent le 1/10^{ème} de ce qui est mis en jeu à Amarante. Les influences de la marée et des pluies se conjuguent pour expliquer les variations des volumes mesurés, mais la période de mesure d’un mois (avec quelques lacunes) n’a pas été assez longue pour distinguer les apports océaniques de ceux de la pluviométrie dans la cuvette centrale.

6.5. Mesures des hauteurs d’eau à Amarante : utilisation dans la détermination des altitudes des bancs de vase.

L’enregistrement des hauteurs d’eau électronique à sonde piézo-résistive fournit une précision du demi-centimètre. L’enregistrement, pendant plusieurs mois, des cotes du niveau des eaux, aux deux émissaires du marais, a permis de réaliser une mesure relative des altitudes des plans d’eau et leur calage absolu par rapport au zéro marin.

En dépouillant les informations de hauteur d’eau au pas de temps journalier et sur une longue période, on peut séparer la composante appartenant à la marée océanique de l’écoulement naturel des eaux du marais vers la mer (fig. 7). L’étale de pleine mer, qui dure environ 30 min, permet un nivellement des échelles à marée disposées aux deux émissaires distants de 3 km.

Une superposition des cotes d’étale de pleine mer enregistrées et de celles prédites par le Service hydrographique pour les côtes de Guyane conduit au rattachement des niveaux mesurés au zéro marin (fig. 1-21). La précision des superpositions est de ± 2 cm. On détermine ainsi que le plan d’eau de l’exutoire Amarante se situe autour du niveau marin moyen. Il en va de même pour les bancs de vase déposés devant les exutoires. La cote du banc Amarante - pendant la période de mesure - était autour de 1,90 m au-dessus du zéro marin, et celle du banc du Goulet autour de 2,40 m.

Le nivellement du cordon sableux actuel et son rattachement à l'échelle à marée d'Amarante montre que son altitude maximale au-dessus du zéro marin est à 3,80 m. La vasière où se trouvent les palétuviers morts, en arrière du cordon actuel, est à la cote 2,80 m.

Nous constatons ainsi une différence altimétrique importante entre les bancs de vase de la haute slikke, au droit des deux émissaires du marais. Par ailleurs, la différence d'altitude entre les vasières du marais et le sommet du cordon sableux actuel met en relief la sensibilité de ces milieux paraliques face aux variations relatives, même d'ordre ce au niveau de la mer (cote maximale en vives eaux : 3,84 m).

On détermine ainsi qu'en fin de jusant les plans d'eau du Goulet et d'Amarante, qui présentent les mêmes oscillations dans le temps, sont à des altitudes différentes. Le plan d'eau du Goulet se trouve 50 cm plus haut que celui d'Amarante. Les bancs de vase situés sur la haute slikke des émissaires sont à la même cote que ces plans d'eau : on peut donc ainsi montrer que l'envasement de cette zone maritime s'effectue avec d'importantes différences altimétriques le long du littoral. En admettant que la pente soit constante entre ces deux bancs, celle-ci a une valeur de 0,17 m / km dans une direction parallèle à la ligne de rivage.

Il semble que le grand ensemble formé par le marais Sarcelle, dans sa partie située au nord de la rizière, est de formation très récente. Les photographies aériennes de 1950 et 1955 montrent un espace amphibie situé entre les cordons sableux "intérieurs" et "intermédiaires" et le cordon "actuel" de la ligne de rivage.

7. Hydrochimie

L'étude de la savane Sarcelle a posé de gros problèmes logistiques : quelques prélèvements ont été effectués directement dans le plan d'eau libre et repérés au topofil (utilisé également comme "fil d'Ariane"). Nous avons extrait deux échantillons représentatifs (tableau 1) qui montrent un pH voisin de 8 et une salure moyenne de l'ordre de 6 g/l, avec un taux de nitrates supérieur à 1 mg/l.

Tableau 1 - Eléments chimiques mesurés dans la cuvette centrale de la savane Sarcelle

Date	pH	Conductivité. (µmS)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	K (mg/l)	Na+ (mg/l)	Cl- (mg/l)	NO3- (mg/l)
21/05/85	8,28	4,173	90	200	160	1650	3652	1,16
21/05/85	7,95	4,05	80	215	150	1600	3793	1,00

Afin d'obtenir une information sur l'évolution temporelle de la salure de la cuvette centrale et au vu des difficultés d'accès, il a été procédé à une série de trois mois de mesures hydrochimiques à l'exutoire proche de la mer (crique Emilie, du 3/08/85 au 28/10/85) à la saison sèche. Les prélèvements ont été faits uniquement à l'étape de basse mer. Les résultats d'une analyse en composante principale (ACP - tableau 2) montrent les caractéristiques des eaux de marais diluées par les eaux marines sous l'effet du cycle des syzygies.

Tableau 2 - Coefficients de corrélation (x 1000) entre éléments chimiques à la crique Emilie (ACP sur 86 échantillons journaliers à l'étape de basse mer ; PLU = pluviométrie)

pH	Cond.	Ca	Mg	K	Na	Cl	No	So	Si	Plu
----	-------	----	----	---	----	----	----	----	----	-----

pH	1000										
Cond.	-13	1000									
Ca	-188		813	1000							
Mg	-224		858	980	1000						
K	-272		716	936	941	1000					
Na	-195	873	980	995	941	1000					
Cl	-227	825	987	992	950	992	1000				
No	459	-173	-378	-365	-435	-357	-381	1000			
So		-273	799	969	975	968	979	984	-440	1000	
Si	209	-668	-697	-719	-694	-724	-721	528	-749	1000	
Plu	-63	-149	-149	-131	-101	-142	-135	37	-132	151	1000

Cette analyse met en évidence le fait que le paramètre pluie n'a pas eu d'incidence statistiquement visible durant la série de prélèvements : il est vrai que la plus forte averse n'a été que de 41 mm, le 20 août 85.

La silice et les nitrates sont les deux paramètres dont la corrélation est négative avec les éléments composant l'eau marine. Ils sont indicateurs des caractéristiques du marais d'eau saumâtre en mortes eaux et subissent la dilution par les eaux marines en vives eaux et pendant les transitions du cycle. Nous avons pu estimer que ces prélèvements étaient représentatifs de la cuvette saumâtre à 50 % du temps, alors que l'environnement océanique peut atteindre des salures maximales de 40 g/l. On peut dégager par l'analyse statistique un échantillon représentatif des eaux du marais, ainsi qu'un échantillon caractéristique des eaux marines peu mélangées aux eaux de marais :

Tableau 3 - Echantillons caractéristiques de deux situations mesurées dans les eaux de la crique Emilie

Echantillon	pH	Cond mS	Ca	Mg	K	Na+	Cl-	NO3-	SO4	Silice
Type océanique	7,25	45,70	495	1661	800	12659	23714	0,75	2679	4,40
Type marais	7,12	04,64	066	184	169	1558	3017	0,99	202	18,90

Le pH mesuré est plutôt voisin de 7, alors que les prélèvements in situ dans la cuvette indiquaient 8 (y a-t-il légère acidification pendant le parcours des eaux dans la mangrove ?). Les teneurs en silice du marais sont élevées (entre 10 et 20 mg/l).

L'évolution temporelle (fig. 8) des nitrates, de la silice et des apports en Cl- (pour traduire l'effet océanique) au regard des hauteurs de basse et haute mer montre l'évolution du système de la fin de la saison des pluies à la saison sèche d'octobre :

- la concentration en Cl- augmente régulièrement pour plafonner à 20-25 g/l en octobre ;
- sur les quatre premiers cycles observés, on constate la dilution des apports de la cuvette d'eau saumâtre par les eaux marines (corrélation négative). La silice oscille entre 15 et 20 mg/l pendant les mortes eaux ;

- début octobre, les apports en silice et en nitrates baissent fortement alors que l'on entame une morte eau : ceci voudrait dire que les apports du marais cessent pendant une dizaine de jours, pour reprendre progressivement en vives eaux. Dans ce cas, on peut évoquer un effet "mécanique" de la marée, qui favorise les sorties de marais à partir de la cote BM de 0,80 m et au-dessous, au moment où le plan d'eau de la cuvette elle-même est bas, du fait de l'évaporation.

Cette étude indirecte de la cuvette centrale montre comment les effets océaniques ont des répercussions hydrodynamiques, soit directement par inondation, soit indirectement par l'effet des variations de hauteur d'eau du niveau de sortie en mer.

Les conditions d'échange avec l'océan sont très modulées dans le temps et dans l'espace, et ont probablement des conséquences sur les nurseries, dont l'étendue et la fonctionnalité dépendent de l'hydrodynamique.

8. Fonctionnement hydropluviométrique du marais

Quelle est la part de la pluviométrie dans le fonctionnement du marais saumâtre ? Un pluviomètre, placé en arrière de la mangrove de front de mer, a permis d'enregistrer la pluviométrie journalière : celle-ci, comparée à la cote du plan d'eau de l'émissaire Amarante (après filtrage de la composante de la marée océanique) explique des variations du plan d'eau (fig. 9), observées notamment les 13 et 21 avril ainsi que les 4-7 mai 1985. Dans le premier cas, on reconnaît, après une forte pluie, une crue du bassin-versant de l'émissaire, la première crue se produisant en mortes eaux. Dans le second cas, en mai, la réponse du plan est uniquement due à l'impulsion océanique qui masque l'effet d'une pluie de 30 mm qui se produit pendant la même période.

En analysant ce type de document, on s'aperçoit que les crues observables sont déclenchées par des averses supérieures à 30-50 mm (en 24 heures) en vives eaux. On retrouve ici le concept de petit bassin-versant temporaire.

L'étude de la crue du 13 avril apporte des renseignements complémentaires : au regard de la surface du bassin-versant, le volume d'eau correspondant aurait pu être évacué en une demi-journée. La crue ayant une durée de presque 3 jours, on peut penser qu'elle est soutenue par un apport extérieur aux limites définies. Il est donc probable que, dans ce cas, on assiste à une vidange soutenue d'une part par le petit émissaire du marais (Emilie), mais aussi par une circulation latérale des eaux du marais saumâtre vers le domaine des chenaux à marée.

De même, la petite crique Condillac pourrait assurer le rôle de collecteur d'eau lorsque les circulations latérales se manifestent, mais son rôle est mineur du fait de la lenteur des circulations sous la mangrove et de sa petite dimension.

Pour des averses supérieures à un seuil que l'on peut situer vers 40-50 mm, la limite entre les deux domaines saumâtre et marin disparaît et les eaux saumâtres s'écoulent vers la mer. Dans les autres cas de figure, les eaux marines investissent le domaine habituel à chenaux de marée. Ces éléments appuient l'observation de terrain qui montraient par, l'aspect des vases et la végétation, l'existence de deux biotopes très différents.

Dans ces conditions, on peut donc se demander d'où provient la salure des eaux du marais saumâtre. Les analyses chimiques réalisées au centre du marais font apparaître des concentrations en NaCl de 5 g/l en moyenne pendant la saison des pluies. Avec l'évaporation et la température des eaux voisine de 32°C, on assiste à une augmentation de cette valeur pendant la saison sèche, des conditions de sursalure (35 g/l de NaCl) s'étant même présentées en novembre 85 dans certaines petites mares. Toute l'évolution du marais saumâtre va donc être conditionnée par la répartition temporelle des pluies de saison sèche. Dans un cas extrême, et ceci a été observé en 1969 et 1982, il peut y avoir assèchement complet et apparition du tanne sec.

L'origine saumâtre d'un tel système ne peut être comprise - dans les conditions observées en 1985 - qu'en évoquant la présence de sel contenu dans les argiles marines du sol. Le lessivage de ces sels par les eaux pluviales est lent et dominé, de surcroît, par un effet de seuil lié aux pluies, au-dessous duquel le marais saumâtre demeure presque endoréique.

