

LA « TERRE NUMERIQUE » : ENJEU POUR L'HYDROLOGIE ? EXEMPLE D'APPLICATION SUR LES ZONES HUMIDES DE GUYANE.

Marc LOINTIER¹

IRD, Maison de la Télédétection
500 rue J. F. BRETON, 34093 Montpellier
E-mail : lointier@teledetection.fr

Résumé

La gestion des ressources hydriques et la qualité de l'eau sera un problème majeur de notre société dont la consommation globale était de 54% de l'eau disponible sur terre en 1995 et qui sera proche de la ressource pour certaines régions comme l'Afrique du Nord, le sud de l'Asie en 2025. Dans ce domaine spécifique des ressources en eau, il s'ajoute un problème de quantification de la ressource par les mesures traditionnelles (réseaux de limnigraphes) qui disparaissent progressivement, faute de moyens, principalement en Afrique. Dans ce cas, l'utilisation des techniques spatiales sera le seul recours du gestionnaire pour évaluer sa ressource et la localiser. Il est proposé dans cet article de distinguer l'approche purement « physique » du signal, d'une approche orientée vers les « indicateurs indirects » qui peuvent offrir l'occasion de mettre en œuvre de nouvelles recherches méthodologiques. Après un bilan très synthétique de l'utilisation actuelle des données satellitaires en hydrologie et des problèmes qui en résultent, un cas concret d'approche hydrologique spatialisée, sur la base « d'indicateurs » est présenté sur les zones humides de Guyane. Une approche systémique permet d'intégrer une cartographie des différentes zones fonctionnelles, sur la base de la connaissance du terrain, des mesures hydrologiques traditionnelles de débits et des techniques spatiales.

Mots clés : gestion des ressources en eau, zones humides tropicales, indicateurs spatialisés, télédétection, Guyane.

Abstract : *The "Digital Earth" : an opportunity in hydrology? An application in the humid regions of French Guiana*

To respond to social demands is one of the traditional missions of any organisation working with its partners in the field in tropical regions. Such activity can generate new scientific questions in which space-borne techniques may play an important role. Water quality and the management of water resources will form a major problem for our society, whose global consumption used 54% of available water in 1995 and which will be close to using the entire resource in certain regions such as North Africa and South Asia by 2025. In this specialised field of water resources there is an additional problem in the quantification of the resource by traditional measurements, as river gauging networks are gradually disappearing due to lack of funding, especially in Africa. In this situation the use of space-borne techniques may be all that is available to the water resources manager to evaluate his resource and to locate it. In this article it is proposed to make a rapid assessment of the use of remote sensing data in hydrology and of the problems encountered. A specific example of a space-borne approach to hydrology in the humid regions of French Guiana is described, which demonstrates the value of space-borne techniques in the understanding of the hydrology of such environments.

Keywords : *water resources management, tropical wetlands, spatialized indicators, remote sensing, French Guiana*

1. Introduction

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

En termes de variations temporelles, l'hydrologie, science de l'eau, est étroitement dépendante du climat : les études en Guyane montrent par exemple, une variation des débits moyens inter-annuels du simple au

triple sur 45 années de mesures. C'est dire l'importance des séries chronologiques de longue durée (50 ans ou plus) pour connaître la variabilité de la ressource, mais aussi pour situer une nouvelle étude dans son contexte temporel ou pour dimensionner un ouvrage hydraulique.

En terme de variations spatiales, il y a fort longtemps que l'on constate la difficulté de transposer les résultats d'un bassin bien instrumenté et modélisé, vers des bassins voisins peu mesurés.

Liant ces aspects spatial et temporel, les bilans hydrologiques globaux se réalisent sur la base des mesures nationales (frontières politiques) qui introduisent un biais pour leur régionalisation. Les frontières politiques sont rarement des lignes de crête (partage des eaux), mais plutôt un fleuve ou une rivière, entraînant le partage du bassin versant par plusieurs pays (et donc un partage des usages et de la gestion).

¹ M. Lointier est Vice Président de la commission Internationale de télédétection de l'AISH (association internationale des sciences hydrologiques)



Depuis trente ans maintenant, la communauté scientifique dispose de données originales, à différentes résolutions spatiales et spectrales qui nous permettent d'avoir accès à des séries temporelles de données, et sur toutes les régions du globe.

C'est sur ce concept de « Terre numérique » (« Digital Earth » - Gore, 1999) que nous allons essayer de faire un point rapide sur les techniques spatiales en hydrologie et l'illustrer par un exemple de démarche spatialisée sur les zones humides de Guyane.

2. Rappel des enjeux

« La disponibilité d'eau douce est l'un des plus grands problèmes auxquels est confrontée l'humanité aujourd'hui. Les régions du globe menacées de pénurie sont de plus en plus nombreuses. Alors qu'une population en augmentation constante exige d'avantage d'eau, cette ressource finie doit également répondre aux besoins de toute autre forme de vie (...) Nous souhaitons inviter les services hydrologiques nationaux, les institutions scientifiques (...) à prendre les dispositions nécessaires pour élaborer des plans concrets et prospectifs, suivis de stratégies de mise en oeuvre, pour contribuer efficacement à des évaluations nationales et régionales des ressources en eau (...) »

Ce texte co-signé par les Présidents de l'OMM et de l'UNESCO, nous rappelle que le scientifique est impliqué de plus en plus dans des démarches visant à répondre à une demande sociale qui peut être, elle-même, génératrice de questionnement scientifique.

