

Article

« Limnologie et télédétection : situation actuelle et développements futurs »

J. M. Jaquet

Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, vol. 2, n° 4, 1989, p. 457-481.

Pour citer cet article, utiliser l'information suivante :

URI: <http://id.erudit.org/iderudit/705039ar>

DOI: 10.7202/705039ar

Note : les règles d'écriture des références bibliographiques peuvent varier selon les différents domaines du savoir.

Ce document est protégé par la loi sur le droit d'auteur. L'utilisation des services d'Érudit (y compris la reproduction) est assujettie à sa politique d'utilisation que vous pouvez consulter à l'URI <https://apropos.erudit.org/fr/usagers/politique-dutilisation/>

Érudit est un consortium interuniversitaire sans but lucratif composé de l'Université de Montréal, l'Université Laval et l'Université du Québec à Montréal. Il a pour mission la promotion et la valorisation de la recherche. Érudit offre des services d'édition numérique de documents scientifiques depuis 1998.

Pour communiquer avec les responsables d'Érudit : info@erudit.org

Limnologie et télédétection : situation actuelle et développements futurs

Limnology and remote sensing :
present situation and future developments

J.M. JAQUET

RÉSUMÉ

La télédétection satellitaire est un outil employé couramment et avec succès en océanographie. Il n'en va pas de même en limnologie, où les applications sont encore rares.

Par le moyen d'une revue bibliographique, nous tentons d'en analyser les raisons. Après une brève description de l'outil et des satellites en service, l'on met en évidence la spécificité des cibles aquatiques, caractérisées par une réflectance basse et une profondeur d'investigation variable. Ces particularités, jointes à la composition complexe des eaux intérieures, rendent impossible l'extension pure et simple, à la limnologie, des algorithmes développés en océanographie.

Néanmoins, nous montrons que la télédétection a été utilisée dans l'étude du bassin versant des lacs, ainsi que pour la cartographie de leurs limites, de la végétation aquatique, des courants, de la thermique et de la couleur de l'eau. Des modèles empiriques, exprimant la matière en suspension ou les paramètres de qualité de l'eau, ont été calculés et appliqués avec succès dans certains lacs.

On établit ensuite une typologie des difficultés rencontrées dans l'application de la télédétection à la limnologie : intrinsèques (complexité de la composition), technologiques (capteurs actuels non adaptés aux cibles aquatiques) et institutionnels (coûts élevés et manque de professionnels de la télédétection dans les cercles limnologiques).

Finalement, l'on présente quelques propositions pratiques dans la perspective des nouveaux véhicules spatiaux et capteurs des années 90, qui devraient permettre une exploitation de l'énorme potentiel de la télédétection en limnologie.

Mots clés : *Télédétection, limnologie, océanographie, bassin versant, limnosystème, système d'information géoréférée.*

SUMMARY

Remote sensing has been used successfully in oceanography for many years, whereas applications in limnology have been comparatively modest. We attempt to discover why from a review of the literature.

After a brief description of remote sensing and of satellites in operation, we stress the specificity of inland waters targets compared with "solid" targets : low reflectivity in the visible and near infrared, complex water composition (chlorophyll, mineral suspensoids and gelbstoff which are not covariant) and the variable depth of investigation. Hence, simple chlorophyll and suspended solid retrieval algorithms, developed for type-I waters, cannot be applied to inland waters.

Nonetheless, remote sensing may be, and has been applied effectively to the study and management of drainage basins and to the mapping of lake limits, aquatic vegetation, water masses, currents, thermal structures and water colour. Site-specific, regression-type models have been computed to express suspended solid concentration and water quality parameters as functions of radiance. So far, most of the applications have been performed on large lakes (Laurentian Great Lakes, Tahoe, Chad, Biwa, Balaton, Léman), where not only LANDSAT but also CZCS and AVHRR data have been in operation.

A typology of present difficulties in applying remote sensing to limnology is proposed : intrinsic (complexity of inland waters), technological (land resource satellite bands not designed for water sensing, revisit time too long) and institutional difficulties (cost of data and equipment, and scarcity of limnologists proficient in remote sensing techniques).

Key-words : *Remote sensing, earth system science, limnology, oceanography, drainage basin, geographic information systems.*

1 - INTRODUCTION

Acceptée et pratiquée au sein de nombreuses disciplines des sciences de la terre et de l'homme, la télédétection est encore relativement peu connue des limnologues, latins en particulier.

Nous aimerions, dans cette brève revue, présenter la télédétection et ses aspects technologiques actuels dans la perspective des sciences de l'eau, examiner quelques applications limnologiques choisies et discuter les avantages et limitations de l'outil, en mettant l'accent sur le domaine du visible. Enfin, en guise d'échappée sur l'avenir, nous examinerons les développements de la technologie spatiale prévus pour les années 90 et leur incidence prévisible sur la science limnologique.

On peut définir la télédétection comme la collecte et l'interprétation d'informations de nature électro-magnétique émises par une source, et cela sans contact direct (RUSSEL *et al.*, 1986).

Quant à la limnologie, nous la considérons bien sûr comme la science des eaux intérieures, par contraste avec l'océanographie. Nous aimerions néanmoins enrichir cette définition en faisant appel à la notion de système (ODUM 1983).

Le système lacustre comprend le lac lui-même, alimenté et vidangé par des rivières, et le bassin versant. Celui-ci est constitué de sols et couvertures végétales diverses, et abrite une population animale, ainsi qu'un tissu anthropique complexe, le tout étant soumis à certaines conditions climatiques. Tous ces compartiments interagissent dans l'espace et le temps suivant des processus de transformation de matière et d'énergie. La limnologie est donc la caractérisation de compartiments (phytoplancton, phosphore, sédiments), la quantification de processus (production, broutage), mais aussi l'étude de leurs variations spatio-temporelles (GIANNINI 1986).

On conçoit donc que par sa nature synoptique, répétitive et multi-spectrale, la télédétection se présente comme un outil potentiellement intéressant pour cette limnologie "systémique". Il reste à voir dans quelle mesure la technologie actuelle des satellites et capteurs en permet l'application efficace aux sciences de l'eau.

A cet égard, on notera que les applications de la télédétection sont très nombreuses en océanographie physique et biologique (voir par exemple GOWER 1981, COLWELL *et al.*, 1983 et ESA 1987). La grande taille des océans, des types d'eau plus simples du point de vue optique et l'intérêt économique et stratégique expliquent sans doute ce succès. Ils n'excluent pas, d'emblée, l'adaptation de l'outil à des eaux intérieures (ROCHON 1975).

2 - L'OUTIL "TÉLÉDÉTECTION"

2-1 Principes

On peut résumer le mode de fonctionnement de la télédétection à

l'aide du diagramme de la figure 1, qui comprend les parties suivantes (CURRAN 1985).

TELEDETECTION

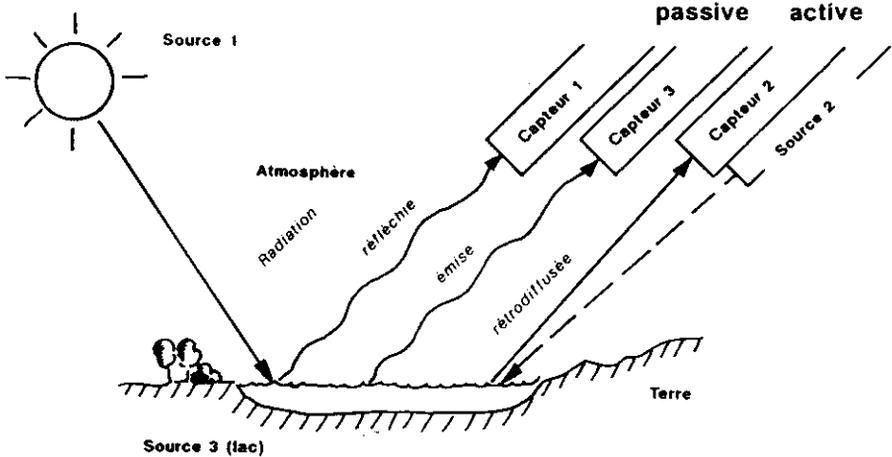


Figure 1. - Principes de la télédétection (d'après CURRAN 1985).

Figure 1. - Principles of remote sensing (after CURRAN 1985).

- Source d'énergie électromagnétique (EEM) naturelle (soleil ou chaleur terrestre) ou artificielle (ondes radar).
- Interaction avec l'atmosphère. L'EEM traversant l'atmosphère subit de nombreuses modifications et distortions. Celles-ci sont particulièrement significatives pour les cibles aquatiques, caractérisées par des valeurs faibles du rapport "signal de l'eau/signal de l'atmosphère".
- Interactions avec la surface terrestre, solide ou liquide. L'intensité et l'allure du spectre radiatif réfléchi ou émis par la cible dépend de la nature de celle-ci (DAVIES-COLLEY et VANT 1987). A un certain spectre correspond donc, théoriquement, une cible bien définie. En réalité, de multiples facteurs obscurcissent cette relation : influence atmosphérique, vagues, bandes spectrales trop larges, etc.
- Capteur. L'EEM ayant interagi avec l'atmosphère et la surface terrestre est enregistrée par une caméra ou un radiomètre, aéroportés ou placés à bord d'un satellite.

