

APPLICATION DES DONNÉES LANDSAT A L'ESTIMATION DE LA PRODUCTION DU PHYTOPLANCTON DANS LE LAC TCHAD

JACQUES LEMOALLE

Hydrobiologiste O.R.S.T.O.M.
c/o I.N.R.A. 74203 Thonon-les-Bains

RÉSUMÉ

Lorsque les données de terrain indiquent qu'il existe une relation entre la transparence de l'eau (disque de Secchi) et la concentration en chlorophylle du phytoplancton, les luminances de surface mesurées par le satellite peuvent être utilisées pour estimer quantitativement la répartition de l'activité photosynthétique du phytoplancton (production brute). Les conditions d'application, ainsi que deux exemples se rapportant aux eaux libres de la cuvette sud du lac Tchad en 1975 sont donnés, avec des productions brutes moyennes estimées de 3,76 et 0,91 g O₂ m⁻² jour⁻¹ respectivement le 22 juin et le 8 octobre 1975, pour une surface d'eau libre de 1 500 km² dans la cuvette sud du lac.

SUMMARY

APPLICATIONS OF LANDSAT DATA FOR ESTIMATING PHYTOPLANKTON PRODUCTION IN LAKE CHAD (AFRICA)

When relationships between water transparency and chlorophyll concentration are observed in situ, the surface radiance, as measured by the satellite, can be used to estimate the phytoplankton distribution and production. The conditions for such use of satellite data, and applications to lake Chad during 1975, are described. In situ measurements, synchronous with Landsat passages, rather strong horizontal gradients of the optical parameters within a single "type" of water are necessary. A "type" of water is defined as having a rather steady composition of the main substances contributing to its optical characteristics, although these substances may vary in their concentration. Mean gross production values in the open waters of the southern basin of lake Chad, with an area of 1500 km², have been estimated as 3.76 and 0.91 g O₂ m⁻² day⁻¹, respectively on June 22 and October 8, 1975. The corresponding ranges of chlorophyll concentration (mg Chl a m⁻³) were then 4-197 (June) and 0.8-14 (October).

Le lac Tchad est un écosystème vaste et hétérogène dans lequel les paramètres de la production primaire (transparence et chlorophylle) varient dans une large gamme en fonction du lieu et du temps. Il en résulte que les mesures qu'il est possible d'effectuer sur le terrain sont insuffisantes pour obtenir une estimation synoptique convenable de la répartition des différents paramètres sur l'ensemble du lac.

Une solution à ce problème est fournie, dans certaines conditions, par les satellites Landsat d'observation de la terre dont les données ont été utilisées pour des études de la qualité des eaux de surface en différentes régions du monde. Nous donnons ici un exemple de l'application de ces

données dans une estimation synoptique de la production phytoplanctonique des eaux libres de la cuvette sud du lac Tchad (1 500 km² en 1975) à partir d'une série de mesures de terrain effectuées sur une radiale.

1. MÉTHODES

1.1. Les données Landsat

Nous rappelons ici les principales caractéristiques des satellites et données Landsat qui sont abondamment décrites par ailleurs (Équipe FRALIT, 1977; O.R.S.T.O.M., 1977 et 1978).

Les Landsat ont une orbite quasi circulaire à 920 km d'altitude. Ils couvrent toute la surface de la terre, à l'exception des zones polaires, en 18 jours; l'orbite étant héliosynchrone, ils fournissent une vue de chaque point de la terre vers 9 h 30 locale (azimut du soleil constant). Chaque scène a environ 180 km de côté.

Le radiomètre à balayage (multispectral scanner, MSS) possède 4 canaux, MSS4 (500-600 nm), MSS5 (600-700 nm), MSS6 (700-800 nm) et MSS7 (800-1100 nm) dans le proche infra-rouge. Le radiomètre enregistre dans les 4 canaux l'énergie lumineuse que lui envoie un élément de surface terrestre de 79×79 m, qui constitue la résolution au sol. Du fait du recouvrement latéral des éléments successifs, le point élémentaire de l'image (élément d'image, ou pixel) correspond à 57×79 m. Une image est constituée de 2 256 lignes de 3 240 éléments chacune. L'énergie envoyée par un élément de résolution est sa luminance, qui est égale au produit de l'énergie incidente au sol par son coefficient de réflexion. Du fait de l'absorption et de la diffusion par l'atmosphère, la luminance observée par le satellite est différente de la luminance au sol.

Dans une scène, chaque point est caractérisé par sa position dans la ligne (X ou n° de colonne) et par le numéro de sa ligne (Y); les luminances observées dans le canal i sont notées L_i .