9. Synthèse, discussion

L'analyse hydrologique conduit à distinguer deux milieux du marais saumâtre déjà évoqués par Blancanaux (1981) : l'un à invasion marine périodique et l'autre à dominante saumâtre (fig. 10).

- Le premier, "marin", est localisé, et son extension géographiquement réduite. Il coïncide avec les cours sub-littoraux des criques Amarante et Goulet. Il a une perméabilité océanique très forte : il est parcouru régulièrement par les marées. Pendant les périodes de jusant, son fonctionnement rappelle la notion de bassin-versant et pendant le flot, de courte durée, il y a débordement des eaux marines dans tout le secteur, avec un stockage temporaire des eaux.

- Le deuxième milieu est "sub-littoral saumâtre", avec des eaux moyennement salées et riches en acides humiques. Ce milieu, spatialement le plus étendu, est représenté par la grande cuvette centrale du marais. Contrairement à ce qui se passe pour le milieu "marin", la circulation des eaux est pratiquement nulle ; la vidange, assurée par les émissaires de faible importance, est très lente.

La limite entre les deux domaines est tranchée : il n'y a pas intrusion d'eau marine dans les cuvettes saumâtres. Cette limite n'est plus imperméable ; par contre, au moment des averses supérieures à 30-50 mm, les débordements du marais saumâtre alimentent le chevelu de chenaux, qui assure un écoulement lent des eaux vers la mer.

L'essentiel de la fonction "mangrove de marais ouverte à la mer" a donc été cernée par rapport à la problématique du cycle de la crevette que nous évoquions au début de ce travail. Les zones de nurserie ont probablement été réduites en surface par l'aménagement rizicole, mais leur fonctionnalité a été préservée. L'alimentation de la savane Sarcelle en eau saumâtre de marais a été réduite également par la construction de la digue nord, diminuant très certainement le potentiel de la nurserie.

On soulève ici tous les problèmes que posent une étude d'impact réalisée après les aménagements et la complexité des analyses scientifiques qui en découlent lorsqu'un état "zéro" n'a pas été réalisé. Les hydrobiologistes (Lhomme, 1992) ont étudié le cycle de la crevette Pénéide en d'autres points du littoral. Il semble que les nurseries soient distribuées tout le long des 300 km de côtes, mais la part du système savane Sarcelle n'a pu être vraiment quantifiée faute d'informations plus précises sur les autres nurseries du littoral. Une étude plus globale, utilisant la spatialisation de l'information par les données satellitales (Travassos, 1994, fig. 11) indique une production moyenne (pêchée en mer) dans la mangrove littorale de l'ordre de 140 kg/ha, valeur proche des estimations mondiales (180 kg/ha). Par l'étude des surfaces de mangrove du système Sarcelle (mangrove ouverte à la mer : 4 km² ; des bassins-versants saumâtres : 4 km²) on peut estimer la contribution du système Sarcelle à 3 ou 4 % du total (soit environ 145 t par an).

Références

- Blancanaux, P. (1981) - Essai sur le milieu naturel de la Guyane française. Travaux et documents ORSTOM, n° 137.
- Demerara Coastal Investigation (1962) - Hydraulics Laboratory - Delft Netherlands.
- Guyane : Atlas des départements français d'Outre-Mer (1979), Tome IV. La Guyane. ORSTOM - CNRS. Editions du CNRS.
- Lhomme, F. 1992. Le recrutement des postlarves de la crevette *Penaeus subtilis* (Perez Farfante, 1967) dans deux estuaires de Guyane française. Annales de l'Institut Océanographique, Paris, 68 (1-2) : 169-178.
- Lointier, M. & Prost M.T., (1988). Environnement côtier des Guyane. Rapport intermédiaire. Conseil Régional de la Guyane / ORSTOM. Cayenne. Mult. 75 p. + fig.
- Lointier, M. (1984) - Dynamique des eaux et de l'intrusion saline dans l'estuaire du Sinnamary (Guyane Fr.) ORSTOM - Cayenne.
- Prost, M.T. (1989) Environnement côtier des Guyane. Rapport final. Conseil Régional de la Guyane / ORSTOM. Cayenne. Mult. 180 p. + fig.
- Rossignol, M. (1972) - Etude d'un marais de Guyane. Le marais Sarcelle. Mult. ORSTOM - Cayenne, 39 p.
- Sverdrup H.U., Johnson M.W., Fleming, H. (1942) - The oceans. Prentice - Hall, Inc. New-York.
- Travassos, P. (1994). Cartographie par télédétection optique et radar du littoral de la Guyane : importance de la mangrove pour la production crevette. Mém. de DESS, Univ. P. & M. Curie / GDTA - CETEL / ORSTOM.

ANNEXE 7

Estuaire du Sinnamary

Depuis le début des années 80, le projet d'ouvrage hydroélectrique de Petit Saut, sur le fleuve Sinnamary (fig. 1), a conduit à réaliser des études hydrologiques du fleuve (Fritsch J.M. 1982, 84, 85) et de son estuaire (Lointier M., 1984, 86, 88, 89).

Les études menées sur l'évolution du littoral de Guyane (Prost M.T., 1985, 86, 87, 88, 89) en particulier par télédétection (Lointier M., & M.T. Prost, 1988 - Lointier M., 1989) décrivent les profondes modifications dont celui-ci peut être l'objet, tout comme les conséquences qui en résultent sur son hydrodynamisme et ses propriétés physico-chimiques (Lointier M. & Roche M.A. 1988). Celui du Sinnamary subit actuellement les conséquences d'un désenvasement littoral profond, surtout depuis mars 87, date à laquelle la rive droite du fleuve est entrée en communication avec la mer, à 4 km de son embouchure. La remontée du coin salé est désormais plus accentuée vers l'amont et l'hydrodynamisme de l'estuaire s'est vu modifiée, avec une prépondérance des phénomènes orientée vers l'amont.

Afin de caractériser au mieux les eaux naturelles, avant toute modification majeure à l'amont par l'ouvrage hydroélectrique, une série de mesures de la teneur en MES, pH et oxygène dissous a été menée pendant ces périodes.

I- SYNTHÈSE DES RESULTATS ANTERIEURS

A. La dynamique littorale et son incidence sur les estuaires

Une consultation historique, faite à partir des cartes anciennes et récentes, montre que les estuaires de Guyane se classent grossièrement en deux catégories : ceux dont l'embouchure est relativement stable dans le temps (Maroni, Kourou, Mahury et rivière de Cayenne) et les autres (Mana, Iracoubo, Sinnamary, Approuague, Oyapock), dont l'embouchure est profondément transformée par la présence des bancs de vase.

- Pour les embouchures peu modifiées, la sortie en mer s'effectue perpendiculairement à la ligne de rivage. On y rencontre une barre vaseuse. Le passage d'un banc n'a d'effet que sur le mode de mélange des eaux océaniques dans l'estuaire (ex. Kourou). Les deux slikkes, situées de part et d'autre de l'embouchure, appartiennent à un même ensemble. Ces slikkes ont une incidence sur les circulations estuariennes, et vice versa (Froidefond J.M. et al., 1985)

- Pour les autres estuaires, le passage d'un banc de vase se traduit par un allongement important du cours, qui emprunte son ancien chenal sous-marin, avec une très forte déflexion vers l'ouest (Lointier M., 1986). C'est le cas actuel de l'Approuague, du Sinnamary, de l'Iracoubo et de la

Mana. Dans le tronçon proche de l'embouchure, les fonds sont faibles (1 à 2 m) ; on observe une barre vaseuse et les sections sont larges.

Plus en amont, au-delà du cordon holocène en général, les sections ont une morphologie habituellement connue en rivière, au profil en travers en forme de "U", avec un approfondissement de la rive concave dans les méandres.

B. Résumé des phénomènes physiques observés en estuaire

La définition générale d'un estuaire est, pour de nombreux auteurs, la zone du fleuve où s'exerce soit la marée dynamique (Francis-Boeuf, 1947), soit la marée saline (Dyer, 1972). Outre l'importance de ces définitions sur le plan de la gestion administrative, il nous paraît nécessaire de faire un rappel des principaux phénomènes physico-chimiques observés dans les estuaires guyanais et qui conditionnent les transports en suspension ou la dilution des matières en solution :

- la marée dynamique (d'amplitude marine entre 1,5 et 3 m) se traduit par une oscillation du plan d'eau de la rivière, de période voisine de celle de la marée océanique, mais dont l'amplitude décroît vers l'amont (sauf amplification ou résonance locale de l'onde). L'onde de marée - donc sans transport de matière - se propage sur des distances de l'ordre de 70 à 90 km en Guyane et disparaît au premier obstacle rencontré lors du changement du régime d'écoulement (roches encombrant le lit, "saut" en Guyane). La célérité de l'onde est de l'ordre de la dizaine de km/h (16 km/h sur le Sinnamary) ;

- les phénomènes d'inversion des courants sont dus au flot et au jusant, dont la limite varie en fonction du débit propre du fleuve. En étiage, on observe la "renverse" des courants entre 30 et 50 km de l'embouchure. Pendant les faibles débits, nous avons observé sur le Sinnamary que les heures de renverse par rapport à la pleine mer de référence, en différents points de l'estuaire sont indépendants du coefficient de la marée (Lointier M. 1984) ;

- le brassage des eaux marines et fluviales donne naissance à des eaux de turbidité élevée et au "coin salé", dont l'extension est conditionnée par les débits et le coefficient de marée. Toujours en étiage, les limites extrêmes de ce phénomène sont de l'ordre de 15 à 35 km selon le type d'estuaire ;

- les limites amont du coin salé et du transport des vases d'embouchure se positionnent, à quelques centaines de mètres près, en un même lieu (Lointier & Roche, 1988).

Enfin, il faut signaler :

- la présence fréquente des "dunes hydrauliques" de nature sableuse, observées au fond du lit et prouvant qu'il existe un transport de fond ;

- les pentes de lignes d'eau faibles, de l'ordre de 3×10^{-5} (Mana, Sinnamary), c'est-à-dire 3 cm par kilomètre d'estuaire.

C. Rappel des données hydrologiques du Sinnamary

1. Station de Petit Saut

	Surface à la station	Module moyen à la station	Module moyen à l'embouchure	Volume annuel écoulé
Petit Saut	5 880 km ²	6 560 km ²	290 m ³ /s	9,15 x 10 ⁹ m ³

(calcul d'après Saut Tigre)

2. Station de Saut Tigre (données calculées au 01/01/86)

Superficie du bassin à la station : 5 150 km²

Pluviométrie moyenne sur 30 ans : 2700 mm

MODULES :

Période d'observation : 17 ans (de 1969 à 1985)

Décennal	faible	moyen	décennal fort
	173 m ³ /s	227,6 m ³ /s	283 m ³ /s

Ecart-Type : 43,1 m³/s Cv : 0,19

CRUES : Maximum observé= 1310 m³/s en 1977

Crue décennale estimée à 1040 m³/s

Crue centennale estimée à 1300 m³/s

Fréquence d'apparition maximale du 1er janvier au 30 juillet

ETIAGES : Minimum observé 34,2 m³/s en 1969

Etiage décennal estimé à 44,5 m³/s

Etiage centennal estimé à 34 m³/s

Fréquence d'apparition maximale du 1^{er} novembre au 10 janvier

Débits mensuels sur la période d'observation (m³/s)

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
234	226	243	327	386	343	273	182	127	102	106	182

Année la plus humide : 1976

Année la plus sèche : 1985

II - MODIFICATIONS DE L'ESTUAIRE DU SINNAMARY

L'hydrodynamique de l'estuaire, déjà étudiée en 1984, avait permis d'observer les transformations historiques de l'embouchure (M. Lointier, 1986), provoquées par la migration des banc de vase. Depuis 1985, on observe la régression de la ligne de rivage.