2-2 Domaines du spectre électromagnétique

Actuellement, les parties du spectre utilisables en télédétection aquatique sont le visible (0,4-0,7 μm), le proche-infrarouge (PIR, 1-3 μm), l'infrarouge thermique (IRT, 8-14 μm) et les ondes centimé-

triques (radar). Comme on peut le voir dans la tableau 1, cet intervalle couvre un domaine assez large de paramètres et applications limnologiques. On trouvera dans COLWELL *et al.*, (1983), le traitement complet des interactions entre EEM et matière.

Tableau 1. - Domaines d'utilisation du spectre électromagnétique en télédétection aquatique.

Table 1. - Domains of the electromagnetic spectrum used in aquatic remote sensing.

Domaine	Instrument	Paramètre	Applications
Visible	Spectromètre	Couleur	Chlorophylle
0,4 - 0,7 µm	CZCS LANDSAT SPOT, MOS		Turbidité Macrophytes Bathymétrie, fonds
Ir therm	Radiomètre		Thermique
8 - 14 µm	LANDSAT CZCS AVHRR	Chaleur	Courantométrie
Ondes cm.	Radar Ouv.	Relief	Vagues
23,5 cm	Synthét. SEASAT	Rugosité	Vents

2-3 Capteurs et satellites actuels

Parmi l'immense cohorte de satellites en tous genres actuellement en orbite (CASSANET 1985), seuls une demi-douzaine sont susceptibles de présenter un intérêt direct pour la limnologie (tableau 2).

En effet, l'utilisation fructueuse d'une configuration satellitaire dans le domaine de l'environnement aquatique dépend des trois facteurs suivants :

1) Résolution spatiale (taille du pixel en mètres). Un lac de 10 m de longueur échappera totalement aux radiomètres de LANDSAT, et ne représentera, au mieux, qu'un pixel en mode panchromatique SPOT. En revanche, les Grands Lacs Laurentiens sont susceptibles d'être étudiés par le CZCS de Nimbus (pixel d'environ 800 m) aussi bien que les océans (MORTIMER 1988).

2) Résolution spectrale. Les spectres de réflectance des eaux naturelles dans leur partie visible présentent des pics parfois étroits, mais néanmoins significatifs quant à leur composition (BRICAUD et SATHYENDRANATH 1981, GRASSL et DOERFFER 1986a, p. 2). Hormis le CZCS, dont les bandes relativement étroites (20 nm) ont été spécialement choisies pour l'étude des eaux océaniques (HOVIS *et al.*, 1980), les autres satellites terrestres tels que LANDSAT ou SPOT ont été conçus pour des applications terrestres (bandes de 60 nm et plus). Leur résolution spectrale n'est donc pas optimale pour l'étude de la composition des eaux de surface.

3) Fréquence de passage. Une règle générale ressort des chiffres du tableau 2 : les satellites à basse résolution (AVHRR et CZCS) ont des fréquences de passage de l'ordre de quelques jours, alors que celles de LANDSAT, SPOT et MOS-1 atteignent deux à trois semaines. Il faut aussi relever que cette fréquence nominale est rarement atteinte du fait de la couverture nuageuse. Un suivi idéal de la dynamique lacustre nécessiterait un pas de l'ordre de la journée. Actuellement, sous nos latitudes, deux à quatre scènes LANDSAT sans nuages (185 x 170 km) sont pratiquement disponibles chaque année pour étude.

Tableau 2. - Caractéristiques simplifiées des satellites et capteurs actuels utilisables en sciences de l'eau.

Table 2. - Characteristics of current sensors and satellites used in water science.

Satellite	LANDSAT		SPOT		MOS-1		NIMBUS	NOAA	SEA-SAT ²
Capteur	MSS	TM	HRV pan spect		MESSR	VTIR	CZCS ¹	AVHRR	
Résolution (m)	80	30 120 ⁴	10	20	50	900 2700 ⁵	800	1100	25 (SAR)
Visible	2	3	1	2	2	1	4	1	1
Proche IR	2	2		1	2		1	2	
IR therm.		2				3	1	2	1
Radar									8
Fréq. passage nominale (jours)	16	16	26 2 avec tilt ³		17		6	1	2

Voir commentaire dans le texte. D'après CASSANET (1985), COLWELL *et al.*, (1983) et EMDUP (1987).

- 1 A fonctionné d'octobre 1978 à mi-1987.
- 2 A fonctionné de juillet à octobre 1978.
- 3 COURTOIS (1984).
- 4 Bande 6 (IR thermique).
- 5 Bandes IR thermique et 6-7 μm .

De l'examen de ces trois critères, il ressort qu'actuellement, c'est la configuration LANDSAT TM qui est la mieux adaptée aux applications limnologiques. Elle permet en effet l'étude conjuguée de la couleur et de la thermique de l'eau à une résolution spatiale suffisante, et cela plusieurs fois par an. Il faut ajouter que les données sont bien commercialisées et présentées sous des formats variés (scènes entières ou fractionnées jusqu'à 15 x 15 km), donc à un coût raisonnable.

Pour certaines applications nécessitant une haute résolution spatiale, telle que cartographie de la houle ou des fonds, SPOT peut donner des résultats intéressants (CNES 1988, p. 1035-1151).

2-4 Cibles terrestres et aquatiques

Dans l'examen des applications de la télédétection à l'étude du limnosystème, il convient de distinguer les cibles terrestres (bassin versant) et aquatiques. Alors que les premières donnent une réponse forte dans une bonne partie du spectre, celle de l'eau est beaucoup plus faible et plus lacunaire (figure 2).

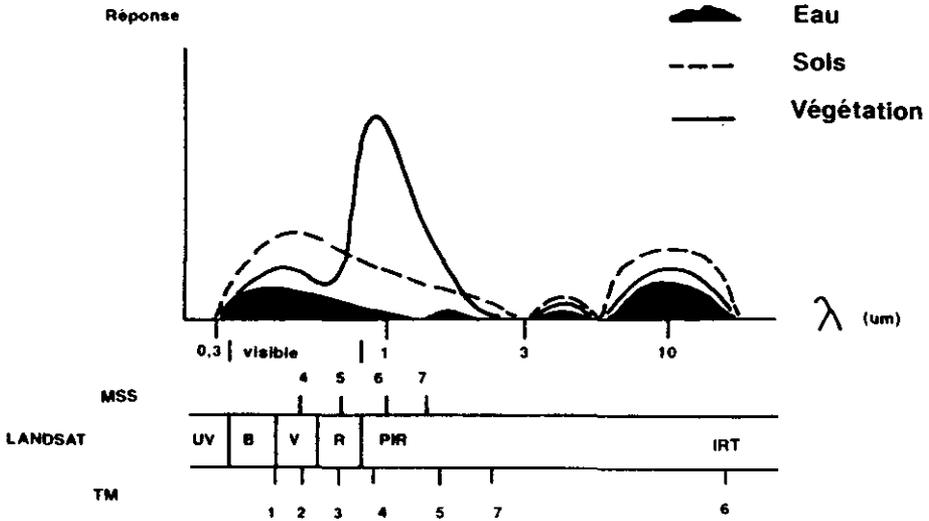


Figure 2. - Réponse spectrale des diverses cibles (document GRID).

Figure 2. - Spectral response of various targets (document UNEP/GRID).

L'étude des caractéristiques d'un bassin versant fait appel aux méthodes classiques de la télédétection terrestre, qui vise à évaluer et classifier l'occupation du sol (voir quelques exemples plus loin). Nous mettrons ici l'accent sur les cibles aquatiques, beaucoup plus difficiles à aborder. Elles comprennent les océans (large et zones côtières), les lacs (limite inférieure de taille 100 m), les rivières majeures (largeur minimale 60 m) et les zones humides (tableau 3).

Le signal émanant d'une cible aquatique est complexe, car il résulte de la contribution combinée de l'eau, des substances dissoutes et particulaires, ainsi que du substrat sédimentaire dans certains cas (KIRK 1983). En effet, en contraste avec la surface terrestre solide, le signal est affecté par une épaisseur variable de la colonne d'eau, fonction de la longueur d'onde du rayonnement et de la transparence de l'eau (GORDON et McCLUNEY 1975). Ainsi, la profondeur de pénétration varie-t-elle, pour des eaux relativement transparentes (profondeur Secchi $H_s > 5$ m), entre 8 m pour la bande TM1 et moins de 1 m pour la bande TM4 (proche infra-rouge). Pour des eaux très turbides ($H_s < 1$ m), la pénétration est inférieure au mètre dans toutes les bandes (JAQUET, in KAPETZKI *et al.*, 1987).

Tableau 3. - Domaines d'applications physiographiques et paramétriques de la télédétection aquatique.

Table 3. - Domains of application for aquatic remote sensing.