2.1. Les enjeux en quelques chiffres (Shiklomanov, 1997)

Les bilans globaux indiquent qu'il existe 2,24% d'eau douce non disponible sous forme de glace et 0,26% d'eau accessible, le reste étant la grande masse océanique (97,5%).

Dans ce pourcentage d'eau accessible, on estime à 42600 km³ la valeur des écoulements/infiltration annuels sur terre. Néanmoins, cette ressource n'étant pas accessible toute l'année, on conservera une valeur moyenne des écoulements de base (estimé par certains auteurs à 37%) soit un volume annuel de 15800 km³. Une autre évaluation basée sur les capacités de stockage naturelles et anthropiques abaisse cette valeur à 9000 km³ annuels. Il a été calculé que le prélèvement global (incluant le retour aux rivières après utilisation) était de l'ordre de 3800 km³ en 1995.

Il est prévu 5200 km³ en 2025, sachant que 70 % de cette eau est destinée à l'irrigation, 20% aux usages industriels et 10% pour les usages domestiques. Il est

évident que des ordres de grandeur aussi proches du disponible sont préoccupants quand on connaît l'inégalité de la répartition géographique de l'eau dans le monde.

2.1.1. Ressource mondiale : sa variabilité temporelle

On observe une variation de l'ordre de 10 % du volume annuel sans tendances ni cycles décelables par les méthodes statistiques, ce qui rend impossible, dans l'état actuel des connaissances de réaliser des prévisions précises, nécessaires à la gestion de l'eau.

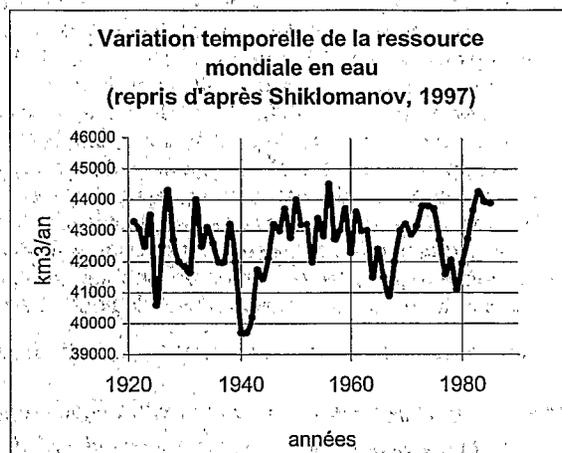


Figure 1 : Variabilité temporelle de la ressource en eau mondiale (Shiklomanov, 1997)

2.1.2. Ressource mondiale : sa variabilité spatiale

On considère que le seuil de stress hydrique est atteint quand un pays dispose de moins de 1000 m³ d'eau par an et par habitant, toutes activités confondues. La Banque mondiale estime que 80 pays, soit 40% de la population mondiale, souffrent de pénurie d'eau. Une situation aggravée pour 26 pays et 232 millions d'habitants, avec de grandes difficultés d'approvisionnement. C'est le cas de 9 des 14 pays du Proche-Orient (Figure 2).

2.2. Courbes de prévision de la consommation

Si la variation inter-annuelle de l'eau accessible est difficilement prévisible, l'augmentation de la population qui la consomme suit des lois de croissance qui sont mieux connues. Ainsi, la figure 3 présente des simulations à partir de données de 1990 et jusqu'en 2025 selon deux sources différentes. On rend compte ici plutôt d'un modèle économique de croissance où il est important d'analyser le poste le plus consommateur d'eau : l'irrigation pour l'agriculture.