Au-delà du front avant du banc de Kourou, la côte de Sinnamary subit une forte érosion. A l'est de l'embouchure du Sinnamary (secteur de la route n° 8 - dite "de l'Anse" - et de la plage Dégonde), les marais côtiers sont à présent en contact direct avec les eaux marines, du fait de la disparition presque complète de la mangrove de front de mer. La vase nue, exposée en marée basse, est parsemée ici et là de troncs morts et de bosquets résiduels d'*Avicennia*.

Le fort recul du rivage dans ce secteur n'est pas seulement actuel : d'une part, la mer a détruit jadis la presque totalité de la route de l'Anse qui reliait Sinnamary à Kourou par la côte ; d'autre part, une datation au ¹⁴C des vases de l'estran de la plage Dégonde a révélé un âge de 3 500 ans, ce qui prouve l'existence d'une érosion importante de cette partie de la côte.

L'hydrodynamique côtière joue également un rôle primordial dans l'évolution de certains estuaires, comme celui du Sinnamary, dont l'histoire est retracée grâce à des documents anciens. Il est acquis qu'en 1763 l'embouchure du fleuve se trouvait à plusieurs kilomètres à l'amont de sa position actuelle (Yayer, 1937), au niveau de l'actuel canal Phillippon ; un banc de sable barrait légèrement la sortie du fleuve en mer et orientait le chenal vers le nord-ouest. Un document datant de 1879 montre que l'embouchure occupait la même place, mais que la barre sableuse avait disparu. Yayer a constaté que l'embouchure s'était allongée de 6 km vers le nord-ouest dans l'espace de 58 ans (1879-1937). La comparaison du tracé du fleuve entre 1936 et 1976 montre que l'estuaire a progressé d'environ 6,5 km dans une direction sub-parallèle à la ligne du rivage (Lointier M., 1986). La vitesse moyenne de progression - si elle est considérée comme continue et monotone - serait de près de 170 m/an. Dans la réalité, la progression est variable, plus rapide ou plus lente, selon les conditions de l'environnement.

Nous sommes actuellement dans un processus inverse? qui semble avoir débuté vers les années 75.

Simultanément à la déviation de l'estuaire (LANDSAT 1976 / SPOT 1986), des changements morphologiques se sont opérés sur la partie maritime de la rive droite du Sinnamary, modifications suivies systématiquement entre 1986 et 1988 (levé de terrain, survol en basse altitude, télédétection). La largeur de l'espace, en rive droite, séparant le fleuve de la mer a diminué de façon spectaculaire, passant de quelques centaines à quelques dizaines de mètres au courant de la période considérée ; simultanément, il y a eu dépérissement et mort de la mangrove de front de mer. Ce rétrécissement accéléré a abouti à l'ouverture d'une large brèche, par laquelle la houle pénètre maintenant dans l'estuaire et attaque la mangrove sur la rive gauche . L'île qui s'est formée à l'embouchure est, elle aussi, en érosion. Cette "ouverture forcée" de l'estuaire - qui reste très dynamique - modifie les paramètres hydrologiques, sédimentologiques et morphologiques.

Exception faite de ce secteur, la rive gauche est plus stable et c'est sur celle-ci qu'apparaissent plus nettement des vestiges d'anciens rivages. Le traitement numérique d'images SPOT révèle 4 classes de mangrove qui traduisent vraisemblablement des différentes phases de colonisation des vases. L'existence d'une plage ouverte à la mer il y a environ 50 ans - la plage Brigandin, qui se trouve aujourd'hui piégée derrière plusieurs centaines de mètres de mangrove - donne une idée de la périodicité de ces mécanismes qui semblent être proches du siècle. On conçoit aisément que, dans de telles conditions, la remontée des sels et des vases d'embouchure soit un phénomène qui sera l'objet de variations importantes d'intensité dans l'espace et dans le temps.

III - MESURES HYDROLOGIQUES

A. Résultats hydrométriques - Campagne 88

Au total, trois campagnes de mesures ont été réalisées depuis l'ouverture de la brèche dans l'estuaire (mars 87) :

- 16 et 17 décembre 1987 : mesures chimiques uniquement ;
- 3 mai 1988 : mesures chimiques et hydrométriques ;
- 25-27 oct. 88 : mesures chimiques et hydrométriques au pas de temps serré (30 min).

L'expérience acquise sur les mesures en estuaire nous a conduit à rechercher un compromis optimum entre le nombre de points de mesure de vitesse dans la section et un pas de temps plus serré entre deux jaugeages. Les 9 mesures de vitesse s'effectuent, avec du personnel entraîné, en moins de 15 min, ce qui permet de négliger les variations de cote du plan d'eau et de simplifier le dépouillement des données.

Pendant que se déroulent ces mesures, un opérateur prélève les eaux à la pompe, reliée par un tuyau souple à un ajutage fixé au saumon du moulinet hydrométrique.

1) Les sections de mesures

Section	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Distance (km)	0	3,25	7	11	13,5	16	19,5	23	26,5	29,5

L'ouverture de la rive droite en mars 87 se situe en amont de la section B.

2) Limnigrammes

Les enregistrements à la section D nous donnent un marnage de 2,20 m pour la campagne du 3 mai, et de 2,30 m pour le 26 octobre.

Le rattachement au "zéro IGN" n'a pas été réalisé. La comparaison des limnigrammes conduit à estimer la vitesse de propagation de l'onde de pleine mer à 15 km/h, comme observé en 1983.

3) Vitesses

Dans la plupart des sections, l'évolution des vitesses sur une verticale se présente sous l'habituelle parabole des vitesses. Néanmoins, surtout à la section C et pendant les périodes de renverse, on rencontre les effets des "prédominances" de flot sur le jusant (courant de flot au fond, pendant que le jusant est encore en surface). De même, c'est dans cette partie de l'estuaire que l'on observe une déformation des profils de vitesse, avec des valeurs plus élevées à mi-profondeur. Ceci traduit les remontées d'eau saline par le fond, phénomène déjà décrit et qui a généré le concept de "coin salé".

Pour les autres sections de mesure plus en amont, la dominance fluviale est nette, l'influence du biseau salé est moindre et la déformation des paraboles de vitesses n'est plus observée.

4) Vitesses de fond instantanées

Nous verrons plus loin l'évolution des vitesses pendant un cycle de marée. Néanmoins, lorsque l'on évoque les problèmes de transport de sédiments par le fleuve, il nous a paru intéressant de réserver un tableau aux vitesses de fond.

Durant la campagne d'octobre, on a observé des vitesses maximales suivantes (à 0,20 m au dessus du fond) :

Section	Flot (m/s)	Jusant (m/s)
C	0,46	0,43
F	0,54	- -
G	0,48	0,58

5) Evolution des vitesses pendant un cycle de marée

Les mesures de vitesse réalisées toutes les demi-heures, durant la campagne d'octobre, dépassent très rarement 1 m/s, sauf à mi-jusant et au voisinage de l'embouchure. Dans l'estuaire, on peut remarquer les faibles vitesses de surface pendant le flot (section C), et les vitesses plus élevées à mi-profondeur.

6) Volumes oscillants

La campagne d'octobre 88 permet d'estimer les volumes oscillants aux sections C et G, par planimétrage de la courbe des débits. Nous les comparerons aux valeurs de 83.

Section	Vflot	Vjusant	\bar{V}	Vj/Vf
Unités	10^6 m^3	10^6 m^3	10^6 m^3	
- en 83 (mortes eaux, puis vives eaux) :				
"A"	9,10	10,6	1,50	1,16
"D"	4,46	6,00	1,54	1,35
"G"	4,14	6,00	1,86	1,45
"A"	13,8	16,3	2,5	1,18
"D"	7,50	9,70	2,20	1,29
"G"	5,53	8,34	2,81	1,51
en 88 (vives eaux) :				
"C"	10,7	11,6	0,9	1,08
"G"	5,72	7,16	1,44	1,25

Depuis 83, la section A a disparu et l'estuaire s'est raccourci de 4 km. Les volumes de flot observés en 88 sont du même ordre de grandeur qu'en 1983, tandis que ceux de jusant ont sensiblement diminué, comme l'indique le rapport V_j/V_f , alors que le débit propre du fleuve à la station de Petit Saut est très proche de celui mesuré en 1983.

7) Dérives moyennes et résultantes

Ces valeurs sont obtenues en divisant le volume oscillant mesuré à une section par sa surface mouillée :

- à la section C, on obtient 9 100 m en flot, et 9 800 m en jusant ;
- à la section G, on obtient 9 900 m en flot, et 12 300 m en jusant.

La dérive résultante est obtenue par différence des deux : 700 m pour C et 2 400 m pour G (moitiés des valeurs mesurées en 83, dans les mêmes conditions de vives eaux).

A cette époque, le temps de séjour dans l'estuaire d'une particule, entre la pointe Combi et l'embouchure (30 km), était estimé à une semaine. On peut s'attendre à ce que ce temps soit doublé dans les conditions actuelles d'une hydrodynamique de cycle de "désenvasement". Il semble donc que l'influence marine soit plus marquée à cette période.

IV - PHYSICO-CHIMIE DES EAUX

1) Salinité

La confrontation de ces résultats avec les mesures de la campagne de 1983 montre bien une remontée de l'influence marine vers l'amont depuis l'ouverture de la brèche de mars 1987. Avant la rupture de la rive droite, le contact eaux fluviales - eaux saumâtres (fixé à 10 mg/l de NaCl), oscillait entre les sections E et G, pour tous les coefficients de marée (Lointier M., 1984). Les teneurs en NaCl au pont de Sinnamary étaient de l'ordre de 1 g/l. Depuis, nos mesures montrent qu'à cet endroit, situé entre les sections E et F, la valeur maximale a été multipliée par 10. De même, la limite de l'extension maximale du biseau salé est repoussée de la section G vers la section H, c'est-à-dire de 4 km vers l'amont, valeur comparable au déplacement vers l'amont de l'embouchure du Sinnamary.

Si l'on admet une certaine linéarité dans la relation liant le déplacement de l'embouchure et la progression du biseau salé vers l'amont, il faudrait que l'embouchure remonte de 7 km pour que la prise d'eau douce de la pointe Combi alimentant la ville de Sinnamary soit touchée par la remonté saline. Cette limite correspond à une ouverture au niveau de la section D, près du canal Philippon. Bien que cette situation ne semble pas évoluer dans ce sens - le banc de Kourou aura sans doute atteint la zone avant son ouverture complète - rappelons que la situation a été observée au début de ce siècle (Yayer, 1937) et que le cordon sableux de la route de l'anse (section D) était la ligne de rivage de l'époque.

2) Matières en suspension

Les matières en suspension (MES) ont été mesurées aux sections C, D, F, G et H durant la campagne d'octobre 88. L'analyse des éléments autres que la conductivité a été réalisée sur un prélèvement de deux litres effectué à mi-profondeur de la verticale n° 2, au milieu de la section de mesure. Les échantillons ont été filtrés à 0,8 µm.

Section C : les quantités de MES varient à cette section entre 200 et 1 200 mg/l, pendant un cycle de marée complet. La superposition des données au graphe des débits oscillants montre une évolution parfaitement centrée sur le maximum des débits, confirmant le mécanisme de remise en suspension des vases d'embouchure par les courants de flot et, dans une moindre mesure, par les courants de jusant (cf. points de 11 h 30 et 20 h). Il faut cependant remarquer, à ce niveau de l'estuaire, que les valeurs sont faibles, devant certaines quantités mesurées à d'autres embouchures et qui atteignent parfois 40 g/l (L.C.H.F., 1965, 1967 ; Bellesort et al., 1968).