Paramètre	Physiographie				
	Océans	Zones côtières	Lacs	Rivières et réservoirs	Marais
Bassin versant		Kapetzki <i>et al.</i> , 87	Schneider <i>et al.</i> , 85 Smith et Blackwell 80	Campbell 79	Butera 79
Périmètre	?	?	Blackwell et Boland 76	-	-
Bathymé- trie	-	Lemaire <i>et</i> <i>al.</i> , 88	Lyzenga 78	-	-
Nature des fonds	-	Spitzer et Dirks 86b	?	-	-
Végétation	-	Ackelson et Klemas 87	Raitala et Jantunen 85	?	Jensen <i>et</i> <i>al.</i> , 86, Girel 86
Vagues et courants	Stewart 81 Wadsworth et petit 88	Schlitten- hardt 85	Strub <i>et</i> <i>al.</i> , 84 Mortimer 88	-	Hutton et Dincer 79
Thermique	Hardtke et Meincke 84 Caraux <i>et</i> <i>al.</i> , 84	?	Lathrop et Lillesand 87	?	"
Couleur de l'eau	ESA 87a Morel et Prieur 77	Prieur et Sathy. 87, Munday <i>et</i> <i>al.</i> , 79	Alföldi et Munday 78 Jaquet et Zand 89	?	-
Matière en sus- pension	Thomas 84	Lindell <i>et</i> <i>al.</i> , 85, Amos et Alfoldi 79	Ritchie <i>et</i> <i>al.</i> , 87, Galat et Jacobs. 85	Ritchie <i>et</i> <i>al.</i> , 76	
Chloro- phyllé (phyto- plancton)	ESA 87a Smith et Baker 78	Tassan 87 Grassl <i>et</i> <i>al.</i> , 86a	Lemoalle 80, Strong 74	?	-
Gelbstoff	-	Grassl <i>et</i> <i>al.</i> , 86b	?	?	?
Qualité de l'eau	Khorram 85	Khorram 81 Jaquet, in Kapetzki <i>et</i> <i>al.</i> , 87	Shimoda <i>et</i> <i>al.</i> , 86, Lathrop et Lillesand 86	Verdin 85	-

Paramètre	Physiographie				
	Océans	Zones côtières	Lacs	Rivières et réservoirs	Marais
Niveau trophique	?	?	Wezernak <i>et al.</i> , 76 McGarrigle et Reardon 86, Lillesand <i>et al.</i> , 83	?	?

Cette profondeur d'investigation variable est un handicap pour l'étude satellitaire de colonnes d'eau peu profondes et relativement claires, mais elle permet aussi la collecte d'informations sur la texture et la couverture végétale du fond dans les zones côtières.

2-5 Domaines d'application en limnologie

Le tableau 3 donne un aperçu des domaines d'application de la télédétection en sciences de l'eau, tant du point de vue spatial (océans - marais) que paramétrique. Passons brièvement en revue ce dernier.

- Bassin versant : la télédétection peut apporter une information utile sur les sols, la végétation terrestre et côtière, les pratiques culturales et l'hydrologie (prédiction des crues en fonction du couvert neigeux par exemple, BAUMGARTNER *et al.*, 1986). Combinée à un modèle numérique de terrain, l'imagerie satellitaire classifiée permet aussi une estimation de l'érosion des sols (GRID 1985).
- Périmètre : la réflectance de l'eau dans le PIR (bandes LANDSAT MSS 6 et 7, TM 4 et 5, voir figure 2) étant très faible, les étendues d'eau ressortent en noir sur les images. Leurs limites et leur surface peuvent donc être facilement cartographiées.
- Bathymétrie : dans le cas d'eaux très claires, sans influence perturbatrice de matières en suspension, l'application d'algorithmes multi-bandes permet l'établissement de cartes bathymétriques jusqu'à une profondeur de 20 m (SPITZER et DIRKS 1986b).
- Fonds et végétation submergée : dans les mêmes cas d'eau transparente et de topographie sous-lacustre relativement plate, il est possible de cartographier les grands types de substrat sédimentaires et de végétation sub-aquatique (TANIS 1980, RAITALA et JANTUNEN 1985).
- Vagues et courants : les phénomènes physiques affectant la surface des lacs tels que champs de vagues, "risées", ou trainées d'écume ressortent particulièrement bien sur l'imagerie-radar (figure 3). Dans le domaine du visible, leur effet provoque habituellement une désaturation de la couleur (ALFOLDI et MUNDAY 1978). Quant aux courants, ils sont visibles par l'intermédiaire des traceurs naturels tels que température (bande TM6) et matière en suspension organique ou minérale (bande TM1-3).

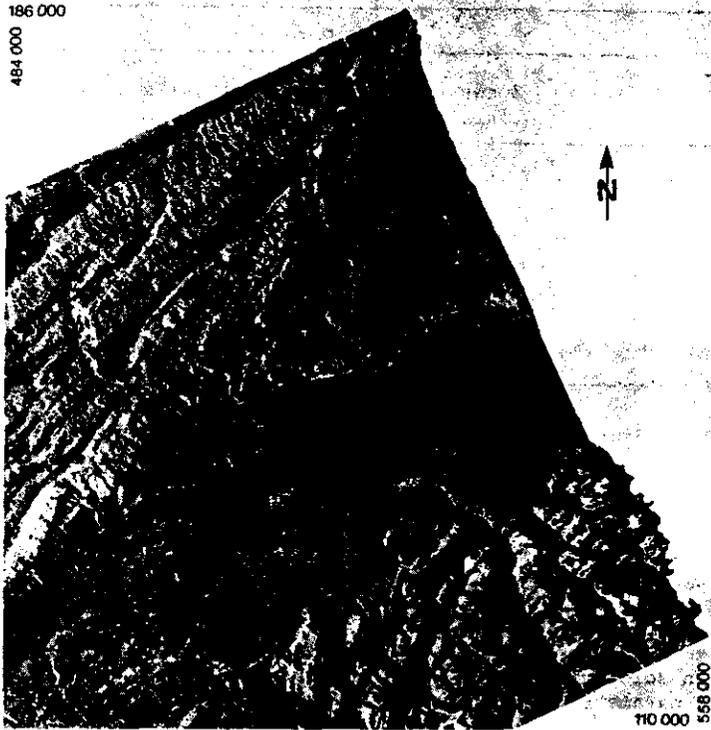


Figure 3. - Champs de vagues dans la partie ouest du Léman. 19.08.78, 7 h 37. Image radar SEASAT, orbite 762. Géoréférencée par Remote Sensing Laboratory, Université de Zurich (MEIER et NUESCH 1985).

Figure 3. - Wave fields on the western part of lake Geneva (Léman). Aug. 19th, 1978, 7.37 AM. Radar image from SEASAT, orbit 762. Georeferencing by Remote Sensing Laboratory, University of Zurich (MEIER and NUESCH 1985).

- Thermique : il est possible d'établir des cartes de la température superficielle des lacs grâce aux capteurs IRT de l'AVHRR, du CZCS et du TM (tableau 2). Pour ce dernier, on arrive à des modèles dont l'erreur standard peut descendre à 0,1° C (LATHROP et LILLESAND 1987).
- Couleur : sur le terrain, la mesure de ce paramètre limnologique est peu à peu tombée en désuétude. Les travaux théoriques de l'Ecole de Villefranche (MOREL et PRIEUR 1977, GORDON et MOREL 1983) sur la couleur de l'eau de mer et ceux de MUNDAY *et al.*, (1979) sur l'analyse de chromatocité ouvrent de nouveaux horizons sur l'exploitation de ce paramètre classique (JAQUET 1987). Il est maintenant possible d'exprimer la couleur de manière numérique selon les normes CIE (WYSZECKI et STILES 1982) et sur la base des bandes TM1-3. Pour le moment, les problèmes de correction atmosphérique et la rareté des mesures optiques *in situ* dans les lacs retardent l'interprétation de la couleur en termes de populations planctoniques et de niveau trophique. Nul doute que ces questions recèlent un champ de recherches très prometteur.

- Matière en suspension totale (MST) et plumes turbides : une des premières applications de la télédétection aux sciences de l'eau a été l'identification de plumes ou nuages turbides provenant de l'érosion côtière ou de l'arrivée de cours d'eau dans la mer ou les lacs (GOLDMAN *et al.*, 1974, BUKATA *et al.*, 1983). La cartographie qualitative de ces plumes est aisée sur la base des images LANDSAT, MSS4-6 et TM1-4. On arrive également, après calage au sol, à des modèles régressifs permettant d'estimer la concentration en MST (RITCHIE *et al.*, 1976).
- Pigments chlorophylliens et phytoplancton : pour les eaux océaniques de type I (JERLOV 1976), où phytoplancton et MST covarient, il existe des algorithmes estimant la concentration en chlorophylle sur la base des bandes 1-3 du CZCS et 1-2 du TM (TASSAN 1987) et même la production primaire (PLATT et SATHYENDRANATH 1988). Dans le cas des eaux intérieures, la présence de matière organique dissoute (Gelbstoff) et de suspensioïdes minéraux complique beaucoup cette estimation. Aussi les exemples limnologiques sont-ils encore rares dans ce domaine (ALMANZA et MELACK 1985).
- Gelbstoff : seules de très fortes concentrations en matières humiques seraient susceptibles d'être détectées par les capteurs actuels, dont le nombre et la largeur des bandes spectrales ne permettent pas une résolution suffisante. En revanche, selon GRASSL et DOERFFER (1986b), un spectromètre imageur programmable entre 440 et 550 nm, avec une résolution de 5 nm, rendrait possible la mesure simultanée de la chlorophylle et du Gelbstoff.
- Qualité de l'eau et niveau trophique : grâce à la récolte et à l'analyse d'échantillons d'eau obtenus simultanément au passage du satellite, il est possible de dériver des modèles statistiques reliant les paramètres classiques de la qualité de l'eau (Secchi, nutriments, etc) aux radiances ou combinaisons de celles-ci dans plusieurs bandes spectrales (SCHERZ et VAN DOMELEN 1974). Cette approche a le défaut d'être purement empirique et de nécessiter des campagnes de vérité-terrain assez lourdes. Une relation entre les divers index trophiques (par exemple CARLSON 1977) et le signal satellitaire multibande a aussi été recherchée (WEZERNAK *et al.*, 1976). Une compréhension plus fine du paramètre couleur permettrait sans doute une meilleure exploitation de l'information satellitaire en vue d'une estimation du niveau trophique.