Pour chacune de ces scènes de 180 km de côté, les données sont retransmises à une station de réception, après stockage éventuel en mémoire si aucune station n'est en vue directe du satellite. Nous notons ici l'avantage pour le continent africain de disposer prochainement d'une station de réception à Ouagadougou. En effet, les mémoires des Landsat sont rapidement encombrées par la masse des données qu'ils accumulent, d'où une limitation actuelle des données disponibles, et une fréquence d'obtention de données sur le lac Tchad, par exemple, beaucoup plus faible que la fréquence théorique.

Les données originales sont donc des données numériques, disponibles sur bandes magnétiques délivrées par les stations de réception. A partir de ces bandes, des images semblables à des photographies aériennes peuvent être reconstituées, soit une image en noir et blanc pour chaque canal, soit une combinaison colorée des canaux 4, 5 et 7 (fausses couleurs).

1.2. Utilisation des données Landsat pour l'étude des eaux de surface

Bien que l'intérêt pratique domine ici, nous rappelons d'abord brièvement quelques aspects théoriques de l'application des données Landsat aux eaux superficielles.

La luminance d'une surface d'eau dépend de son facteur de réflexion diffuse R_λ , qui est proportionnel au rapport b'/a , où b' est le coefficient de rétrodiffusion optique et a le coefficient d'absorption vraie (DUNTLEY *et al.*, 1974). L'influence de substances participant à ces coefficients (chlorophylle du phytoplancton, substances dissoutes ou particulières) a été étudiée en détail par MOREL et PRIEUR (1977, 1978) pour le milieu marin, dans le domaine visible. Ces auteurs ont montré qu'une bonne connaissance des relations liant les propriétés optiques du milieu est nécessaire pour lever l'indétermination associée aux valeurs de R_λ seul. Pour des masses d'eau océaniques, cette indétermination peut être résolue par des mesures de terrain simultanées.

Le signal qui provient au satellite est la luminance de l'eau, modifiée par la réflexion spéculaire à la surface, par la rétrodiffusion atmosphérique, qui peut être bien supérieure au signal lui-même en milieu marin, et par l'absorption du signal initial lors de son trajet à travers l'atmosphère, ces modifications étant dépendantes de la longueur d'onde λ . Nous pouvons remarquer que si le signal initial diminue quand λ augmente, c'est aussi dans le domaine du rouge et du proche infra-rouge que les modifications dues à l'atmosphère sont les plus faibles.

L'épaisseur de la couche d'eau qui participe à 90 % du signal (donc de R_λ) est $Z_{90} \approx 1/K_\lambda$ où K_λ est le coefficient d'atténuation verticale de la lumière pour la longueur d'onde λ . Dans le cas d'eaux très claires, Z_{90} est d'environ 19 m en canal MSS4, de 2,3 m en canal MSS5 et de l'ordre du centimètre en MSS7 (GORDON et Mc CLUNEY, 1975; THOMAS, 1978).

La complexité des interactions entre les différents paramètres qui interviennent chacun selon son spectre propre, et l'indétermination inhérente qui en résulte, font que les données de télédétection ne sont utilisables que dans les cas simples. En pratique, il faut que les substances qui participent aux valeurs de a et b' restent dans un rapport constant, ou que l'une des substances ait une action bien supérieure aux autres, qui sont alors négligeables. Il faut de plus que les gradients horizontaux soient assez importants pour que les différences de luminances puissent être détectées.

Dans l'étude des eaux intérieures, la faible luminance de l'eau dans les canaux 6 et 7 est utilisée pour inventorier et délimiter les surfaces en eau, comme en cartographie infra-rouge aéroportée. La répétitivité des données Landsat est mise à profit dans le cas de nappes d'eau de surface variables, notamment pour délimiter l'extension de crues fluviales (DEUTSCH, 1976) ou les variations de surface des lacs peu profonds : lac Tchad (LEMOALLE, 1978), ou playas d'Iran (KRINSLEY, 1976). Des données de terrain

simultanées sont néanmoins indispensables pour différencier les terrains humides (sables, sols ou vases) des surfaces d'eau libre turbide dont la réflectance spectrale est très voisine (Équipe FRALIT, 1977).

Les surfaces en eau étant identifiées, trois principaux types d'études ont jusqu'à présent été faits : études qualitative et quantitative des particules minérales, classification trophique des lacs, et estimation des concentrations en chlorophylle.

L'étude qualitative des sédiments consiste en la détermination des concentrations relatives et des trajets suivis par les particules dans les estuaires ou le long des côtes, ainsi que des points éventuels d'érosion ou de sédimentation. Les variations de luminance en canal 5 sont généralement employées, et les exemples d'application sont nombreux (BUKATA *et al.*, 1974 et 1975; ABIODUN, 1976; DAVID *et al.*, 1976; Équipe FRALIT, 1977; THOMAS, 1978).