Afin de présenter ces résultats sous un aspect descriptif et homogène pour toutes les sections, nous avons choisi de faire figurer sur le même graphique l'évolution conjointe de la salinité. On y remarque la correspondance des variations de salinité et de turbidité pendant la fin du jusant et le début du flot jusqu'à son maximum. Ensuite, les deux variables se dissocient et la salinité demeure à 30 g/l, pendant que les courants s'annulent et que le jusant s'installe, entraînant une chute des teneurs en MES à 100 mg/l.

3) Mesures de pH et de température

La campagne de décembre 87 a donné l'occasion de faire deux profils, de l'embouchure à la section "i", pour ces paramètres mesurés à la sonde portable "Horiba". Compte tenu de la précision des mesures de pH sur le terrain, des barres d'erreurs ont été portées sur les graphiques (+ ou - 0,2 unités pH).

Le pH des eaux marines est compris entre 7 et 8, en général. C'est ce qui a été mesuré au voisinage de l'embouchure les 16 et 17 décembre. Un prélèvement d'eau a été réalisé à chaque point de mesure de pH. Ceci permet de comparer ces valeurs à la salinité. On remarquera la stabilisation des valeurs de pH à 5 - 5,5 à partir des concentrations en sels comprises entre 1 et 3 g/l. L'acidité des eaux fluviales se traduit donc encore dans les zones de brassage, alors que les eaux ont déjà un caractère saumâtre.

Les profils de température montrent une décroissance vers l'amont de l'ordre de 1 à 2°C, avec une variation importante constatée le 16 décembre uniquement, entre 10 et 15 km de l'embouchure, au niveau de la ville de Sinnamary. La température des eaux de l'embouchure est de l'ordre de 28 - 29°C, tandis que celle du fleuve est à 27 °C.

4) Mesures de la silice

Les mesures ont été réalisées durant la campagne d'octobre 88. Ce paramètre évolue en fonction de la salinité et traduit une dilution des eaux douces chargées en silice dans les eaux océaniques à faible teneur en silice.

On peut mettre en évidence, à l'aide de ce paramètre, trois zones distinctes de l'estuaire :

- le premier domaine est à influence marine dominante : les teneurs en silice ne dépassent pas 5 mg/l. C'est le cas des sections C et D pendant la plus grande partie du cycle de marée. Ce domaine s'étend entre l'embouchure et 12 km en amont ;

- le second domaine est constitué d'eaux dont les teneurs en silice varient entre 8 et 10 mg/l : c'est un milieu qu'on peut qualifier "d'intermédiaire", où la remontée du biseau salé se fait ressentir temporairement au cours du cycle de marée (la concentration maximale admissible de 350 mg/l en sodium-chlorures n'est dépassée que pendant un quart d'heure au plus). Il s'agit des sections C et D, en fin de jusant, et surtout des sections F et G. Ce domaine serait compris entre les kilomètres 10 et 22 de l'estuaire ;

- le troisième se définit par des teneurs en silice comprises entre 10 et 12 mg/l. Cette zone est à influence fluviale dominante. C'est le cas observé à la section H à partir du kilomètre 23.

Tout comme Roche (1977) dans son étude sur l'estuaire du Kourou, Ray (1984), dans l'estuaire de la rivière Mahanadi, aux Indes, constate également ce phénomène de dilution de la silice dans les eaux marines. Cet auteur signale en outre des écarts à la courbe théorique de dilution, qui semblent montrer la présence dans l'estuaire d'organismes (diatomées) consommant de la silice.

Noguès (1984) a étudié la distribution du phytoplancton dans les eaux estuariennes du Sinnamary. Ses résultats mettent en évidence la décroissance de la concentration en phytoplancton de l'aval vers l'amont, et la prédominance des organismes de type diatomées.

Nous pouvons ainsi supposer que le phytoplancton est un élément important de la qualité des eaux estuariennes de Guyane. Il serait sans doute intéressant d'étudier de plus près les cycles biochimiques des éléments, et en particulier celui de la silice.

5) Mesures d'oxygène dissous

Le protocole a permis de faire une mesure de surface (20 cm) et une mesure à 1,50 m de profondeur.

La teneur en oxygène dissous dans l'eau dépend de la température du milieu et de la concentration en chlorures. Il était nécessaire, pour comparer toutes ces valeurs entre elles, de les exprimer en pourcentage par rapport à la saturation, et donc de tenir compte de l'effet des deux paramètres. La température variant peu, comme nous l'avons vu précédemment (3°C au maximum), elle a été considérée comme constante pendant le temps des mesures. La forte baisse de la valeur de saturation, due à la présence des chlorures venant des eaux marines, oblige à tenir compte de ce facteur. La relation [9] est déduite des abaques de correction pour l'ion chlore, en utilisant la

relation liant Cl^- et NaCl . Vu la précision de ces mesures, on assimile la concentration en NaCl à la salinité S , elle-même obtenue à partir des mesures de conductivité qui a été échantillonnée systématiquement :

$$\text{DO}_{\text{sat}} = - 0,042 S + 7,56 \quad \text{avec } S : \text{salinité (g/l) et DO en ppm} \quad [9]$$

En décembre 87, on constate que les eaux marines sont oxygénées à 95-98 % et que le profil "instantané" dans l'estuaire indique une décroissance vers l'amont. Les eaux fluviales ont une oxygénation oscillant entre 80 et 85 %. Le 16 décembre 87, on retrouve l'anomalie positive, aux parages de la ville de Sinnamary, également constatée sur les courbes de pH et de température.

En octobre 88, l'oxygène dissous semble traduire l'hétérogénéité des masses d'eaux durant le cycle de marée. A la section D, les valeurs de DO en jusant sont de l'ordre de 80 %, puis l'arrivée du flot fait nettement se disjoindre la courbe à 1,50 m de celle de surface, dont les valeurs diminuent jusqu'à 70 %, pour remonter ensuite. Rappelons que la salinité décroît de 33 à 5 g/l pendant ces mesures sur la journée.

La section H - purement fluviale, comme nous l'avons vu - présente des valeurs de DO autour de 80 % également et accuse une chute à 70 %, au moment de l'étale des courants et de la renverse. La courbe de surface se disjoint de celle à 1,50 m.

Dans l'ensemble, on observe une certaine stabilité des valeurs à 80 % de DO pendant les régimes permanents d'écoulement, caractérisés par une oxygénation légèrement supérieure en surface. En régime de renverse et au moment de l'arrivée du flot, l'oxygénation à 1,50 m augmente, tandis que celle de surface diminue.

Par ailleurs, nous retrouvons des résultats similaires à ceux obtenus par Etcheber (1986) dans un autre milieu : l'estuaire de la Gironde, qui présente une évolution des teneurs en DO comprises entre 80 et 90 % de la saturation, avec la même instabilité dans cette fourchette.

CONCLUSIONS

On connaît maintenant l'incidence de la dynamique des bancs de vase sur les estuaires. Celui du Sinnamary fait partie des cas à forte déflexion vers l'ouest et on y observe, depuis 1983, date des premières études, une régression généralisée de la ligne de rivage. Les cartes anciennes montrent aussi que l'embouchure peut remonter jusqu'au canal Phillippon, au niveau du cordon sableux de la route l'Anse. Sans pouvoir prédire une telle évolution à court terme, il est important de noter cet élément qui met bien en évidence l'absence de stabilité d'un banc de vase émergé, même recouvert de palétuviers. Cet ensemble est toujours fragile, soumis en priorité aux conditions océaniques, qui sont capables de faire disparaître 2 km de mangrove en 10 ans et d'ouvrir une brèche dans l'estuaire en rive droite. Les photos aériennes et l'utilisation des données satellite permettent maintenant de réaliser des évaluations quantitatives précises de ces phénomènes.

Les études hydrologiques et hydrochimiques des autres estuaires, tout comme le Sinnamary, font apparaître des caractéristiques communes à tous ces systèmes :

- la limite du front salé est très voisine du lieu où disparaissent les teneurs significatives en MES : ces deux fronts sont donc très proches dans l'espace ;

- les eaux de rivière, au pH acide et à très faible minéralisation, contrastent avec les eaux marines au pH voisin de 8, contribuant à former un milieu tamponné dans l'estuaire ;
- l'extension du coin salé dépend du rapport "volume apporté par la rivière pendant un demi-cycle" / "volume d'un flot" ; ce rapport est de 20 % pour le Sinnamary en étiage.

Trois séries de mesures ont été analysées dans ce rapport : décembre 87, mai 88 et octobre 88. Ces périodes auraient dû être représentatives de trois conditions climatiques distinctes :

- une campagne de fin de saison sèche avec le passage de la ZIC vers le sud, en décembre ;
- une campagne en saison des pluies, avec une activité maximale de la ZIC lors de sa remontée vers le nord ;
- une campagne en étiage (pendant les vives eaux de syzygie), en octobre.

La climatologie de l'année 88 a été éloignée de la moyenne, et la pluviométrie déficitaire. C'est pour cette raison que les conditions hydrologiques des trois campagnes sont proches, avec des débits observés à la station de Petit Saut compris entre 90 et 130 m³/s. On peut considérer ces trois études comme complémentaires puisqu'elles se rapprochent des conditions d'étiage avec des marées moyennes et de vives eaux.

Les vitesses mesurées sont semblables à celles observées en 1983. Les vitesses maximales dépassent rarement 1 m/s et l'hydrodynamique n'a pas subi de transformation.

L'analyse des débits oscillants conduit à plusieurs remarques :

- la sinusoïde des débits oscillants s'atténue plus rapidement vers l'amont que celle des hauteurs d'eau. L'amplitude de variation des débits est divisée par deux entre les sections C et G, c'est-à-dire sur une distance de 13 km ;
- pour une même section, les maxima de débits de flot et de jusant sont identiques, en valeurs absolues et instantanées. C'est simplement la durée du jusant qui augmente vers les sections amont ;
- les volumes de flot observés en 1988 sont du même ordre de grandeur qu'en 1983, tandis que ceux de jusant ont sensiblement diminué, comme l'indique le rapport V_j/V_f . La dérive résultante obtenue est de 700 m pour la section C et 2 400 m pour G, moitié des valeurs mesurées en 1983 dans les mêmes conditions de vives eaux.

En 1983, le temps de séjour dans l'estuaire d'une particule, entre la pointe Combi et l'embouchure (30 km), était estimé à une semaine. On peut s'attendre à ce que ce temps soit doublé dans les conditions actuelles d'une hydrodynamique de cycle de "désenvasement". Il semble donc que l'influence marine soit plus marquée, au moins pendant cette période.

La mesure de la conductivité, traduite en salinité, indique pour chaque campagne la distribution des eaux saumâtres et leur limite maximale vers l'amont. Il est observé que, dans tous les cas, le coin salé s'atténue fortement à partir de la section G (20 km), où les valeurs sont toujours inférieures à 1 g/l. A partir de la section H (23 km), on peut considérer que l'on a des eaux purement fluviales dans 80 % des mesures. La confrontation de ces résultats avec les mesures de la campagne de 1983 montre bien une remontée de l'influence marine vers l'amont depuis l'ouverture de la brèche de mars 1987. Avant la rupture de la rive droite, le contact eaux fluviales - eaux saumâtres (fixé à 10 mg/l de NaCl) oscillait entre les sections E et G, pour tous les coefficients de

marée. Les teneurs en NaCl au pont de Sinnamary étaient de l'ordre de 1 g/l. Depuis, les mesures montrent qu'à cet endroit, situé entre les sections E et F, la valeur maximale a augmenté d'un facteur 10. De même, la limite de l'extension maximale du biseau salé est repoussée de la section G vers la section H, c'est-à-dire de 4 km vers l'amont, valeur comparable au déplacement vers l'amont de l'embouchure du Sinnamary.