3 - MÉTHODOLOGIES D'UTILISATION

3-2 Approches

Il ressort des travaux que nous avons consultés deux manières principales d'exploiter les données satellitaires en limnologie :

- 1) Approche qualitative ou cartographique : elle consiste en l'observation, sur support photographique ou infographique, d'hétérogénéités spatio-temporelles visibles à la surface des étendues d'eau. Cette opération peut se faire sur un même lac à des périodes différentes, et/ou sur les divers lacs d'une même scène. Basée sur l'observation visuelle

en vraie couleur ou sur des bandes séparées dans divers domaines spectraux, cette démarche conduit à une typologie représentée sous forme cartographique. Celle-là est ensuite traduite en termes de catégories limnologiques usuelles, telles que plumes turbides, herbiers subaquatiques, essais de phytoplancton ou gyres thermiques.

L'imagerie satellitaire, par nature synoptique et répétitive, représente donc un outil précieux d'intégration pour appréhender la dimension spatiale des phénomènes limnologiques. Elle complète ainsi l'approche traditionnelle de l'échantillonnage par stations discrètes.

2) Approche quantitative ou modélisatrice : il s'agit là d'exprimer quantitativement un paramètre limnologique Y (tableau 3) à partir des données satellitaires. Cette relation est donc de la forme $Y = F(x_1, x_2, \dots, x_n)$, x_i représentant les radiances ou combinaisons de celles-ci dans les diverses bandes spectrales, et F une fonction dérivée soit empiriquement à partir de données de terrain (DOERFFER 1981), soit théoriquement à l'aide de modèles de transfert radiatif (VIOLLIER *et al.*, 1980, BUKATA *et al.*, 1985). On discutera plus loin quelques exemples de cette démarche. Notons pour le moment que ces algorithmes ont été développés avant tout dans le domaine océanique, et que leur pouvoir prédictif dépend fortement des possibilités de corrections atmosphériques (MOREL 1980). En limnologie, les applications sont encore relativement peu nombreuses du fait de la complexité des eaux intérieures (LATHROP et LILLESAND 1986), sauf en ce qui concerne la matière en suspension totale (RITCHIE *et al.*, 1987).

3-2 Vérité-terrain

On voit que l'expression quantitative des paramètres limnologiques dépend, encore en bonne partie, des données récoltées sur le terrain au moment du passage du satellite. Cette opération ("ground-truthing") concerne les mesures faites aussi bien sur la partie supérieure de la colonne d'eau que dans l'atmosphère, en vue de la correction du signal (OOMS 1985, MARACCI et GUZZI 1985).

Pour des raisons de logistique, les mesures de vérité-terrain ne coïncident pas toujours exactement avec le passage du satellite : il s'écoule parfois quelques jours entre ces deux opérations. Dans la mesure où phénomènes et structures étudiés ne varient pas significativement durant ce laps de temps, ce délai est acceptable.

En ce qui concerne l'exploitation des bases de données limnologiques existantes à des fins de calage, l'on rencontre un certain nombre de difficultés :

1) Relative rareté des études d'optique en eau douce tant au niveau théorique qu'à celui des mesures (KIRK 1983, SCHANZ 1985 et 1986, SMITH *et al.*, 1973).

2) Rareté des mesures, distribuées géographiquement, de thermique, de MST, Secchi et chlorophylle. Une exception notable est représentée par les travaux de l'Institut de Limnologie de Thonon, sur le Léman, où PELLETIER (1981) a mis au point un dispositif de mesure en continu de la chlorophylle, du pH et de la température.

3) Difficulté d'accès aux données. Même si des séries partielles de mesures susceptibles d'être utilisées existent, elles ne sont pas toujours facilement consultables (informatisation absente ou archaïque).

4) Non-adéquation des données. Même si elles sont accessibles, la majorité des données collectées dans un but scientifique ou de surveillance ne le sont pas en vue d'utiliser l'information satellitaire - pas plus d'ailleurs qu'elles ne sont utilisables pour calibrer des modèles mathématiques ! Ceci est évident tant dans le choix des paramètres que dans leur fréquence de mesure et l'emplacement des stations.

La télélimnologie actuelle reste donc, par force, encore très qualitative. Nous présenterons, au terme de ce survol, quelques pistes en vue de mieux intégrer la télédétection dans les programmes limnologiques de terrain.

4 - QUELQUES APPLICATIONS

Dans la classification à double entrée du tableau 3, sont reportées les références d'un certain nombre d'applications de la télédétection aux sciences de l'eau. Nous nous sommes efforcée de n'y inclure que les textes facilement accessibles, ainsi que les travaux regroupés en symposia. En outre, nous avons privilégié les publications récentes, dont les listes bibliographiques donnent accès à la littérature plus ancienne. Enfin, on trouvera dans le reste du texte d'autres références à caractère plus théorique.

Le tableau comporte un certain nombre de cases vides. Celles marquées d'un tiret indiquent l'absence d'applications pour des raisons intrinsèques (bathymétrie de l'océan profond par exemple), et les points d'interrogation signifient que les applications sont possibles, mais que nous n'en avons pas trouvé d'exemples probants dans la littérature consultée.

1 - Approche du limnosystème

L'article de SMITH et BLACKWELL (1980) intitulé "*Application of digital image processing techniques and information systems to water quality monitoring of lake Tahoe*" illustre bien l'approche combinant lac et bassin versant. Partant du principe que la qualité de l'eau du lac dépend dans une large mesure des apports du bassin versant, les auteurs ont regroupé dans un système d'information géoréférée (SIG) toutes les données disponibles. C'est ainsi que topographie, réseau hydrographique avec ses débits, pluviométrie, occupation du sol, images LANDSAT et données limnologiques sont traitées par un système qui permet l'étude de leurs relations mutuelles, en tenant compte de leur dimension géographique.

Bien que les techniques de modélisation des SIG (CAO et HUMBERT 1985) soient encore dans l'enfance, on mesure le potentiel de cet outil qui permet de prendre en compte, tester, modéliser et gérer l'impact du bassin versant sur la vie du lac.

2 - Cartographie des zones humides

L'importance écologique des marais côtiers de Louisiane, jointe aux difficultés rencontrées lors de leur étude *in situ*, ont incité BUTERA (1979) à recourir aux données satellitaires. Le rapport intitulé "Computer-implemented remote sensing techniques for measuring coastal productivity and nutrient transport systems", présente une méthode pour mesurer la production végétale des marais et l'exportation de nutriments vers l'estuaire : une classification supervisée de la végétation émergente en zones de productivité diverse est suivie par un calcul de la distance à la côte, le tout basé sur l'imagerie LANDSAT MSS.

Dans le cas de végétation macrophytique immergée, RAITALA (1985 et 1986) a pu cartographier, sur la base d'images LANDSAT MSS, plusieurs associations végétales dans la baie de Liminka (Finlande). Ces deux exemples démontrent le rôle essentiel de la télédétection dans la cartographie et la gestion de l'interface terre-eau, souvent complexe, étendue et peu accessible.

3 - Phénomènes de transport

Un survol de la littérature limnologique (actes des congrès de la SIL par exemple) fait ressortir la modestie quantitative de la recherche en limnologie physique. Cela est sans doute dû à la petite taille de nombreux lacs, considérés à la suite des modélisateurs comme étant homogènes latéralement, mais aussi à la cherté de l'instrumentation courantométrique !

Il existe d'autre part de nombreux modèles hydrodynamiques pour les grands lacs, mais leur calage et vérification sont souvent difficiles faute de données. La télédétection nous paraît fournir un moyen d'appréhender de manière synoptique une partie des phénomènes de transfert ayant lieu à la surface des lacs (STOW 1987). Les deux exemples suivants en témoignent.

STRUB *et al.* (1984), dans un excellent article intitulé "Temperature and transport patterns in lake Tahoe : satellite imagery, field data and a dynamical model", utilisent la température mesurée par AVHRR (canal 4, résolution 1,1 km) comme traceur. La carte des anomalies faite sur la base de 26 images révèle une série d'up- et downwellings induisant une gyre anticyclonique. Cette dernière a pour effet de piéger les apports en nutriments près de la côte sud, expliquant la plus forte production primaire connue dans cette zone. Les auteurs ont fort bien exploité la haute fréquence de passage du satellite, dont la résolution spatiale dite basse est néanmoins suffisante pour un lac de taille moyenne (20 x 40 km).