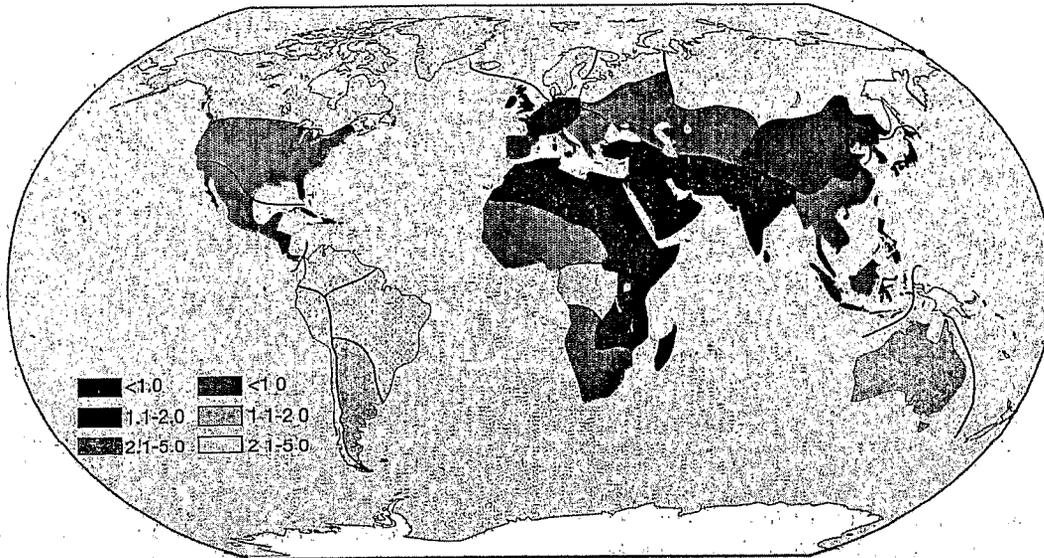


Figure 2 : Variabilité spatiale de la ressource mondiale : prévisions 2025 (Shiklomanov, 1997)
Cartographie du disponible en millier de mètres cubes par an et par habitant

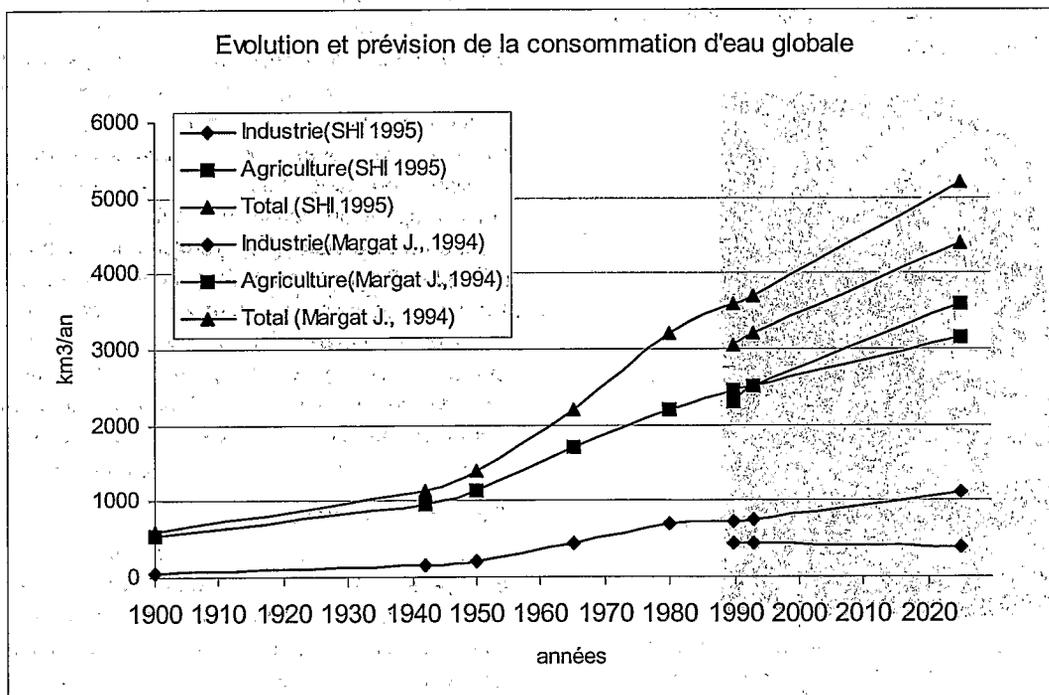


Figure 3 : Estimation de la croissance de la consommation d'eau selon deux références entre 1900 et 2030 (d'après Shiklomanov, 1997).

2.3. Les moyens de l'évaluation de la ressource

Actuellement les seules méthodes d'évaluation sont les bilans annuels effectués à partir des mesures nationales de chaque pays. Il est utilisé un dispositif de stations de mesures de hauteurs d'eau dont la relation hauteur / débit est de bonne qualité et qui constitue le « réseau hydrométrique ». L'ensemble des stations comportant de longues séries de mesures appartient à ce réseau hydrométrique national. Celui-ci est souvent doté d'observations depuis environ 50 ans.

Plusieurs problèmes nuisent à la qualité des données de base provoquant des lacunes de mesures toujours difficiles à gérer lorsque l'on s'intéresse à des bilans inter-annuels et à l'évolution temporelle des phénomènes. Ces problèmes sont soit d'ordre technique (pannes, vandalisme), soit concernent la collecte et la diffusion des données vers le milieu scientifique. Nous avons identifié les quatre aspects suivants :

- Manque de moyens : problème fréquent dans les pays du sud où il y a d'autres priorités

économiques, le réseau hydrométrique peut être laissé à l'abandon.

- Mauvaise perception du besoin par les acteurs sociaux : dans les pays où les PNB sont plus élevés, les services hydrologiques ont des difficultés à convaincre leurs bailleurs de fond de préserver un réseau de mesure dont on ne voit pas l'utilité immédiate.
- Mauvaise analyse économique : donnée brute, donnée élaborée. Dans certains pays du Nord, il peut être demandé aux services hydrologiques de définir un « produit » dont on détermine un coût, forcément arbitraire, puisque déjà pris en charge par les services gouvernementaux. La donnée brute est donc commercialisée.
- Donnée stratégique confidentielle : c'est le cas par exemple des pays du Moyen-Orient, où la ressource en eau devient un enjeu national et stratégique.