L'analyse statistique des mesures chimiques, complétée par l'étude de la silice, nous suggère une partition de l'estuaire en trois domaines :

- le premier est à influence marine dominante : les teneurs en silice ne dépassent pas 5 mg/l. C'est le cas des sections C et D pendant la plus grande partie du cycle de marée. Ce domaine s'étendrait entre l'embouchure et 12 km en amont ;

- la seconde partie est constituée d'eaux dont les teneurs en silice varient entre 8 et 10 mg/l. C'est un milieu que l'on peut qualifier "d'intermédiaire", où la remontée du biseau salé se fait ressentir temporairement au cours du cycle de la marée. Il s'agit surtout des sections F et G. Cette zone de brassage des eaux serait comprise entre les kilomètres 10 et 22 de l'estuaire ;

- le troisième domaine se définit par des teneurs en silice comprises entre 10 et 12 mg/l. Cette zone est à influence fluviale dominante. C'est le cas observé à la section H, à partir du kilomètre 23.

Enfin, critère plus délicat à mesurer sur le terrain mais déterminant pour l'évaluation des qualités biologiques des eaux, l'oxygène dissous montre des pourcentages par rapport à la saturation élevés en mer (95 à 98 %), un peu plus bas, dès les premiers kilomètres d'estuaire (80 à 85 %) et pouvant chuter à 70 - 75 % lors des étales de courants.

Cadrées dans les investigations nécessaires à l'étude d'impact sur l'environnement de l'ouvrage hydroélectrique de Petit Saut, ces mesures et leur interprétation apportent de nombreux éléments de connaissance nécessaires à l'évaluation des effets d'un tel aménagement, tout en contribuant à la mise au point et à l'utilisation de techniques nouvelles. Située dans un milieu en croissance permanente, la zone d'estuaire doit faire l'objet d'une attention toute aussi soutenue que le suivi des transformations des zones forestières inhabitées situées en amont de l'ouvrage.

Références

- Bellesort, B. & Martin, J.M. 1968. Etude préliminaire sur la sédimentation dans l'estuaire du Mahury. L.C.H.F. 10 p.
- Dyer K.R. ,1972. Estuaries: A Physical Introduction. Editor: J. Wiley. 140 p.
- Etcheber H., 1986. Biogéochimie de la matière organique en milieu estuarien: comportement, bilan, propriétés. Cas de la Gironde. Mémoire de l'Institut de géologie du Bassin d'Aquitaine, Univ. Bordeaux I. 379 pp.
- Fritsch, J.M. 1982. Données hydrologiques pour l'aménagement de Petit Saut sur le Sinnamary. Etude d'impact de l'aménagement du barrage de Petit Saut. Rapport EDF. Centre ORSTOM. Cayenne.
- Fritsch, J.M. 1984. Les transports solides. Etude d'impact de l'aménagement du barrage de Petit Saut. Rapport EDF. Centre ORSTOM. Cayenne.
- Fritsch, J.M. 1985. Les étiages du Sinnamary. Etude d'impact de l'aménagement du barrage de Petit Saut. Rapport EDF. Centre ORSTOM. Cayenne.
- Francis-Boeuf C., 1947. Recherches sur le milieu fluvio-marin et les dépôts d'estuaire Ann. Inst. Océano., Vol 23. 350 p
- Froidefond, J.M., Prost, M.T. & Griboulard R.,1985. Etude sur l'évolution morpho-sédimentaire des littoraux argileux sous climat équatorial: l'exemple du littoral guyanais. Rapport Cordet - IGBA. Ministère de la Recherche et de la Technologie, Paris. Université de Bordeaux I. Talence. 189 p.
- L.C.H.F.,1965. Etude sédimentologique en Guyane. Rapport sur le Mahury. ORSTOM. Cayenne.
- Lointier, M. 1984. Dynamique des eaux et de l'intrusion saline dans l'estuaire du Sinnamary. Rapport EDF. ORSTOM Cayenne.
- Lointier, M.,1986. Hydrodynamique et morphologie de l'estuaire du fleuve Sinnamary (Guyane française). Le littoral guyanais : fragilité de l'environnement. Nature guyanaise. Sepanguy. 37-44.
- Lointier, M. 1987-1988. Annuaire hydrologique. ORSTOM. Cayenne.
- Lointier, M. & Prost, M.T., 1988. Coastal sedimentation and local rivers supply in French Guiana: comparisons with the Amazon. Chapman conference on the fate of particulate and dissolved components within the Amazon Dispersal System: River and Ocean. AGU. Charleston. Wild Dunes.
- Lointier, M. & Roche M.A., 1988. Salinités et suspensions des estuaires de Guyane. Méthodes et résultats. IV^{èmes} Journées hydrologiques de Montpellier.
- Lointier, M., 1989. Estuaries and river studies in French Guiana, using SPOT and LANDSAT data. Poster. IAHS Third scientific assembly - May 89, Baltimore, USA. Traduction en français dans les 3^{èmes} Journées ORSTOM - SEMINFOR.

- Noguès, J.L., 1984. Etude de l'intrusion saline dans l'estuaire du Sinnamary. Dynamique, hydrochimie, phytoplancton. Mémoire de DEA, Univ. de Provence, Saint-Charles et ORSTOM Cayenne, 45 pp.
- Prost, M.T. 1985. Quelques problèmes relatifs à l'évolution côtière en Guyane. In : Etude de l'évolution morpho-sédimentaire des littoraux argileux sous climat équatorial : l'exemple du littoral guyanais. Rapport Cordet: 1-62. Ministère de la Recherche et de la Technologie, Paris. Université de Bordeaux I, IGBA. 189 pp.
- Prost, M.T., 1986. Morphologie et dynamique côtières dans la région de Mana. In : Le littoral guyanais : fragilité de l'environnement. Nature Guyanaise. Sepanrit. Sepanguy. 31-36.
- Prost, M.T., 1986. Aspects of the morpho-sedimentary evolution of French Guiana's coastline. Quaternary of South America and Antarctic Peninsula, vol. 4, 191-218. J. Rabassa Ed. A.A. Balkema Publ. Rotterdam.
- Prost, M.T., 1988. Shoreline changes in French Guiana. Quaternary of South America and Antarctic Peninsula, vol 5. J. Rabassa Ed. A.A. Balkema Publ. Rotterdam.
- Prost, M.T. & Lointier, M. 1987. Sedimentology and stratigraphy of the Holocene formations of the French Guiana's coastal plain. ABEQUA. Publ. avulsa 2: 55-83. São Paulo. Brésil.
- Prost, M.T., 1989. Changes in coastal sedimentary environments and remote sensing data in French Guiana. Internat. Symp. on Global Changes in South America during the Quaternary. São Paulo, mai 1989.
- Ray S.B., Mohanti M. & Somayajulu B.L.K., 1984. Suspended matter, major cations and dissolved silicon in the estuarine water of the Mahanadi river, India. Journal of hydrology, vol. 69, 183 - 196.
- Roche, M.A., Dubreuil P. & M. Hoepffner, 1974. Dynamique des eaux, des sels et des sédiments en suspension des estuaires du Mahury et de l'Approuague. ORSTOM Cayenne, 80 pp.
- Roche, M.A., 1977. L'estuaire du Kourou en Guyane française : possibilités d'alimentation en eau d'une usine de pâte de bois et risques de pollution par rejets industriels dans l'estuaire. Rapport. ORSTOM. 80 p.
- Yayer. 1937. Compte-rendu de la mission pour l'établissement de la carte S.H.O.M. n° 5884 (région de Sinnamary).

ANNEXE 8

Bassins-versants côtiers de la Karouabo et de la Passoura

Les études hydrologiques de ces bassins-versants côtiers (fig. 1) ont été réalisées dans le cadre d'une expertise sur la zone du Centre Spatial Guyanais (CSG). Les mesures hydrologiques ont commencé en 1990. Ce sont les premiers bilans complets qui ont été effectués en Guyane et en zone côtière. Ces bassins font partie des systèmes humides puisque leur exutoire se situe dans la basse plaine côtière et leurs apports viennent alimenter les marais bordant le littoral. Ils constituent deux exemples venant compléter les différents cas de relation du système bassin / zone humide avec l'océan : la Karouabo pour les faibles échanges de sa partie aval avec le milieu océanique, et la Passoura pour les relations indirectes des marécages avec l'océan, par l'intermédiaire de l'estuaire du fleuve Kourou.

1. Situation et caractères des bassins

Pour les deux tiers environ de leur superficie, ces deux bassins sont forestiers. La partie aval est composée de savanes qui ont un rôle important dans la détermination des crues et le soutien par leur nappe en étiage.

Les données de télédétection ont été utilisées pour préciser et vérifier la morphologie. En effet, les seules cartes disponibles, couvrant l'ensemble des bassins, sont au 1 / 50 000^e et datent de 1950. Les nouvelles éditions IGN au 1 / 25 000^e ne couvrent pas toutes les zones étudiées vers le sud.

Une cartographie a été réalisée avec Landsat 88 et Spot 86, afin de préciser les limites des bassins, les zones de savanes et de forêt et évaluer leurs superficies. Vu l'absence de relief en aval des bassins, la détermination des limites nord, près de l'exutoire, est une tâche délicate.

* Bassin-versant de la Karouabo (bassin de 83,3 km² ; fig. 2)

Ce bassin-versant est recouvert par 24,3 km² de savanes représentant 29 % de la superficie totale, et 59 km² de forêt et de végétation diverse, soit 71 %.

* Bassin-versant de la Passoura (109 km² ; fig. 2)

Ce bassin-versant est recouvert par 4,54 km² de savanes centrales et 17,0 km² de savanes périphériques (au nord), soit 19,8 %. La couverture végétale arbustive ou forestière représente 80 %.

2. Pluviométrie

L'analyse au niveau mensuel, comparée aux moyennes entre 1969 et 1988 à la station météorologique du CSG, permet de comparer les différentes situations pluviométriques par rapport aux corps secondaires et principaux d'un cycle pluviométrique annuel (tableau 1) :

Tableau 1
Comparaison des corps pluviométriques par rapport
aux moyennes mensuelles 1969 - 1988 (CSG) et totaux annuels
(total année moyenne : 2938 mm)

	Corps secondaire (janvier)			Corps principal (mai)			Total mm
	déficit	normal	excès	déficit	normal	excès	
1990	-	-	X	-	-	X	3464,4
1991	X	-	-	-	X	-	2324,5
1992	X	-	-	X	-	-	2040,0
1993	-		X	-	X	-	2927,5

Les relevés pluviométriques annuels à la station de Kourou CSG (Verlet, 1989) permettent de réaliser une étude statistique des totaux annuels : en supposant que leur distribution des valeurs suit une loi de Gauss, on peut replacer les dernières années de mesure (1990 à 1994) dans un contexte pluviométrique plus général. L'ajustement à la loi normale est satisfaisant.

Paramètres de la loi :

moyenne : 2967 mm

écart-type : 622 mm

coef. de variation : 0,21

coef. d'irrégularité interannuelle (K3) : décennale humide /décennale sèche

$$K3 = 1,73$$

(valeur dont l'ordre de grandeur est observée en général en Guyane)

L'ajustement à la loi Normale permet d'évaluer la période de retour des années 1990 à 1994 (tableau 2).