Paru tout récemment (1988), l'article de Mortimer (*Discoveries and testable hypotheses arising from CZCS imagery of southern lake Michigan*) montre de manière remarquable le parti que l'on peut tirer de l'imagerie satellitaire en limnologie générale. L'auteur exploite les données du CZCS (tableau 2) dans les domaines du visible et du thermique, sans correction atmosphérique, selon une démarche qualitative. Il met ainsi en évidence le passage du régime thermique d'hiver à celui d'été (fronts et upwellings), la croissance concomitante du phytoplancton, la resuspension et le transport de sédiment lors des tempêtes et finalement le

piégeage du Gelbstoff provenant des rivières entre le rivage et le front thermique. Il s'avère que la résolution et la fréquence de passage du satellite sont tout à fait adéquats pour suivre l'évolution spatio-temporelle des phénomènes ci-dessus, la taille du bassin considéré étant de 130 x 250 km environ.

4 - Phytoplancton

Il n'existe pas encore, à notre connaissance, d'algorithme pour la mesure satellitaire de la chlorophylle dans les eaux continentales : les relations établies entre phytoplancton et réflectance sont toutes spécifiques au site et moment considérés (LATHORP et LILLESAND 1986, GRUNWALD *et al.*, 1987).

Un exemple classique de cette approche est donné par LEMOALLE (1980) : "Application des données LANDSAT à l'estimation de la production du phytoplancton dans le lac Tchad". En 1975 et dans les eaux libres de ce bassin, la corrélation entre l'inverse de la profondeur Secchi et la chlorophylle mesurés *in situ* est bonne. Cela permet donc d'estimer de manière satisfaisante la concentration en chlorophylle, ainsi que la production primaire à partir des bandes 6 ou 7 du MSS de LANDSAT.

L'extrapolation, donc la cartographie des concentrations en chlorophylle sur la zone considérée du lac est basée sur l'observation que les propriétés optiques de l'eau ne dépendent que d'une combinaison MES-pigments chlorophylliens stable pour cette période. Ceci est peu vraisemblable dans les zones côtières, où le signal du fond et la resuspension des sédiments jouent un rôle perturbateur (SPITZER et DIRKS 1986a).

Une approche plus qualitative est suivie par STRONG (1974) dans son article "Remote sensing of algal blooms by aircraft and satellite in Lake Erie and Utah Lake". Il identifie visuellement des fleurs d'eau importantes à l'aide de l'information combinée de LANDSAT MSS et de données récoltées par avion dans les domaines du visible et de l'IR thermique. D'après STRONG (1974), les fleurs d'eau à *Aphanizomenon flos-aquae* absorbent fortement dans le visible, et "brillent" dans le PIR et l'IR thermique. Cette observation est intéressante et mérite confirmation.

5 - Couleur de l'eau

Le principe et les applications de l'analyse de chromaticité sont fort bien présentés dans l'article d'ALFOLDI et MUNDAY paru en 1978 et intitulé "Water quality analysis by digital chromaticity mapping of LANDSAT data". Les étapes de l'analyse sont les suivantes :

- Transformation en radiance L_i des données des trois premières bandes de LANDSAT MSS ou TM.

- Calcul des transformées $x=L_1/\sum L_i$, $y=L_2/\sum L_i$ et $z=L_3/\sum L_i$, définissant un système de coordonnées rectangulaires tridimensionnelles ou triangulaires bidimensionnelles. Ce sont les analogues des coefficients de chromaticité CIE utilisés en colorimétrie (WYSZECKI et STILES 1982). Si le TM est utilisé, on a, approximativement les équivalences x =bleu, y =vert et z =rouge, permettant de définir les cibles en termes de "vraies" couleurs.

- Report sur le diagramme de chromaticité du point moyen des diverses cibles, qui s'arrangent en général en zones curvilignes appelées "loci", et interprétation visuelle (figure 4).

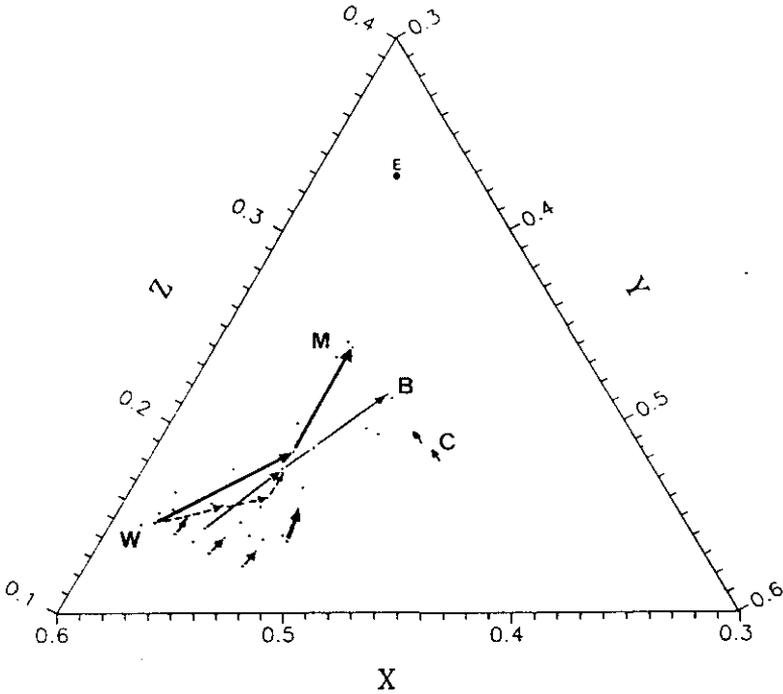


Figure 4. - Analyse de chromaticité de plans d'eau de la région lémanique. Points d'attraction : W=eau "pure", M=suspensoides minéraux, B=influence du fond, C=chlorophylle, E=point d'égal radiance (blanc). Les flèches indiquent les loci pour différentes zones d'un même lac. Voir JAQUET et ZAND (1989) et texte pour explications.

Figure 4. - Chromaticity analysis of water bodies in western Switzerland. Attractions points : W="pure" water, M=mineral suspensoids, B=bottom influence. C=chlorophyll. E=equal-radiance point. Arrows indicate loci of various areas from a same lake. See JAQUET and ZAND (1989) and text for explanations.

- Normalisation de la signature des cibles prises à des dates différentes, représentant une correction atmosphérique relative (MUNDAY *et al.*, 1979, MUNDAY 1983).

Ces auteurs présentent dans leur article une série de loci typiques pour l'eau pure, la matière en suspension, la chlorophylle, la bathymétrie, les fonds divers et les paramètres atmosphériques (brume, nuages). Cette démarche est très intéressante et mérite d'être largement appliquée, même si le pouvoir discriminatoire des coefficients de chromaticité est sujet à la critique (BUKATA *et al.*, 1983).

Nous avons appliqué cette méthode à la typologie d'une cinquantaine de plans d'eau de la région lémanique (JAQUET et ZAND 1989 : "Colour

analysis of inland waters using LANDSAT TM data"). Une interprétation préliminaire (figure 4) met en évidence quatre "points d'attraction" (eau libre, matière en suspension minérale, influence du fond et chlorophylle phytoplanctonique), entre lesquels se répartissent lacs, marais et rivières.

6 - Qualité de l'eau et niveau trophique

La détermination des paramètres de qualité de l'eau par télédétection est particulièrement appropriée dans le cas de grands plans d'eau hétérogènes ou de lacs très nombreux et d'accès difficile.

Ainsi, LATHROP et LILLESAND (1986) ont-ils évalué, sur la base du TM de LANDSAT, la qualité de l'eau d'une partie du Lac Michigan ("*Use of Thematic Mapper data to assess water quality in Green Bay and Central Lake Michigan*"). Ils ont mis en évidence des relations hautement significatives entre Secchi, chlorophylle, turbidité et température, et les bandes TM2, 3 et 6. Bien que ces modèles soient différents pour Green Bay et Michigan, ils rendent possible l'interpolation des valeurs mesurées sur le terrain, donc une véritable cartographie.

Le territoire de l'Irlande comprend environ 4000 lacs de types et de tailles très divers, ce qui a incité l'Irish National Planning and Physical Institute à entreprendre une étude de faisabilité sur l'emploi de la télédétection en gestion limnologique. Le rapport préliminaire de McGARRIGLE et REARDON (1986) intitulé "*National Survey of Lakes by remote sensing*" présente très objectivement le potentiel et difficultés d'une telle approche. Sur la base de données de terrain relativement dispersées et de 9 images MSS, la profondeur Secchi et un index ordinal de chlorophylle ont été établis pour quelque 350 lacs. Les problèmes principaux proviennent de la couverture nuageuse et de la nature approximative de la correction atmosphérique.

Notons enfin qu'en Suède la télédétection est utilisée depuis plusieurs années pour la surveillance de la qualité de l'eau sur le plan national (LINDELL *et al.*, 1986).

5 - BILAN ET PROVISIOIRE ET CONCLUSIONS

Le survol bibliographique qui précède nous amène maintenant à dresser un bilan des recherches en télélimnologie.

Malgré les résultats estimables présentés dans le tableau 3, force est de constater que la télédétection n'a pas encore donné toute sa mesure en limnologie : les applications à la terre solide et à l'anthroposphère sont beaucoup plus nombreuses et convaincantes.