Sans identifier l'une ou l'autre des raisons évoquées plus haut, l'étude de la ressource en eau mondiale (Shiklomanov, 1997) n'a pu utiliser que 2500 limnigraphes sur les 38 600 recensés.

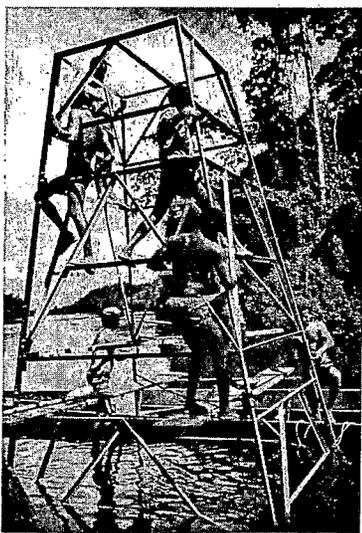


Figure 4 : Montage d'une tour limnigraphique à Langatabiki (fleuve Maroni) en Guyane. Station appartenant au réseau hydrométrique depuis 1950 (photo M. Lointier).

Devant ce constat, les techniques spatiales deviennent dans bien des cas incontournables, parce qu'elles sont les seules à pouvoir apporter une information utilisable temporellement et spatialement : certes, nous sommes encore loin de la représentation des débits, mais certaines méthodes utilisant la recherche d'indicateurs indirects proposent des bilans sur la base d'apprentissages à partir de données connues du passé. On utilise dans ce cas l'imagerie satellitale et des informations exogènes permettant une fusion des données avec les outils SIG. Ce type d'approche se multiplie (Kovar, 1996 ; Baumgartner, 1997), et on pourrait les classer sous le concept d'approche spatialisée au sens « indicateurs ».

Une autre attitude scientifique a prévalu ces dernières années, avec plus ou moins de succès : l'approche « physique » ou l'on tente de retrouver un paramètre hydrologique à partir d'une relation (à établir) avec le signal physique. Il s'agit principalement des deux paramètres, humidité et évapotranspiration. Deux écueils majeurs apparaissent, l'un dans le domaine de l'hétérogénéité des échelles spatiales qui est peu maîtrisé (Raffy, 1994 ; Puech, 2000) vis-à-vis du contrôle terrain ponctuel utilisé pour ces paramètres (sonde à neutrons, tensiomètre, lysimètre...), l'autre, tout aussi fondamental, concerne la « substitution » de grandeurs physiques ponctuelles (température dans les équations de thermodynamique par exemple) par un flux mesuré par le satellite (Gineste, 1998 ; Trouffleau, 1996).

Malgré ces problèmes à résoudre ou à contourner - et c'est bien là l'activité du scientifique - l'approche spatialisée a, d'emblée, le mérite de pouvoir proposer une information régionale, en évitant la limite spatiale d'une nation qui ne gère, bien souvent, qu'une partie d'un bassin versant.

A partir des synthèses faites par différents auteurs sur l'utilisation des techniques spatiales (Engman, & Gurney, 1991 ; Rango, 1994 ; Ritchie & Rango, 1996, Rango & Shalaby, 1999 ; Schultz & Engman, 2000), on constate que beaucoup d'applications utilisent les satellites optiques pour la cartographie et de la physiographie du bassin versant, et le radar pour les études de la dynamique hydrologique (inondations par exemple). Parallèlement, l'approche physique concerne surtout le domaine du thermique et des micro-ondes passives et actives, afin de déterminer des paramètres tels que l'humidité et l'évapotranspiration, ce qui rend plus difficile un passage à l'opérationnel à cause de l'important savoir-faire nécessaire à la manipulation de ces données, comme il est évoqué ci-après :

2.3.1. Précipitations

La mesure directe de la pluie par satellite dans un but opérationnel n'a généralement pas été possible et cette mesure demande un contrôle terrain avec des pluviomètres ou des radars météorologiques (qui nécessitent un étalonnage puisque c'est aussi une technique de télédétection). Depuis quelques années il s'est développé des méthodes empiriques visant à caractériser les nuages dans le domaine du visible et surtout de l'infrarouge thermique et de proposer des relations entre la température du sommet du nuage, l'évolution dynamique de l'hydrométéore et la pluie au sol. Néanmoins, cette démarche ne s'applique qu'aux systèmes convectifs et demeure une méthode indirecte. Dans le spectre des micro-ondes, il a été proposé plusieurs méthodes basées sur l'interaction des gouttes avec le signal (absorption, rétrodiffusion), mais ce sont des résultats instantanés qui souffrent, dans le domaine des micro-ondes passives d'une très faible résolution spatiale. Toutes ces méthodes sont utiles pour les études climatiques, mais ne sont pas encore adaptées

à l'hydrologie opérationnelle. En résumé, il est souvent proposé des « produits » utilisant le domaine du visible et du Thermique (IRT), mais sans valeurs d'incertitude :

- Echelle globale : semaine, mois, 2 à 5° de résolution spatiale.
- Echelle du bassin versant : répartition spatiale de la pluie potentielle nécessitant le complément du réseau sol de pluviographes et/ou le radar météorologique.