Tableau 2 - Total pluviométrique à la station météorologique et période retour définie
à partir de l'ajustement à une loi Normale.

Année	Total (mm)	Episode	Période de retour
1990	3465	humide	5 ans
1991	2569	sec	3,8 ans
1992	2040	sec	14 ans
1993	2927	valeur proche moy. (2967 mm)	1 an
1994	3350	humide	3,7 ans

3. Hydrologie du bassin de la Karouabo

D'une largeur de 26 m environ au niveau du pont sur la route de l'Espace, la crique se rétrécit rapidement en remontant à l'amont. Le lit est délimité de part et d'autre par une végétation assez dense de palétuviers et de palmiers bâches. Les arbres ont 10 m de hauteur en général, 20 m pour les plus grands. Il n'existe pas de rives à proprement parler puisque la végétation prend racine sous le niveau de l'eau ; il est difficile d'estimer la largeur de la zone inondée (le lit majeur) à partir de la crique car la végétation est peu franchissable de chaque côté. Par endroits ces arbres investissent même le lit principal de la crique, et en rétrécissent la largeur, ce qui rend difficile la progression. Les arbres morts, flottant à la surface ou entre deux eaux, sont nombreux. Dans ces zones envahies, on ne dispose d'aucun repère ; de plus, l'absence d'un écoulement bien établi rend la remontée hasardeuse. C'est par exemple le cas des "confluences", qui sont en fait de vastes marais où l'on ne distingue pas le point de jonction d'un bras sur un autre.

Comme on l'a remarqué à partir des cartes IGN, les reliefs sont très faibles. On distingue tout de même sur le terrain une colline de 22 m de haut qui précède un passage de la crique beaucoup plus large (20 m) d'environ 800 m de long.

3.1. Étalonnage de la station

Une quarantaine de jaugeages a été réalisée à la station limnigraphique, qui permet de construire la courbe d'étalonnage (fig. 3). Une série de jaugeages "en continu" pratiqués le 9 mai 90, sur un cycle de 12 heures, n'a pas permis de mettre en évidence une quelconque influence de la marée. Les mesures chimiques effectuées en continu, en étiage, n'ont pas non plus décelé d'intrusion de sel. Un moulinet à génératrice avec un enregistrement en continu a été également installé au droit de la section de jaugeage, durant une semaine, sans indiquer la présence de renverses de courant.

Nous avons déjà signalé la particularité de ce petit bassin côtier, qui se trouve hors de l'influence de la marée océanique : les mesures de hauteur d'eau et les mesures chimiques pratiquées en octobre 1991, pendant l'étiage, confirment encore ce fait pour les deux dernières années d'observation. Par contre, les arrêts d'écoulements constatés en 1991 (15 jours), puis en 1992 (40 j), ne se sont pas manifestés en 1993. En comparant le nombre de jours d'arrêt à la pluviométrie annuelle, on peut avancer que l'arrêt d'écoulement commencerait approximativement pour des totaux annuels inférieurs à 2 500 mm de pluie, mesurés à la station météorologique du CSG.

3.2. Bilan annuel

Les caractéristiques des bilans annuels sont indiqués ci dessous :

Année 1991	
Débit moyen annuel	4,38 m ³ /s
Débit maximum instantané	48,5 m ³ /s, le 2 juin 91
Arrêt des écoulements	du 23 nov. au 6 déc. 91
Volume écoulé durant l'année	139,5 millions de m ³
Débit spécifique	53,1 l.s-1. km-2
Lame écoulée	1675 mm

Déficit d'écoulement	649 mm
----------------------	--------

Année 1992	
Débit moyen annuel	3,22 m ³ /s
Débit maximum instantané	25,8 m ³ /s, le 9 mars 92
Arrêt des écoulements	du 20 oct. au 29 nov. 92
Volume écoulé durant l'année	101,8 millions de m ³
Débit spécifique	38,7 l.s ⁻¹ . km ⁻²
Lame écoulée	1222 mm
Déficit d'écoulement	818 mm

Année 1993	
Débit moyen annuel	4,96 m ³ /s
Débit minimum instantané	0,42 m ³ /s, le 23 sept. 93
Débit maximum instantané	34,2 m ³ /s, le 7 avril 93
Arrêt des écoulements	néant
Volume écoulé durant l'année	156,4 millions de m ³
Débit spécifique	59,5 l.s ⁻¹ . km ⁻²
Lame écoulée	1878 mm
Déficit d'écoulement	1049 mm

Le bilan à l'échelle mensuelle montre une importante variabilité des hydrogrammes (fig. 4), tant dans leur amplitude que dans leur composition.

Le déficit d'écoulement annuel, correspondant aux pertes par évapotranspiration et infiltration, est compris entre 650 et 1000 mm/an, valeurs plus faibles que la moyenne enregistrée sur des bassins sous forêt, estimée à 1 470 mm/an (Roche, 1982 ; Fritsch, 1992). Nous n'avons pas pour l'instant d'hypothèses précises pour expliquer cette différence importante, mais le fait que ce bassin soit constitué de presque 1/3 de savanes laisse penser que le ruissellement est plus important dans ces milieux et que le mode de fonctionnement hydraulique des savanes est encore à explorer.

3.3. Crues et étiages

Crues

Une douzaine de crues a été analysée pendant la période de mesure. Elles ont été choisies en fonction de leur individualisation par rapport aux crues complexes générées par des épisodes pluviométriques multiples, comme cela se produit souvent en saison des pluies. Les dates des événements sont à peu près réparties sur l'ensemble du cycle hydrologique annuel. A l'analyse de ces caractéristiques, on peut dégager les éléments suivants :

- les temps de montée sont compris entre 1 et 5 jours, les crues rapides se produisant pendant la saison des pluies (avril à juin) tandis que les crues les plus lentes sont observées, après l'étiage, à la petite saison des pluies, de novembre à janvier. En moyenne, le temps de montée est de 1,8 jours ;

- les volumes écoulés sont compris entre 2,2 et 10 millions de m³ (Mm³), avec une moyenne de 6,5 Mm³. Une bonne corrélation se dégage avec le total pluviométrique qui a provoqué la crue (fig. 5), à condition d'exclure de la relation trois crues survenues avant la saison des pluies et une après (les barres d'erreur du graphique sont de ± 7,5 mm de pluie et ± 5 % sur les mesures de volume). Cette dispersion peut s'expliquer par la forme du hétérogramme et la répartition spatiale de la pluie sur le bassin, mais également par les différences d'humectation des sols (bassin composé de 29 % de savanes) et les processus de recharge de la nappe phréatique. En effet, avant la saison des pluies, les trois crues citées présentent des écoulements inférieurs de 35 % à la droite de corrélation. La crue survenue après la saison des pluies (juillet) présente un écoulement supérieur de 40 %. Dans notre hypothèse, de telles variations s'expliqueraient par les processus de saturation liés aux sols et de niveau de la nappe : les premières crues traduiraient un contexte peu saturé, tandis que la crue de juillet se serait produite dans un contexte très saturé. On peut d'ailleurs rapprocher ces phénomènes de ce qui est observé en fin de saison sèche (octobre) : les premières pluies déclenchent l'écoulement de base, sans crues identifiables, pendant le mois de novembre (surtout en 1991 et 1992 après les arrêts d'écoulement), remettant en place le fonctionnement hydraulique du bassin ;

- les débits spécifiques des crues varient dans une plage de 300 à 600 l.s⁻¹.km⁻² en saison des pluies, et de 100 à 300 l.s⁻¹.km⁻² aux autres périodes de l'année ;

- le débit caractéristique de crue (débit journalier égalé ou dépassé pendant 10 jours de l'année) a été de 18,6 m³/s en 1993.

Etiages

Les étiages se situent dans la période allant de septembre à début novembre. Ils sont interrompus par une reprise d'activité moyenne de la ZIC (Zone Intertropicale de Convergence) lorsqu'elle redescend du nord vers le sud, provoquant une petite saison des pluies de décembre à février.

La durée des étiages a été de 45 jours en 1992 et 1993, et de 85 jours en 1991.

Les courbes de tarissement présentent un caractère classique de décroissance exponentielle marquée, modélisable (coef. r² = 0,97) par la vidange d'un réservoir simple, selon la relation :

$$q = q_0 e^{-\beta(t-t_0)} \quad \text{avec} \quad q : \text{débit (en m}^3/\text{s)} \text{ et } t : \text{temps (en jours)}$$

On détermine ainsi le coefficient β :

Année	Coef β
1991	0,0157
1992	0,0240
1993	0,0131

Les débits mesurés sont compris entre 0,8 et 1,4 m³/s au début de l'étiage, pour atteindre 0,4 m³/s en 1993, valeur la plus basse, et zéro en 1991 et 1992. Le débit caractéristique d'étiage (débit journalier égalé ou non dépassé pendant 10 jours de l'année) a été de 0,46 m³/s en 1993.

Nous avons noté la présence d'arrêts d'écoulements, phénomène important dans le cycle hydrologique. Ces arrêts ont duré 13 jours en 1991 et 40 jours en 1992.

3.4. Fonctionnement de la partie aval du bassin de la Karouabo

Nous pouvons proposer un schéma de fonctionnement à l'aval de ce petit bassin-versant, prenant en compte la morphologie de l'exutoire : les différents cheniers (barre sableuse) traversés (au moins trois fois) et les zones de mangrove sur vases anciennes et récentes, près du littoral.

Nous avons distingué quatre unités de l'amont vers l'aval :

- une zone à drainage naturel située sous forêt primaire ;
- une zone à savanes inondables temporairement, lors des crues de la saison des pluies ;
- un espace "intercheniers" où se produirait le stockage des eaux de ruissellement. Cette partie est parcourue par d'anciens cheniers intermédiaires, qui sont localement bordés de zones très hydromorphes. Au centre de cette partie et sur le trajet de la crique, on rencontre une dépression qui pourrait être sous influence marine, surtout lors des marées de vives eaux. L'ensemble est en général couvert de palétuviers ;
- une zone littorale parcourue par les chenaux de marée, couverte de palétuviers et soumise en permanence à l'action océanique : cycle des marées, progradation et érosion du banc de vase.

3.5. Mesures de la qualité de l'eau à la station limnimétrique de la Karouabo

Une série de 3 prélèvements mensuels ont été réalisés d'octobre 1990 à novembre 1991 au pont de la Karouabo. Le tableau 3 permet de comparer les valeurs moyennes mesurées à celles obtenues sur un bassin en forêt naturelle, le bassin de la Comté à la station de Saut Bief, entre 1989 et 1991 (Lointier, 1993 a ; Grimaldi, 1993 ; Lointier, 1994 a).

Tableau 3 - Quelques caractéristiques chimiques des eaux entrant dans le système des zones humides, comparées à celles d'un bassin-versant sous forêt naturelle (Comté)

Karouabo	pH	Cond	Cl	Na	SiO ₂	NO ₃
Unités		μS/cm	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)
MOY	-	32,5	7,26	4,09	3,99	0,312
MAX	6,9	93,0	24,00	13,30	6,80	0,680
MIN	5,3	20,0	3,61	2,34	0,00	0,040
Ecart type	-	11,5	3,29	1,80	1,55	0,144

La Comté à Saut Bief (1 760 km²)

Comté	pH	Cond	Cl	SiO ₂
--------------	----	------	----	------------------

Unités		$\mu\text{S/cm}$	(mg/l)	(mg/l)
MOY	-	21,2	2,76	6,8
MAX	7,8	40	8,41	10,5
MIN	5,7	12	1,57	2
Ecart type	-	3,2	0,62	1,9

Nota - Le pH étant le cologarithme d'une concentration en H^+ , la moyenne de ce paramètre n'a pas de sens physique.