Avec tous ceux qui ont participé, entre autres, à l'élaboration du programme de l'Earth Observing System (EOS, BUTLER 1984 et 1987), nous sommes néanmoins convaincus du potentiel extraordinaire de la télédétection pour l'étude du géosystème en général, et des eaux intérieures en particulier. A partir de ces prémisses, voyons quels sont les obstacles à surmonter et les solutions à apporter pour concrétiser ce potentiel (tableau 4).

Tableau 4. - Difficultés et solutions possibles en téléliologie.

Table 4. - Problems and possible solutions in telelimnology.

Problème	Solution
Complexité de la composition des eaux intérieures = pas d'algorithme universel.	Caractérisation optique et mesures <i>in situ</i> . Meilleure résolution spectrale.
Faiblesse du signal aquatique = correction atmosphérique.	Modélisation et récolte de données atmosphériques. Bandes entre 765-870 nm.
Bandes trop larges.	Bandes plus étroites et plus nombreuses.
Rubanage parasite (striping).	Filtrage/Détecteurs à barettes.
Passage trop peu fréquents = couverture nuageuse.	Inclinaison programmable du système optique (tilt).
Coût des images.	Bibliothèques d'images transdisciplinaires. Mini-scènes LANDSAT. Archives CZCS et AVHRR.
Coût du traitement.	Systèmes sur micro-ordinateur.
Rareté des "téléliologiques".	Prise de conscience du limnosystème. Nouvelles filières d'études.

En italique, solutions mises en oeuvre dans Eos (Esaias 1986, Goetz 1987).

Intrinsèquement d'abord, la complexité des eaux intérieures, où chlorophylle, seston, matière en suspension minérale et Gelbstoff ne covarient pas, a empêché jusqu'à présent l'établissement d'algorithmes universels pour l'estimation de ces composants. Il faut aussi admettre que nos connaissances sur l'optique lacustre sont encore maigres. L'avènement, dans les années 90 (tableau 5), de capteurs à haute résolution spectrale tels que l'HIRIS doit absolument s'accompagner d'un développement des recherches *in situ* sur l'optique lacustre.

Le signal aquatique effectif dans le visible est faible (figure 2), ce qui augmente d'autant l'effet perturbateur de l'atmosphère. Il est donc urgent d'intégrer des physiciens de l'atmosphère ou des météorologues dans les équipes de limnologues, et de consacrer des fonds à des études théoriques et à des programmes de mesure. Ces derniers ne sont pas nécessairement lourds : ainsi VANOUPLINES (1986) propose-t-il un algorithme de correction atmosphérique basé sur la seule visibilité horizontale, mesurée en routine par les aéroports. Ces données, associées à l'information qui sera disponible dans les bandes 765-870 nm

de la configuration Eos, rendent possible la réalisation d'une correction atmosphérique fiable.

Tableau 5. - Caractéristiques simplifiées de quelques satellites des années 90.

Table 5. - Characteristics of satellites to be used in the nineties.

	LANDSAT6 ¹		SPOT3 ²	HIRIS	Eos ³		ERS-1 ⁴
	ETM	SeaWiFS			TIMS	MODIS	
						T ou N	
Résolution (m)	30 15	1130 4500	20	30	30	500-1000	30
Visible+PIR	6	6	4	192	-	64	
IR therm.	2	2			8	10	
Radar							Bde.
Fréq. pas-sage nominale	16	1	26 2 avec tilt	16 4 avec tilt	16 4	2	
Date approx. lancement	1991		1992		1995		1992
Remarques	Possibilité de correct. atmos.			Programmable. Possibilité de correct. atmosphériques			

1 EOSAT (1987)

2 COURTOIS (1988)

3 BUTLER (1987)

4 ESA (1987b)

Les difficultés mentionnées dans le tableau 4 sous le label "technologie" seront en bonne partie résolues dans les dix prochaines années. Notons que les parasites divers affectant les données LANDSAT, en particulier le rubanage, peuvent déjà être partiellement éliminés par filtrage (POROS et PETERSON 1985).

Enfin, il existe bien sûr des obstacles institutionnels. Jusqu'à présent, les données satellitaires à haute résolution ont été considérées comme chères. Ainsi, faut-il compter 3200 \$ pour une scène LANDSAT TM de 185 x 170 km, et 1800 \$ pour une couverture SPOT de 60 x 60 km. Si la scène ne recouvre pas plusieurs plans d'eau, son achat dans le cadre d'un budget de recherche est bien sûr difficile à justifier. En outre, hormis quelques exceptions, les limnologues n'ont pas eu un accès facile aux grosses installations de traitement d'images, dont les services sont en général payants.

Ces problèmes financiers peuvent maintenant trouver des solutions. Tout d'abord, au niveau des données, les facilités de découpage des scènes TM (jusqu'aux mini-scènes disponibles sur disquettes pour 750 \$) rendent possible le travail sur plusieurs images d'un lac au cours du cycle annuel. Pour les grandes étendues d'eau, les archives du CZCS ou de l'AVHRR (tableau 2) offrent un remarquable matériel d'étude à un coût

modéré. Finalement, la mise sur le marché de plusieurs systèmes d'analyse d'images et de SIG fonctionnant sur micro ou mini-ordinateurs (ERDAS, CHIPS, SPANS, IDRISI, par exemple) met effectivement la télédétection à la portée des équipes de recherche limnologique.

Il n'en demeure pas moins un obstacle de taille au développement de la téléliologie : c'est celui de la rareté actuelle des limnologues maîtrisant la télédétection, ou celle des praticiens de la télédétection au courant de la problématique limnologique, qui pourraient s'intéresser dans des équipes pluridisciplinaires.

Comme toute nouvelle discipline, la télédétection doit se faire une place dans l'étude des eaux continentales (voir la modélisation il y a une décade !). A cet égard, nous avons beaucoup à apprendre de l'océanographie, dont les praticiens ont résolument franchi le pas vers les satellites (GOWER 1981, ESA 1987).

Nous pensons aussi que la tendance actuelle à décloisonner les disciplines et à considérer les problèmes d'environnement à l'échelle globale (BUTLER 1984, 1987) doit nous inspirer au niveau du limnosystème. La télédétection, en tant que méthodologie, a joué un rôle capital dans cette prise de conscience, et son application comme outil fait partie intégrante des programmes tels que l'IGBP (International Geosphere-Biosphere Program) et l'Eos (RASOOL 1987).

Il nous paraît donc impératif, en tant que limnologues, de nous laisser questionner par l'irruption de ces nouveaux outils que sont la télédétection et les systèmes d'information géoréférencée. Cela implique, pratiquement :

- le développement de la recherche limnologique dans les domaines permettant l'exploitation optimale des ressources de la télédétection (optique, thermique, bassin versant) ;
- la prise en compte des besoins de la télédétection lors de l'établissement des budgets d'équipement, de fonctionnement et de campagnes sur le terrain ;
- l'inclusion de la télédétection et des SIG dans les programmes de formation des futurs praticiens des eaux intérieures.

REMERCIEMENTS

Nous avons trouvé au GRID (Global Resource Information Database) un lieu ouvert à l'innovation et aux échanges d'idées en matière d'environnement global. A son directeur, W. Mooneyhan, et à tous nos collègues, nous exprimons notre amicale reconnaissance.

Nous remercions également les réviseurs du manuscrit pour leurs commentaires et informations.