2.3.2. Neige et glaciers

L'objectif pour l'hydrologue est d'obtenir l'équivalent en eau de cette précipitation solide et un modèle de fonte afin de mieux prédire les écoulements et les apports à la nappe. La cartographie et l'estimation des surfaces sont accessibles dans la quasi-totalité du domaine spectral avec plus ou moins de contraste entre les nuages et les zones sans neige pour éviter les confusions. Un modèle numérique de terrain est généralement nécessaire, et il n'y a pas encore de mesures fiables pour l'estimation de la densité et de l'épaisseur qui doivent être évaluées directement sur le terrain. Certaines conditions comme de forts reliefs ou un couvert forestier dense, rendent cette estimation des surfaces plus difficile. Certains auteurs ont pu proposer sur des bassins bien instrumentés une approche par modélisation, mais les méthodes empiriques utilisant une relation entre l'évolution de l'étendue d'un couvert

neigeux et les débits observés est encore une solution opérationnelle dans certains pays du Nord qui disposent des données satellite fréquentes et en temps réel.

2.3.3. Humidité du sol

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 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 de terrain n'est représentative que d'elle-même (Engman et Gurney, 1991).

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 1). L'avantage à souligner est la mesure "tout-temps", sans gêne par le couvert nuageux.

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.

Tableau 1 : Principales techniques utilisées pour mesurer l'humidité des sols

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 $g \cdot cm^{-3}$).

C'est aussi dans une démarche en termes relatifs et de changement d'humidité que l'on peut minimiser les effets parasites liés aux cibles. 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.

En résumé :

- Presque validé en micro-ondes passives, mais résolution spatiale encore trop faible.
- Moins bien validé en micro-ondes actives (long. d'onde > 5 cm, recherche de la valeur de la constante diélectrique du sol), mais bonne résolution spatiale (100m). Une végétation trop dense perturbe le signal par une augmentation du terme rugosité.

2.3.4. Evapotranspiration

Terme indispensable dans l'établissement de bilans, la mesure et la spatialisation de cette information, est tributaire d'une variabilité temporelle journalière. Ceci a conduit à exploiter des satellites mettant à disposition plusieurs images par jour : AVHRR (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.

Les variables télédéteectées qui permettraient de calculer l'évapotranspiration ne correspondent pas exactement aux besoins du modèle actuel du bilan d'énergie (Chehbouni et al., 1995). Il est en général proposé des estimations d'évapotranspiration qui utilisent des informations exogènes de type météorologique, des coefficients d'ajustement empiriques, 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).

On peut obtenir avec une résolution spatiale faible :

- Régionalisation de valeurs calculées (Thorntwaite, Penman...)
- Intégration aux modèles, mais mesure instantanée, problème de correction atmosphérique, et d'incohérence physique entre le flux thermique mesuré différent de la température aérodynamique utilisée dans les modèles du bilan d'énergie.

On constate que globalement ce sont les micro-ondes qui couvrent une bonne partie du potentiel des satellites en hydrologie de surface, mais il demeure deux problèmes : la résolution spatiale encore trop faible des capteurs micro-ondes passives et surtout, pour tous les types de capteurs, une réalité de terrain adaptée au contrôle d'une information spatialisée. Pour ce dernier point, certains Instituts, comme l'IRD, peuvent contribuer, par leur connaissance des thématiques et du terrain tropical, à intégrer les données originales des programmes spatiaux européens et internationaux comme Polder, ScaRab, SMOS, Pléiades, pour ne citer que les principaux.

Enfin, l'apport des techniques spatiales pourra peut-être se positionner à l'avenir dans des domaines proprement géophysiques avec des projets originaux comme l'estimation de la masse d'eau globale (surface et eau souterraine) des continents, par micro-gravimétrie (ex : projet GRACE, Gravimetry recovery and climate experiment).

3. Exemple d'application sur les zones humides de Guyane : illustration de la démarche « indicateurs indirects »

3.1. 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, comme la crevette pénéide qui est pêchée plus tard en mer. 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 crevettière, les infrastructures routières et portuaires.

Devant l'absence de données environnementales sur la zone côtière et ses difficultés d'accès, il a fallu proposer une méthode appropriée au milieu pour décrire et modéliser le fonctionnement des marais côtiers guyanais. Nous avons choisi une approche fonctionnelle et globale, s'appuyant sur des mesures hydrologiques, des campagnes de terrain et des données satellite optique (Spot, Landsat, fig. 5) et radar (ERS1, JERS1).

3.2. Schémas de fonctionnement des zones humides

Sur la base de l'ensemble des informations collectées, nous proposons une approche systémique de fonctionnement des zones humides (Lointier, 1996). Dans la figure 6, 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 et périodes de mortes ou vives eaux océaniques.