Les eaux de la Karouabo ont les particularités suivantes :

- les valeurs de pH oscillent dans un intervalle plus bas (entre 0,5 et une unité pH) que celui concernant les valeurs de la Comté ;
- la conductivité est plus élevée, expliquée par une concentration plus forte en Na et Cl ;
- les valeurs de silice sont plus faibles.

La proximité océanique de ce bassin peut expliquer ces différences, mais il est prématuré de tirer des conclusions, d'autant plus que l'on ne connaît pas le rôle des savanes dans la composition chimique de l'eau.

Mesures en continu sur la période du 4 février au 31 mars 1993

Cette période est marquée par 4 crues (fig. 6). Le 10 mars, le débit maximum est de $25,1 \text{ m}^3/\text{s}$. On constate qu'il existe :

- pour la conductivité et le pH, une relation inverse avec le débit. Les baisses de pH sont naturelles, de 1/4 d'unité, synchrone avec les crues ;
- pour l'oxygène dissous, il est observé une augmentation globale avec le débit, sur les deux bassins, en saison des pluies. Les autres cas de figure montrent la forte dépendance de ce paramètre vis-à-vis des conditions du milieu : température, effets biologiques (variations quotidiennes).

Nota - En toute rigueur, il aurait été préférable de présenter les résultats de l'oxygène dissous en pourcentage par rapport à sa saturation dans l'eau, celle-ci étant dépendante, selon des relations connues, de la température et de la concentration en ions chlorures (Lointier, 1990).

Sur d'autres bassins sous forêt en Guyane (Grimaldi, 1988 ; Lointier, 1993), la relation inversement proportionnelle entre le pH et le débit déjà été observée.

4. Bassin de la Passoura

La crique se jette dans le fleuve Kourou, non loin du pont franchissant ce dernier. La station de mesure est située à 7 km, par la rivière, de la confluence avec le Kourou et on peut s'attendre à une influence marine importante.

Limites du bassin :

- dans la partie sud, c'est la nouvelle route, déviation de la RN1, qui limite le bassin, en passant en ligne de crête ;
- dans la partie ouest, c'est la piste Barthod, en ligne de crête également, qui sépare ce bassin de celui de la Karouabo ;
- dans la zone nord, la route de l'Espace limite les Grandes savanes de Kourou, dont les écoulements (très lents) seront attribués à la Passoura, à partir de la piste Corneille. En effet, une ligne de relief sépare ces savanes du sous-bassin de Soumourou et le ruissellement des Grandes savanes n'atteindrait la Passoura que bien en aval, au niveau du dernier marais et au point A (UTM 310,7 est et 570,1 nord).

Plusieurs missions de reconnaissance ont été effectuées sur ce bassin, notamment pour identifier les différents marais, faire des prélèvements d'eau en vue d'analyses chimiques, et assurer la maintenance de la station de Soumourou.

Une mission effectuée le 29 juillet 1991 nous a permis de relever les éléments suivants : la crique Passoura se remonte difficilement du pont où se trouve la station limnigraphique jusqu'au point A : le lit est étroit, encombré d'arbres couchés ; les fonds sont faibles (de l'ordre de 1,5 m), tandis que les vitesses d'écoulement avoisinent le mètre par seconde.

Peu après, on découvre des savanes inondables, dont la topographie se situe généralement à environ 1 m au-dessus du plan d'eau de la crique, bordée de "moucou-moucou" (*Montrichardia arborescens*). Les vitesses d'écoulement deviennent faibles. La profondeur du lit atteint alors 3 m.

A une dizaine de kilomètres du pont, on rencontre des zones inondées en rive gauche exclusivement, de quelques hectares, navigables par une profondeur de 0,8 à 1 m. Ces zones inondées sont en bordure de crique, épousant ses méandres. Elles sont alimentées directement par les eaux de la rivière. Leur limite externe est constituée de forêt et de quelques palmiers bâches (*Mauritia flexuosa*). A cet endroit, la crique a une profondeur de 4 m.

Au niveau de la station de mesure de Soumourou (13 km du pont RN1), les vitesses sont nulles et aucun jaugeage n'a pu être réalisé. La profondeur du lit était de 3 m et, non loin en aval, il a été mesuré à 6 m.

Tout le cours moyen de cette crique est donc sans écoulements mesurables et représente une zone importante de stockage des eaux. On peut remarquer également la profondeur notable du lit de la rivière (3 à 4 m), dans une zone où les dénivelés sont très faibles et où les vitesses d'écoulement sont quasiment nulles.

4.1. Etalonnage

Une trentaine de jaugeages a été effectuée. Le pointage des couples hauteur-débit montre qu'il n'y a pas de relation particulière avec la marée. On observe une esquisse de courbe d'étalonnage parabolique, mais la dispersion des points ne permet pas de choisir un tracé plutôt qu'un autre. Conscient des problèmes d'étalonnage que nous aurions sur cette station, il a été installé durant 1 mois, en étiage 1991, un moulinet à génératrice.

Afin d'approcher au mieux les valeurs de débit nécessaires pour le bilan hydrologique, ce matériel a été couplé avec un enregistreur potentiométrique étalonné en vitesse. On a donc obtenu la vitesse d'écoulement en un point de la section de jaugeage, ainsi que les durées et le sens du courant.

Le planimétrage des courbes de vitesse sur plusieurs cycle de marée a permis de déterminer les dérives oscillantes moyennes correspondantes, en tenant compte des parties positives et négatives :

- en vives eaux et sur un cycle de 12 h, on obtient une moyenne positive de 3850 m,
- en mortes eaux, on obtient une moyenne positive de 2 600 m.

Ces éléments permettent de proposer une correction systématique des valeurs de débits entre les cotes 6,00 et 7,40 m.

Un abattement sera donc appliqué à chaque jaugeage situé dans l'intervalle des cotes sous influence marine. Les valeurs corrigées des jaugeages, associées aux autres, permettent de construire une courbe hauteur-débit (fig. 7) qui a la forme d'un tronçon de parabole, valable entre les cotes 600 et 810 cm :

$$Q_c = (6,2581 \cdot 10^{-4})h^2 - (0,7396)h + 218,92$$

4.2. Bilan annuel

Année 1991	
débit moyen annuel 91:	5,56 m ³ /s
débit minimum journalier :	0,40 m ³ /s le 16 déc. 91
débit maximum journalier :	42,1 m ³ /s, le 3 juin 91
volume écoulé durant l'année 91:	175,3 millions de m ³
débit spécifique 91:	51,0 l.s ⁻¹ .km ⁻²
lame écoulée	1608 mm
déficit d'écoulement	716 mm

Année 1992	
débit moyen annuel 92:	3,74 m ³ /s
débit minimum instantané :	0,40 m ³ /s, le 20 sept. 92
débit maximum instantané :	18,5 m ³ /s, le 21 févr. 92
volume écoulé durant l'année 92:	118,3 millions de m ³
débit spécifique 92:	34,3 l.s ⁻¹ .km ⁻²
lame écoulée	1085 mm
déficit d'écoulement	955 mm

Année 1993	
-------------------	--

débit moyen annuel 93:	6,94 m ³ /s
débit minimum instantané :	0,40 m ³ /s, le 8 oct. 93
débit maximum instantané :	27,8 m ³ /s, le 24 mai 93
volume écoulé durant l'année 93:	218,9 millions de m ³
débit spécifique 93:	63,7 l.s ⁻¹ .km ⁻²
lame écoulée	2008 mm
déficit d'écoulement	919 mm

On remarquera que le débit moyen annuel en 1993 est presque le double de celui de 1992, année à faible pluviosité. Par contre, le débit minimum est le même pour les trois années : ceci confirme qu'en étiage le débit est soutenu par la vidange des marais amont, et d'une façon régulière puisque la même cote à été observée ces trois dernières années.

En aval des savanes et marais où les déplacements de masse d'eau ne sont pas mesurables (station de Soumourou, corrélation des hauteurs avec la station du pont, fig. 8), les écoulements sont observables à partir du point A jusqu'au pont de la RN1. En étudiant les hydrogrammes de 1992, en septembre et octobre, pendant lesquels la pluviométrie est quasiment nulle, on peut estimer que le volume d'eau déstocké par rapport aux effets de la marée est de 1 Mm³, auxquels s'ajoutent 2 Mm³ du débit de base, soit un total de 3 Mm³.

Conclusions

Les résultats de l'étude hydrologique de deux bassins-versants et de certains paramètres de la qualité de l'eau de la Karouabo permettent de quantifier les apports continentaux aux zones humides de la plaine côtière récente, d'avoir une bonne estimation des volumes d'eau transférés dans ces systèmes, et de caractériser les crues et les étiages de cette rivière dans des situations pluviométriques annuelles variées.

L'année 1993 peut être considérée comme représentative d'une année moyenne. Il est cependant nécessaire de poursuivre ces mesures afin d'atteindre l'observation d'années particulières ou de phénomènes événementiels plus extrêmes.

Les missions de terrain ont permis de constater que les zones humides et les marécages étaient très largement distribués et que leur fonctionnement n'est pas connu actuellement. Certaines questions se posent quant à la dynamique de ces écosystèmes :

- Dans ces zones humides, quels sont les volumes réellement mis en jeu dans le bilan hydrique ? Certaines zones ont-elles un rôle particulier au regard des apports extérieurs et de la circulation des eaux ? Peut-on identifier des fonctionnalités propres aux marais en fonction du type de végétation et de leur situation par rapport aux barres pré-littorales ? Quel est le fonctionnement hydrogéologique ?

- A l'extérieur des zones humides, en termes d'entrées/sorties, quelles sont les parts respectives de l'apport en eau douce des bassins-versants, de la pluviométrie et de l'océan ? Existe-t-il des seuils de débits, de pluie et de coefficients de marée pour lesquels on observerait des processus évolutifs des marais complètement opposés (du tanne vif à la végétation dense) ?

- Quelle est l'incidence des modifications rapides du littoral ?

L'utilisation des données satellite nous a permis de mieux préparer l'investigation de terrain et de cibler les zones d'intérêt. Afin de continuer ces prospections, il serait souhaitable de disposer à l'avenir d'un moyen de déplacement motorisé et amphibie permettant de parfaire les "réalités de terrain" nécessaires à l'interprétation des données, dont le trajet serait visualisé sur un micro-ordinateur portable et positionné en permanence au GPS.

Les données optiques devraient apporter l'information souhaitée pour mener à bien une typologie des marais en s'appuyant sur les études botaniques. Les données radar, bien que particulières à interpréter en termes de thématique classique, nous offrent une description des paysages et de leurs structures tout à fait originale et nouvelle dans des milieux de savane où les conditions hydriques évoluent rapidement à l'échelle du mois.

Références

- Fritsch, J.M. (1992). Les effets du défrichement de la forêt Amazonienne et de la mise en culture sur l'hydrologie de petits bassins-versants. Opération ECEREX en Guyane française. Col. Etudes et Thèses. ORSTOM éd.
- Grimaldi C., Sarrazin M. (1993). Composition chimique des eaux des rivières Karouabo et Passoura. Rapport ORSTOM / CNES, n° 89/2621. mult. 60 p.
- Grimaldi, C. (1988). Origine de la composition chimique des eaux superficielles en milieu tropical humide : exemple de deux petits bassins sous forêt en Guyane. Sc. Géol., Bull., Strasbourg, 41, 3-4, 247-262.
- Lointier, M. (1993 a). Variations saisonnières et flux de quelques éléments majeurs dans trois rivières de Guyane Française. Colloque Grands bassins fluviaux péri-atlantiques CNRS - INSU - ORSTOM. Coll. Colloques et Séminaires. ORSTOM Ed.
- Lointier, M. (1994 a). Etude hydrologique des bassins-versants de la Karouabo et de la Passoura. Contrat CNES n° 2621 / ORSTOM. Lot 3 Rapport sur les conséquences des rejets gazeux sur l'environnement. Cayenne. Mult. 86 p.
- Lointier, M. (1990). Evolution de la qualité des eaux et dynamique de l'intrusion saline dans l'estuaire du Sinnamary. Contrat EDF - CNEH / ORSTOM. Cayenne. Mult. 81 p.
- Roche, M.A. (1982). Comportements hydrologiques comparés et érosion de l'écosystème forestier amazonien à Ecerex, en Guyane. Cahiers ORSTOM, série hydrol., vol- XIX, n°2, 1982,81-114.
- Verlet, E. (1989). Vingt années de mesures météorologiques au Centre Spatial Guyanais. Direction technique, division support mesures, dép. lab. spé., section météorologie. mult. 100 p.