 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ACKLESON S.G., KLEMAS V. (1987). Remote sensing of submerged aquatic vegetation in Lower Chesapeake Bay : a comparison of LANDSAT MSS to TM imagery. *Rem. Sens. Env.*, 22 : 235-248.
- ALFOLDI T.T., MUNDAY J.C. (1978). Water quality analysis by digital chromaticity mapping of LANDSAT data. *Can. J. Rem. Sens.*, 4(2) : 108-126.
- ALMANZA E., MELACK J.M. (1985). Chlorophyll differences in Mono Lake (California) observable on Landsat imagery. *Hydrobiologia*, 122 : 13-17.
- AMOS C.L., ALFOLDI T.T. (1979). The determination of suspended sediment concentration in a macrotidal system using LANDSAT data. *Jour. Sed. Pet.*, 49(1) : 159-174.
- BAUMGARTNER M.F., SEIDEL K., MARTINEC J. (1986). Towards snowmelt runoff forecast using Landsat-MSS and NOAA/AVHRR data. *Proc. IGARSS'86 Symp.*, ESA SP-254 : 925-928.
- BLACKWELL R.J., BOLAND D.H. (1976). The trophic classification of lakes USING ERTS multispectral scanner data. *Proc. Amer. Soc. Photogr.*, 41st Annual Meeting, 393-414.
- BRICAUD A., SATHYENDRANATH S. (1981). Spectral signatures of substances responsible for the change in ocean color. *Actes Symp. Signat. spectrales d'objets en télédétection*, Avignon, G.I.2 : 41-55.
- BUKATA R.P., BRUTON J.E., JEROME J.H. (1983). Use of Chromaticity in Remote Measurements of Water Quality. *Rem. Sens. Env.*, 13 : 161-177.
- BUKATA R.P., BRUTON J.E., JEROME J.H. (1985). La mesure directe des paramètres optiques au service de l'estimation des indicateurs de la qualité de l'eau des lacs. *Environnement Canada, Série Scientifique* : 40, 36 p.
- BUTERA M.K. (1979). Computer-implemented remote sensing techniques for measuring coastal productivity and nutrient transport systems. *Satell. Hydrol.*, *Amer. Wat. Res. Ass.*, 522-542.
- BUTLER D.M. (1984). Earth Observing System. Science and Mission Requirements Work. Group Rept. *NASA Techn. Memo*, no. 86129, 51 p.
- BUTLER D.M. (1987). From pattern to process : the strategy of the Earth Observing System. *Earth Observing System*, vol. II, 140 p., NASA.
- CAMPBELL W.J. (1979). An application of LANDSAT and computer technology to potential water pollution from soil erosion. *Water Res. Bull.*, June 79 : 616-621.
- CAO T.T., HUMBERT M. (1985). MOCA, un système interactif d'intégration des données et d'aide à la décision. *Metropolis*, 70-71 : 82-88.
- CARAUX D., MILLOT C., JACQUES G. (1984). Comparison between thermal and visible satellite imagery to assess coastal upwellings in the Mediterranean. *Proc. 18th Int. Symp. Rem. Sens. Env.*, Paris : 621-628.
- CARLSON R.E. (1977). A trophic state index for lakes. *Limnol. Oceanogr.*, 22(2) : 361-369.
- CASSANET J. (1985). *Satellites et capteurs*. Collection Télédétection satellitaire, Paradigme, Caen, 128 p.
- CNES (CENTRE NATIONAL D'ETUDES SPATIALES) (1988). *SPOT 1, utilisation des images, bilans, résultats*. Coll. CNRS, CEPADUES edit., Toulouse, 1552 p.
- COLWELL R.N., SIMONETT D.S., ESTES J.E., Eds. (1983). *Manual of Remote Sensing*. *Am. Soc. Photogramm.*, 2 vols, Sheridan Press, 2440 p.
- COURTOIS M. (1984). Répétitivité : l'accessibilité, une originalité utile du système SPOT. *Fiche 33*, SPOT/GDTA, Toulouse, 6 p.
- COURTOIS M. (1988). Le programme SPOT. In : *SPOT 1, utilisation des images, bilans, résultats*. Coll. CNRS, CEPADUES edit., Toulouse : 1473-1479.
- CURRAN P.J. (1985). Principles of remote sensing. Longman, London, 282 p.
- DAVIES-COLLEY R.J., VANT W.N. (1987). Absorption of light by yellow substance in freshwater lakes. *Limnol. Oceanogr.*, 32 : 416-425.
- DOERFFER R. (1981). *Factor analysis in ocean colour interpretation*. *Oceanography from Space*, Plenum Press : 339-345.

- EMDUP (1987). Announcement of Opportunity for the european MOS-1 (Marine Observation Satellite) data utilisation programme. ESA/EARTHNET, 29 p.
- EOSAT (1987). *Landsat Technical Notes*, no. 2, 4 p.
- ESA (EUROPEAN SPACE AGENCY) (1987a). Ocean Colour. Rept. ESA Ocean Colour Working Group, Villefranche-sur-Mer, Nov. 1986, *ESA SP-1083*, 118 p.
- ESA (1987b). ERS-1 - a keen eye on the earth. *Document F12*, 6 p.
- ESAIAS W. (1986). MODIS, Moderate-Resolution Imaging Spectrometer. *Earth Observing System*, vol. IIB, 59 p., NASA.
- GALAT D.L., JACOBSEN R.L. (1985). Recurrent aragonite precipitation in saline-alkaline Pyramid Lake, Nevada. *Arch. Hydrobiol.*, 102(2) : 137-159.
- GIANNINI J.A. (1986). A description of large-scale variability in the ocean using the diffuse attenuation coefficient. Proc. IGARSS Symp., *ESA SP-254* : 1313-1318.
- GIREL J. (1986). Télédétection et cartographie à grande échelle de la végétation alluviale : exemple de la Basse Plaine de l'Ain. *Docum. Carto. Ecol.* 29, chap. 3, Univ. Grenoble.
- GOETZ A.F.H. (1987). HIRIS, High-Resolution Imaging Spectrometer. Science Opportunities For the 1990s. *Earth Observing System*, vol. IIC, 74 p., NASA.
- GOLDMAN C.R., RICHARDS R.C., PAERL H.W., WRIGLEY R.C., OBERBECK V.R., QUAIDE W.L. (1974). Limnological Studies and Remote Sensing of the Upper Truckee River Sediment Plume in Lake Tahoe, California-Nevada. *Rem. Sens. Envir.*, 3(1) : 49-68.
- GORDON H.R., McCLUNEY W.R. (1975). Estimation of the Depth of Sunlight Penetration in the Sea for Remote Sensing. *Appl. Optics*, 14(2) : 413-416.
- GORDON H.R., MOREL A. (1983). Remote assessment of ocean color for satellite visible imagery. Lecture notes, *In : Coastal and Estuarine Studies*, Springer Verlag, N.Y., 114 p.
- GOWER J.F.R. (1981). *Oceanography from Space*. Plenum Press, New York, 978 p.
- GRASSL H., DOERFFER R. (1986a). The use of chlorophyll fluorescence measurements from space for separating constituents of sea water. ESA Contract RFQ 3-5059/84/NL/MD Summary Rept., 31 p.
- GRASSL H., DOERFFER R. (1986b). The influence of yellow substances on remote sensing of sea-water constituents from space. ESA Contract RFQ 3-5060/84/NL/MD Summary Rept., 23 p.
- GRID/PNOE (1985). Base de Données Relative aux Ressources Mondiales. Programme des Nations Unies pour l'Environnement, GEMS, 16 p.
- GRUNWALD B., MAUSER W., SCHNEIDER K. (1987). Determination of pigments and suspended solids in lake Constance from remote sensing data. *Rapport int.*, Inst. Physical Geography, Univ. Freiburg : 130-139.
- HARDTKE P.G., MEINCKE J. (1984). Kinematical interpretation of infrared surface pattern in the North Atlantic. *Ocean. Acta*, 7(3) : 373-378.
- HOVIS W.A., CLARK D.K., ANDERSON F., AUSTIN R.W., WILSON W.H., BAKER E.T., BALL D., GORDON H.R., MUELLER J.L., EL-SAYED S.Z., STURM B., WRIGLEY R.C., YENTSCH C.S. (1980). Nimbus-7 Coastal Zone Color Scanner : System Description and Initial Imagery. *Science*, 210 : 60-63.
- HUTTON S.M., DINCER T. (1979). Using LANDSAT imagery to study Okavango swamp, Botswana. *AWRA Satellite Hydrology*, June 1979 : 512-519.
- JAQUET J.M. (1987). Research in Switzerland on Ocean and Inland-Water Colour Monitoring. In "Ocean Colour", *ESA SP-1083* : 49-52.
- JAQUET J.M., ZAND B. (1989). Colour Analysis of Inland Waters Using LANDSAT TM Data. *Earthnet Landsat TM Pilot Projects*, *ESA SP-1100* : 57-67.
- JENSEN J.R., HODGSON M.E., CHRISTENSEN E., MACKAY H.E., TINNEY L.R., SHARITZ R. (1986). Remote sensing inland wetlands : a multispectral approach. *Phot. Eng. Rem. Sens.*, 52(1) : 87-100.
- JERLOV N.G. (1976). *Marine Optics*. Elsevier, Amsterdam, 231 p.
- KAPETZKI J.M., MCGREGOR L., NANNE H.E. (1987). A geographical information system to plan for aquaculture : a FAO-UNEP/GRID study in Costa Rica. *FAO Fisheries Tech. Paper* 287, 51 p.
- KHORRAM S. (1981). Use of ocean color scanner data in water quality mapping. *Phot. Eng. Rem. Sens.*, 47(5) : 667-676.
- KHORRAM S. (1985). Development of water quality models applicable throughout the entire San Francisco Bay and delta. *Phot. Eng. Rem. Sens.*, 51(1) : 53-62.