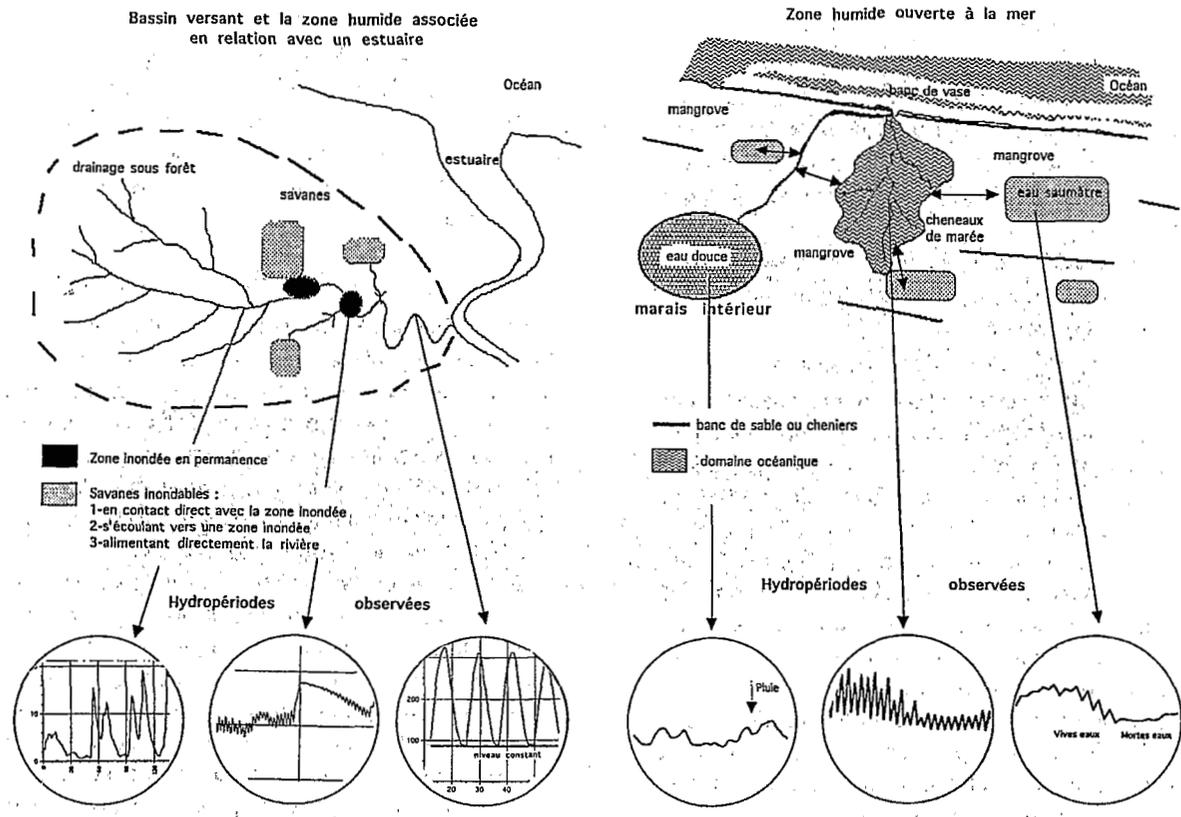


Figure 6 : Deux cas génériques de fonctionnement hydrologique des zones humides côtières de Guyane.

Code	Classe	% surface	Indice de Confinement	Indice 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 galérie, 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	Zone aménagée	0,94	1	0,94
11	drainage sur socle généralement superficiel et latéral (forêt primaire)	-	-	-

Tableau 2 : Légende du document hydro-thématique (fig 7)

3.3. Spatialisé de l'information : esquisse 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 à partir de cartographies Landsat TM, enrichies par les données multitudes radar pour obtenir une information dynamique. L'intérêt de ce document est de présenter une situation actualisée et localisée du fonctionnement des systèmes hydrologiques de la plaine côtière (fig. 6). 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 fiable.

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 faible profondeur de l'ordre de 50 cm et son étendue en font une zone hydrologique très spécifique.

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

3.4. Recherche d'indices caractéristiques du milieu

Afin de synthétiser ces informations, nous avons cherché à caractériser les milieux en fonction de leurs propriétés hydrologiques. Pour cette dizaine de classes, nous avons attribué un indice de confinement sur quatre niveaux : 1 = faible à 4 = fort, qui tient compte de deux facteurs :

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

L'extension de chaque classe a été calculée par rapport à la surface totale de la zone étudiée, mangrove comprise. Hormis les surfaces de mangrove qui varient assez rapidement, les autres surfaces demeurent stables dans le temps, à l'échelle de l'étude (5 ans).

L'indice de zone a été obtenu par le produit des surfaces relatives aux 10 classes de l'esquisse hydrologique fonctionnelle, par son critère de confinement. La classification selon la valeur de cet indice est donnée dans le tableau 2.