ANNEXE 9

Indications sur le radar imageur ROS (Radar à Synthèse d'Ouverture)

Tous les radars imageurs sont aujourd'hui des ROS (Radars à Synthèse d'Ouverture), par rapport aux RAR (Radars conventionnels à Antenne Réelle : fig. 1).

Le principe du ROS conserve la résolution radiale (r_r) du RAR. Par contre, la résolution azimutale (r_a) est améliorée en simulant une antenne virtuelle plus longue que l'antenne réelle, en utilisant le déplacement du vecteur.

Un point du sol sera vu durant un certain temps par l'antenne réelle, et N fois par l'antenne sous différents angles (fig. 2). Chaque mesure de rétrodiffusion au point P sera affectée par un décalage en fréquence (effet Doppler) qui sera exploité pour la constitution de l'image.

Il en résulte que la résolution azimutale (r_a) d'un ROS vaut la moitié de la longueur d'onde de l'antenne et qu'elle est indépendante de la distance à la cible.

ANNEXE 10

Classification de Cowardin et al. (1979)

1. Milieus d'eau saumâtre

1.1 Marin	Subtidal	eaux peu profondes permanentes, prof. < 6 m à marée basse, dépourvue de végétation, y compris baies marines et détroits végétation marine subtidale ; y compris lits de varech, herbiers marins, prairies marines tropicales. récifs coralliens
	Intertidal	rivages marins rocheux, y compris falaises et côtes rocheuses plages de sables et galets vasières et bancs de sable ou de terres salées intertidaux, dépourvus de végétation sédiments intertidaux recouverts de végétation, y compris marais salants et mangroves sur les côtes abritées
1.2 Estuarien	Subtidal	eaux d'estuaires, eaux permanentes des estuaires et des systèmes estuariens de deltas
	Intertidal	vasières, bancs de sable ou terres salées intertidaux, à végétation éparse marais intertidaux, y compris marais salants, prés salés, schorres, marais salants exondés, marais cotidaux saumâtres et d'eau douce zones humides boisées intertidales, y compris marécages à mangrove, marécages à palmier Nipa, forêts marécageuses cotidales d'eau douce
1.3 Lagunaire		lagunes saumâtres à salées, reliées à la mer par chenaux étroits
1.4 Lacs salés		lacs, zones inondables et marais permanents et saisonniers, saumâtres, salés ou alcalins

2. Milieux d'eau douce

2.1 Alluvial	Pérenne	rivières et cours d'eau permanents ; y compris cascades deltas intérieurs
	Temporaire	riv. et cours d'eau saisonniers et irréguliers plaines alluviales ; y compris bassins fluviaux inondés, prairies inondées à la saison.
2.2 Lacustre	Permanent	lacs d'eau douce permanents (> 8 ha) ; y compris rivages sujets à inondation saisonnière ou irrégulière étangs d'eau douce permanents (< 8 ha)
	Saisonnier	lacs d'eau douce saison. (>8 ha) ; y compris lacs de plaine d'inondation
2.3 Palustre	Emergent	marais et marécages d'eau douce permanents sur substrat inorganique, avec végétation émergente, dont la base est sous la surface piézométrique pendant la majeure partie de la saison de croissance au moins marécages d'eau douce tourbeux permanents ; y compris marécages des hautes vallées tropicales à végétation dominée par Papyrus ou Typha marais d'eau douce saisonniers sur substrat inorganique ; y compris fondrières, marmites torrentielles, prairies inondées à la saison, marais à lâches et dambos tourbières ; y compris fondrières acidophiles, ombrogènes ou solinogènes, recouvertes d'une végétation à base de mousses, graminées ou buissons nains, et fagnes de tous types zones humides alpines et polaires ; y compris prairies inondées à la saison et maintenues humides par les eaux temporaires de la fonte de neige sources d'eau douce et oasis avec végétation attenante zones humides volcaniques continuellement humidifiées par la condensation des vapeurs d'eau émergentes
	Boisé	marais à broussailles ; y compris marais d'eau douce dominés par des buissons, saulaies, aulnaies, sur sol inorganique forêt marécageuse d'eau douce ; y compris forêt à la saison inondée, marais boisé, sur sol inorganique tourbières boisées ; y compris forêts marécageuses sur tourbière

3. Zones humides artificielles

3.1 Aquaculture / mariculture	étangs d'aquaculture
3.2 Agriculture	étangs ; y compris agricoles, pour bétail et petits réservoirs terres irriguées et canaux d'irrigation ; y compris rizières, canaux et fossés terres arables inondées à la saison
3.3 Exploitation de sel	marais salants, salines
3.4 Urbain/industriel	excavations ; y compris gravières, ballastières, bassins d'eaux usées des mines traitement des eaux usées ; bassins d'épandage, décantation, oxydation
3.5 Stockage des eaux	réservoirs pour irrigation et consommation, avec baisse saisonnaire du niveau& retenues de barrage hydroélectriques avec fluctuations régulières (hebdomadaires ou mensuelles) du niveau

ANNEXE 11

(en collaboration avec B. Cappelaere)

Apports du bassin-versant de la Karouabo à une zone humide aval. Modélisation de la relation pluie/débit

Dans une optique de connaissance et de gestion des zones humides côtières de tout le littoral de la Guyane, il est important de disposer d'une modélisation pluie/débit au pas de temps journalier, sur le bassin-versant alimentant la zone humide. En effet, on dispose en général des séries pluviométriques sur les postes du littoral, mais pas toujours des débits. La modélisation proposée permettra de combler des lacunes de mesures sur les zones instrumentées, sur cette zone géographique, et de valoriser des séries pluie/débit anciennes.

Le choix d'un modèle hydrologique analytique et surtout son utilisation sont d'une mise en oeuvre assez complexe, qui dépend de nombreux paramètres selon la zone géographique, le pas de temps choisi, etc. Afin de demeurer dans une logique opérationnelle, nous avons voulu réaliser une approche de type "apprentissage par l'exemple", dans deux cas : modélisation linéaire (régression multiple) et modélisation non linéaire (réseau de neurones).

1. Recherche de sensibilité par modèle linéaire (régression progressive ascendante)

Une série de 1000 jours consécutifs de données pluie/débit sur le bassin-versant de la Karouabo a été utilisée pour l'apprentissage (700 premiers jours) et la validation (300 derniers jours).

La première opération a consisté à faire une recherche de sensibilité des débits à la pluie des j_i jours précédant le jour j_0 (i variant de 1 à 19) par une régression progressive ascendante (Draper N. & Smith. H., 1981). Cette méthode recherche itérativement, dans l'ensemble des variables choisies (ici les 20 jours précédant le débit), celles qui sont les plus explicatives du débit. A chaque itération, une variable supplémentaire est retenue et on recalcule le jeu de coefficients. La courbe des coefficients de la fonction de transfert ainsi obtenue (fig. 1) représente un hydrogramme unitaire. Son analyse montre que les pluies des jours $j-3$ à $j-5$ expliquent une grande partie des débits mesurés. On constate un palier de $j-6$ à $j-12$ qui peut encore être considéré comme explicatif, puis un second palier au-delà de 13 jours. Ces deux paliers permettent de réduire la dimension du modèle en prenant les valeurs de pluie hebdomadaire pour ces deux périodes successives. Les pluies des jours $j-1$ et $j-2$ n'apparaissent pas.

Il était intéressant de tester une modélisation linéaire par rapport à la suite de la démarche : en effet, dans la modélisation non linéaire par réseau de neurones, on ne disposera pas d'information explicite sur l'importance des variables et les réductions possibles du modèle. On utilisera donc le jeu réduit de variables ainsi identifiées comme point de départ pour constituer les entrées du modèle neuronal.

2. Réseau de neurones (modèle non linéaire)

Aux variables d'entrée ci-dessus il est ajouté une fonction trigonométrique de la date Julienne, modulo 365 jours, pour positionner le jour j dans le cycle annuel, au cas où il existerait une incidence forte de la période de l'année sur la relation pluie/débit. La structure du réseau est de type "perceptron multi-couche" à 2 couches "cachées", comportant respectivement 6 neurones pour la première et 3 neurones pour la seconde. L'apprentissage est réalisé par l'algorithme de rétropropagation du gradient.

Premiers résultats

L'analyse journalière montre que les écarts entre les valeurs prédites et observées (fig. 2) sont parfois de forte amplitude, ce qui n'est pas surprenant dans le contexte choisi et le pas de temps journalier. De plus, le pluviomètre de référence est situé à une dizaine de km du centre du bassin de la Karouabo.

La moyenne des écarts (positifs et négatifs) sur la période des 300 jours de validation est proche de zéro : ceci montre que le modèle n'a pas de biais.

La figure 3 présente le résultat de l'apprentissage sur la série de 700 jours. La figure 4 présente la validation sur les 300 derniers jours. Celle-ci est relativement satisfaisante dans la définition des crues de saison des pluies. Par contre, on notera une évaluation des débits incorrecte, après des périodes de plusieurs jours sans pluie, pendant la saison sèche. Ceci montre qu'il conviendrait d'ajouter un coefficient d'humectation du sol comme variable d'entrée, mais qu'il faudrait pondérer par une caractéristique morphologique, comme l'extension des surfaces en savane du bassin-versant (annexe 8).

L'approche par réseau de neurones au pas de temps choisi montre que cette approche est acceptable dans la logique opérationnelle que nous nous sommes fixée. On obtient en effet une bonne prévision événementielle sur les dates des crues, mais il demeure une incertitude sur leur amplitude, surtout après les périodes de saison sèche. L'absence de biais de ce modèle permettra de réaliser des bilans quantitatifs mensuels ou annuels satisfaisants.

Tropical wetlands hydrology and contribution of remotely sensed data to integrated coastal planning. French Guiana case studies.

Hydrological tropical wetlands studies are fundamental for understanding these systems, otherwise targeted by anthropic transformations. In French Guiana, it has been largely used of remote sensing data confronted with hydrological data and ground truth to widen this knowledge by taking account the need of information by stakeholders, in charge of environmental management.

Wetlands hydrological analysis need a estimation of water balance components and a knowledge of oceanic effects. French Guiana case studies are analysed through different examples of the literature.

Then, it is shown how optical remote sensing data (Spot, Landsat) and radar data (ERS1, JERS1) give a spatialized knowledge in water quality, wetlands surface temperature and humidity.

Principles and properties of integrated management approach are discussed and used in guiana's cases. It is shown the necessity to have a global approach to describe the functioning of the system watershed - wetlands.

A generic coastal watershed classification is obtained and tested by modelisation. Crossed with hydrological mapping information, an hydrological wetlands functioning document is proposed.

Results of this approach is integrated in a pluridisciplinary concept for mapping intrinsic vulnerability of wetlands and coastal watersheds, essential in integrated coastal planning management.