- KIRK J.T.O. (1983). *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*. Cambridge Univ. Press, 401 p.
- LATHROP R.G., LILLESAND T.M. (1986). Use of Thematic Mapper data to assess water quality in Green Bay and Central Lake Michigan. *Phot. Eng. Rem. Sens.*, 52(5) : 671-680.
- LATHROP R.G., LILLESAND T.M. (1987). Calibration of THEMATIC MAPPER thermal data for water surface temperature mapping : Case study on the Great Lakes. *Rem. Sens. Env.*, 22 : 297-307.
- LEMAIRE O., LOUBERSAC L., D'OZOUVILLE L., RICHMOND B. (1988). Evaluation de l'apport de SPOT dans le cadre du programme de prospection des ressources minérales de l'atoll d'Aitutaki (Iles Cook). Etude préliminaire de l'impact du passage du cyclone Sally. I, : SPOT, utilisation des images, bilan, résultats : 1095-1101.
- LEMOALLE J. (1980). Application des données LANDSAT à l'estimation de la production du phytoplancton dans le lac Tchad. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrobiol.*, 13(1-2) : 35-46.
- LILLESAND T.M., JOHNSON W.L., DEUELL R.R., LINDSTROM O.L., MEISNER D.E. (1983). Use of Landsat Data to Predict the Trophic State of Minnesota Lakes. *Phot. Eng. Rem. Sens.*, 49(2) : 219-229.
- LINDELL L.T., STEINVALE O., JONSSON M., CLAESSTON T. (1985). Mapping of coastal-water turbidity using LANDSAT imagery. *Int. J. Rem. Sens.*, 6(5) : 629-642.
- LINDELL T., KARLSSON B., ROSENGREN M., ALFOLDI T. (1986). A further development of the chromaticity technique for satellite mapping of suspended sediment load. *Phot. Eng. Rem. Sens.*, 52(9) : 1521-1529.
- LYZENGA D.R. (1979) : Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features. *Appl. Opt.*, 17(3) : 379-383.
- MARACCI G., GUZZI R. (1985). Atmospheric field measurements for interpretation of CZCS data. *Proc. Worksh. Rem. Sens. Coast. Transp. in N. Adriatic Sea*, JRC Ispra : 15-26.
- MCGARRIGLE M.L., REARDON B.C. (1986). National Survey of lakes by remote sensing, Preliminary Report. WR/L13, An Foras Forbartha, Dublin, 31 p.
- MEIER E.H., NUESCH D.R. (1985). Registration of spaceborne SAR data to large-scale topographic maps. *Proc. 19th ERIM Symp.* : 581-593.
- MOREL A. (1980). In-water and remote measurements of ocean color. *Bound. Lay. Met.*, 18 : 177-201.
- MOREL A., PRIEUR L. (1977). Analysis of variations in ocean color. *Limnol. Oceanogr.*, 22(4) : 709-722.
- MORTIMER C.H. (1988). Discoveries and testable hypotheses arising from CZCS imagery of Southern Lake Michigan. *Limnol. Oceanogr.*, 33(2) : 203-226.
- MUNDAY J.C. (1983). Chromaticity of path radiance and atmospheric correction of LANDSAT data. *Rem. Sens. Envir.*, 13 : 525-538.
- MUNDAY J.C., ALFOLDI T.T., AMOS C.L. (1979). Verification and application of a system for automated multirate LANDSAT measurement of suspended sediment. *Satellite Hydrol.*, Amer. Water Res. Ass. : 622-640.
- ODUM H.T. (1983). *Systems Ecology, an Introduction*. Wiley Interscience, 644 p.
- OOMS M.C. (1985). Sea-truth measurements for interpretation of CZCS data. *Work. Rem. Sens. Coast. Transp. N. Adriatic Sea*, P.M. Schliittenhardt Ed., Joint Res. Centre, Ispre : 27-38.
- PELLETIER J. (1981). Prospection biologique *in situ* : variations de la distribution géographique de la chlorophylle dans le Léman, campagnes 1977-1980. *Rapp. annuel Comm. Internat. Prot. Eaux Léman contre Poll.* : 65-79.
- PLATT T., SATHYENDRANATH S. (1988). Oceanic Primary Production : Estimation by Remote Sensing at Local and Regional Scales. *Science*, 241 : 1613-1620.
- POROS D.J., PETERSON C.J. (1985). Methods for destriping Landsat thematic Mapper images - A feasibility study for an online destriping process in the TM Image Processing System (TIPS). *Phot. Eng. Rem. Sens.*, 51(9) : 1371-1378.
- PRIEUR L., SATHYENDRANATH S. (1981). An optical classification of coastal and oceanic waters based on the specific spectral absorption curves of phytoplankton pigments, dissolved organic matter and other particulate materials. *Limnol. Oceanogr.*, 26(4) : 671-689.
- RAITALA J. (1986). Satellite data in aquatic area research : some ideas for future studies. *Proc. Symp. Rem. Sens. for Res. Devel. Env. Manag.*, Enschede : 755-758.

- RAITALA J., JANTUNEN H. (1985). Application of LANDSAT satellite data for mapping aquatic areas in North-eastern Finland. *Aquatic Botany*, 21 : 285-294.
- RASOOL S.I. édit. (1987). Potential of Remote sensing for the Study of Global Change. *Adv. in Space Res.*, 7(1), Pergamon Press.
- RITCHIE J.C., COOPER C.M., YONGQING J. (1987). Using LANDSAT multispectral data to estimate suspended sediments in Moon Lake, Mississippi. *Rem. Sens. Env.*, 23 : 65-81.
- RITCHIE J.C., SCHIEBE F.R., McHENRY J.R. (1976). Remote sensing of suspended sediments in surface waters. *Phot. Eng. Rem. Sens.*, 42(12) : 1539-1545.
- ROCHON G. (1975). Etude méthodologique de l'évolution et de la classification des lacs par satellite. *Serv. Qual. Eaux, Min. Rich. Nat. Québec*, 90 p.
- RUSSEL J., RUNDQUIST D. (1986). On defining remote sensing. *Phot. Eng. Rem. Sens.*, 52(9) : 1507-1511.
- SCHANZ F. (1985). Vertical light attenuation and phytoplankton development in lake Zurich. *Limnol. Oceanogr.*, 30 (2) : 299-310.
- SCHANZ F. (1986). Depth distribution of phytoplankton and associated spectral changes in downward irradiance in lake Zurich (1980/81). *Hydrobiologia*, 134 : 183-192.
- SCHERZ J.P., VAN DOMELEN J.F. (1974). Water quality indicators obtainable from aircraft and LANDSAT images and their use in classifying lakes. *Proc. 10th Int. Symp. Rem. Sens. Env.* : 447-460.
- SCHLITTENHARDT P.M., Edit. (1985). Workshop on remote sensing of coastal transport in the northern Adriatic Sea. *Proc.*, Joint Res. Centre, Ispra, S.A.I. 05.E2.85.03, 247 p.
- SCHNEIDER S.R., MCGINNIS D.F., STEPHENS G. (1985). Monitoring Africa's Lake Chad basin with LANDSAT and NOAA satellite data. *Int. J. Rem. Sens.*, 6(1) : 59-73.
- SHIMODA H., ETAYA M., SAKATA T., GODA L., STELCZER K. (1986). Water quality monitoring of Lake Balaton using LANDSAT MSS data. *Symp. Rem. Sens. for Res. Devel. Envir. Manag.*, Enschede : 765-770.
- SMITH R.C., BAKER K.C. (1978). The bio-optical state of ocean waters and remote sensing. *Limnol. Oceanogr.*, 23(2) : 247-259.
- SMITH A.Y., BLACKWELL R.J. (1980). Application of digital image processing techniques and information systems to water quality monitoring of Lake Tahoe. *Satellite Hydrol.*, WHO Water Qual. Bull., 5 (1), 5 p.
- SMITH R.C., TYLER J.E., GOLDMAN C.R. (1973). Optical properties and color of Lake Tahoe and Crater Lake. *Limnol. Oceanogr.*, 18(2) : 189-199.
- SPITZER D., DIRKS R.W.J. (1986a). Bottom influence on the reflectance of the sea. *Int. J. Rem. Sens.*, in print.
- SPITZER D., DIRKS R.W.J. (1986b). Classification of bottom composition and bathymetry of shallow waters by passive remote sensing. *Proc. Symp. Rem. Sens. for Res. Devel. Envir. Manag.*, Enschede : 775-777.
- STEWART R.H. (1981). Radar studies of the sea surface - an introduction. In "Oceanography from space", J.F.R. Gower, édit. : 443-447.
- STOW D.A. (1987). Numerical derivation of a hydrodynamic surface flow field from time sequential remotely sensed data. *Rem. Sens. Env.*, 23 : 1-22.
- STRONG A.E. (1974). Remote sensing of algal blooms by aircraft and satellite in lake Erie and Utah lake. *Rem. Sens. Env.*, 3(2) : 99-107.
- STRUB T., POWELL T.M., ABBOTT M.R. (1984). Temperature and transport patterns in lake Tahoe : Satellite imagery, field data and a dynamical model. *Verh. Int. Verein. Limnol.*, 22 : 112-118.
- TANIS F.J. (1980). A remote sensing technique to monitor Cladophora in the Great Lakes. EPA-600/3-80-075, 28 p.
- TASSAN S. (1987). Evaluation of the potential of the THEMATIC MAPPER for marine applications. *Int. J. Rem. Sens.*, 8(10) : 1455-1478.
- THOMAS Y.F. (1984). Mouvements et charges en matières en suspension des eaux de surface de la Manche. *Proc. 18th Int. Symp. Rem. Sens. Env.*, Paris : 1703-1713.
- VANOUPINES P.I.G.M. (1986). A simple atmospheric correction algorithm for Landsat Thematic Mapper satellite images. *Symp. Rem. Sens. for Res. Devel. Envir. Manag.*, Enschede : 787-791.
- VERDIN J.P. (1985). Monitoring water quality conditions in a large western reservoir with LANDSAT imagery. *Phot. Eng. Rem. Sens.*, 51(3) : 343-353.

VIOLLIER M., TANRE D., DESCHAMPS P.Y.
(1980). An algorithm for remote sensing
of water color from space. *Bound. Layer
Met.*, 18 : 247-267.

WADSWORTH A., PETIT M. (1988). *SPOT, un
satellite pour l'océanographie ?* SPOT 1,
utilisation des images, bilan, résultats.
CEPADUES-Editions, Toulouse : 1087-1094.

WEZERNAK C.T., TANIS F.J., BAJZA C.A.
(1976). Trophic state analysis of inland
lakes. *Rem. Sens. Env.*, 5 : 146-165.

WYSZECKI G., STILES W.S. (1982). *Color
Science*. John Wiley, New York, 950 p.