Par ces méthodes, on peut aborder sur des bases fiables les aspects descriptifs des zones humides et utiliser ces résultats directement pour l'évaluation d'un impact d'aménagement ou d'une pollution.

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 hydrologique ;
- établissement de concepts génériques et d'une terminologie commune à l'échelle de la zone géographique ;
- organisation de la connaissance vers un objectif d'aide à la gestion.

Cette étape de capitalisation de la connaissance hydrologique est indispensable à une 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.

4. Conclusion

En hydrologie, l'utilisation des techniques spatiales n'a pas atteint le niveau de « maturité » que l'on connaît chez les océanographes, par exemple : les paramètres hydrologiques ne sont pas accessibles directement par la mesure satellitale (à l'inverse des températures de surface de l'océan). Par ailleurs, l'utilisation de capteurs de type micro-ondes ou thermique nécessite la contribution de spécialistes du domaine, obligeant au croisement de communautés scientifiques différentes. Enfin, remarque plus générale et historique, l'essor de la technologie spatiale a largement précédé le questionnement et le besoin du scientifique, alors que celui-ci sait traditionnellement faire l'inverse, pour le plus ou moins coûteux des instruments de mesure. Fort heureusement, la prise en compte des besoins est une préoccupation des agences spatiales depuis quelques années. Ainsi la fin du 20^e siècle nous offre un paradoxe curieux : nous avons à notre disposition la richesse de cette « terre numérique » mais assez peu de savoir-faire opérationnel pour l'utiliser.

La situation d'urgence dans le domaine de la gestion de la ressource en eau, où les techniques spatiales deviennent indispensables, nous oblige dès maintenant à utiliser et valider les « produits » existants et à innover vers une recherche méthodologique originale, au risque de voir se développer un « marché de l'eau » dans un contexte de pénurie, échappant au politique, faute de données fiables.

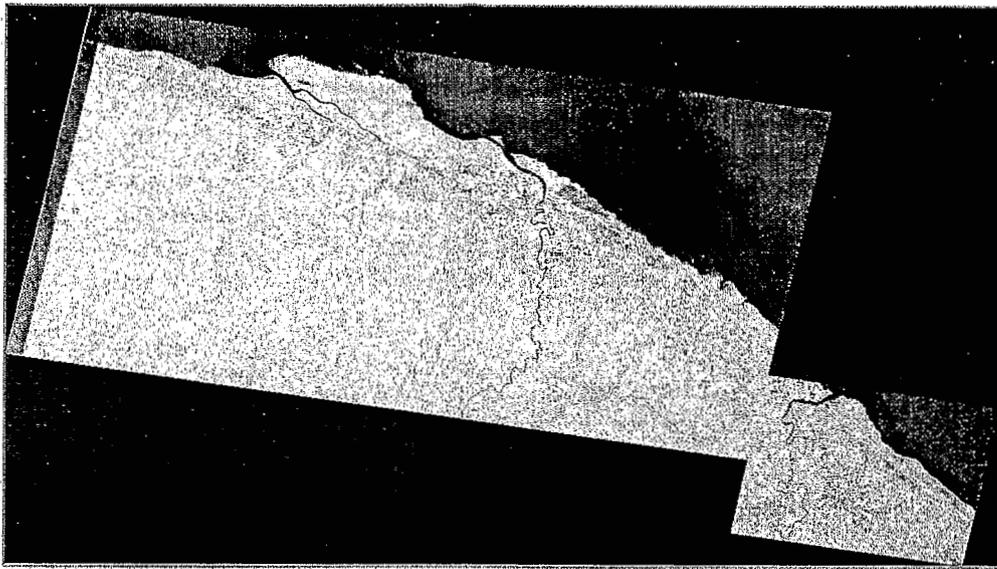


Figure 5 : Mosaïque Landsat 5 géoréférencée sur le littoral entre Kourou et Iracoubo, sur une centaine de kilomètres. En bleu, l’océan, en rouge la mangrove, en vert la forêt tropicale, en vert clair et violet les savanes et les zones humides.

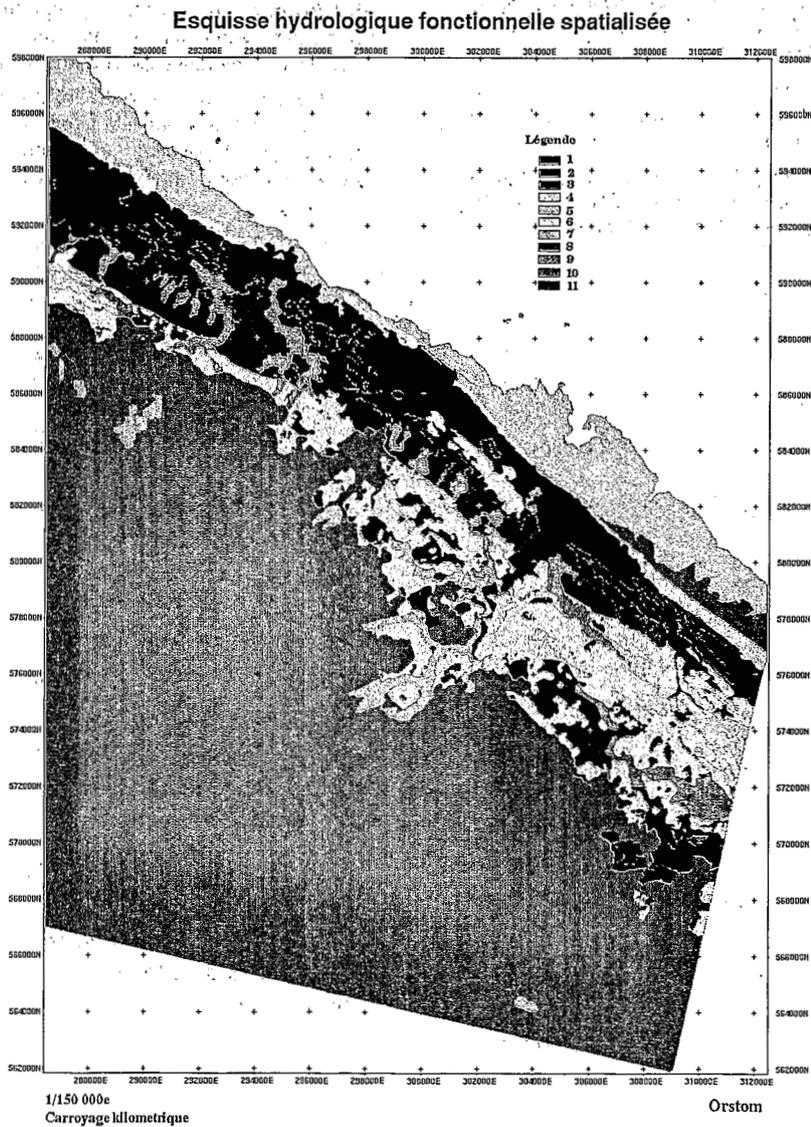


Figure 7 : Esquisse hydrologique fonctionnelle sur la région de Kourou.

Références

- Baumgartner M.F., Schültz G.A., Johnson I., (1997) Remote sensing and GIS for design and operation of water resources systems. Proceedings of Inter. Symp. Fifth Scientific assembly of AISH. Pub. N° 242.
- 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.
- Engman E.T. & Gurney R.J. (1991). Remote sensing in hydrology, Chapman and Hall, ISBN 0-412-24450-0. London.
- Gineste, P., (1998) Contribution de l'imagerie satellitale radar ERS à la détection des zones saturées et à la modélisation hydrologique d'un petit bassin versant agricole par Topmodel. Thèse de doctorat Engref, Montpellier. 224 p. +annexes.
- Gore A. (1999) The digital Earth : understanding our planet in the 21 th century. Allocution au California science center, 31 janv. 1998. Photogr. Eng. & Remote Sensing, vol 65, mai 1999, 528-530.
- Kovar K. & Nachtnebel H.P. (1996), Application of GIS in hydrology and water resources management. Proceedings of hydroGIS'96. IASH pub. N° 235.
- Lointier, M. (1996) Hydrologie des zones humides tropicales. Apport de l'information spatialisée aux problèmes de gestion intégrée. Applications en Guyane. Thèse de doctorat de l'Université P. & M. Curie (Paris VI) 300 p. avec Annexes.
- Margat, J. (1994). Les utilisations d'eau dans le monde : état présent et essai de prospective. (Contribution au projet M-13 du PHI-IV/UNESCO, Paris, 87 p.).
- 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.
- 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.
- Puech C., (2000). Utilisation de la télédétection et des Modèles numériques de terrain pour la connaissance du fonctionnement des hydrosystèmes. Mémoire de recherches présenté en vue de l'obtention d'une Habilitation à diriger des recherches. INPG, Grenoble, 26.06.2000. 83 p.
- Raffy, M. (1994) The role of spatial resolution in quantification problems : spatialization method. Int. J. Remote Sensing, vol 15, no. 12, 2381-2392.
- Rango A. & Shalaby A. (1999) Current operational applications of remote sensing in hydrology. Operational hydrology report n° 43, World Meteorological Organization. Geneva, Switzerland.
- Rango, A. (1994) Applications of remote sensing by satellite. Radar and other methods to hydrology. Operational hydrology report n° 39 WMO n°804, World Meteorological Organization. Geneva, Switzerland.
- Ritchie J.C. & Rango A., (1996) Remote sensing application to hydrology introduction. Hydrol.sci. J. 41 (4), 429-431.
- Schültz G.A. & T. Engman, (2000). Remote sensing in hydrology and water management. Springer-Verlag, Berlin.
- Shiklomanov I.A., (1997) Comprehensive assessment of freshwater resources of the world. World Meteorological Organization. Geneva, Switzerland. 88 p.
- Troufleau, D., (1996) Estimation du flux de chaleur sensible sur couverts épars par télédétection infrarouge thermique et multicapteur. Application aux zones arides et semi-arides. Thèse de doctorat Engref, Montpellier. 108 p. +annexes.