Dans certains cas, il est possible d'établir des corrélations entre la concentration en solides et les luminances Landsat, d'où des estimations quantitatives des phénomènes décrits plus haut. Le canal MSS5 est là aussi le plus utilisé (BENNETT et SYDOR, 1974; KLEMAS *et al.*, 1974; ROUSE et COLEMAN, 1976). Les influences de l'angle du soleil (Mc GAULEY et YARGER, 1975), ainsi que celle de la taille et de la nature des particules ont été décrites (BOWKER *et al.*, 1975). Les luminances en canal 6 ou 7 sont employées pour de fortes turbidités (RITCHIE *et al.*, 1975 et 1976). Cependant, si le phytoplancton intervient pour une part notable et variable dans l'absorption de la lumière, les corrélations sont moins nettes (JOHNSON, 1975).

Inversement, les déterminations de chlorophylle peuvent être complètement perturbées par une turbidité minérale importante (BOWKER *et al.*, 1975; BOWKER et WITTE, 1975; SZEKIELDA *et al.*, 1977). Une situation favorable pour l'estimation des concentrations phytoplanctoniques apparaît dans le cas de fleurs d'eau, lorsque la chlorophylle domine dans les luminances en canal 6 (STRONG, 1974) ou lorsque turbidité et chlorophylle sont liées par des relations étroites, déterminées *in situ* pour toute la gamme des concentrations observées (HARRIS *et al.*, 1976). L'utilisation des canaux 6 et 7, pour lesquels Z_{90} est très faible, implique alors que la colonne d'eau a une structure verticale homogène.

L'état trophique des lacs est défini par des indices faisant intervenir, entre autres, la transparence de l'eau et la concentration en chlorophylle au cours de l'été. Certaines relations expérimentales entre l'état trophique d'une série de lacs et des combinaisons entre canaux de leurs luminances de surface ont été établies (BOLAND, 1976; WEZERNAK *et al.*, 1976). Ces comparaisons entre différents lacs observés sur une même scène ne sont cependant valables

que si un même type d'eau est présent partout, ce qui est rarement le cas. De plus l'optimisation des corrélations multivariées utilise des combinaisons de canaux dont la signification physique peut être complexe, interdisant toute extrapolation.

2. APPLICATION AU LAC TCHAD

Une partie de la scène 82 2151 08 394 du 22 juin 1975 (sur bande magnétique), correspondant aux eaux libres du sud-est situées devant le delta du Chari, a été étudiée au moyen de programmes réalisés par le bureau de télédétection de l'O.R.S.-T.O.M. Les données de terrain correspondantes ont été obtenues lors d'un trajet sur l'axe delta-Kalom Limnigraphe le 1^{er} juillet 1975 (tourné W, dont l'ensemble des résultats physico-chimiques est donné ailleurs (CHANTRAINE et LEMOALLE, 1976) (fig. 1).

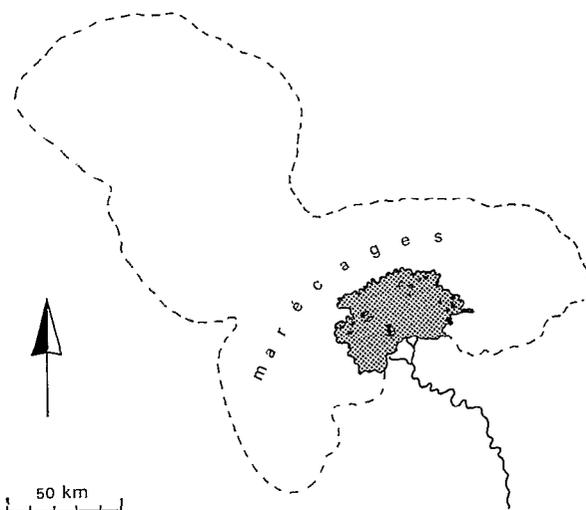


Fig. 1. — Les eaux libres de la cuvette sud du lac Tchad en juin 1975 (grisé) et limites du lac pour un niveau normal (tireté).

Open waters in the southern basin of Lake Chad (gray) during June 1975, and the shoreline (dashed line) of the lake before the 1972-1973 drought.

2.1. Les données Landsat

Une première étude effectuée sur une transversale de la zone étudiée a permis de définir les luminances de l'eau du lac dans cette région. La lecture des luminances a été faite sur des groupements de 5×5 éléments d'image centrés sur la colonne $X = 920$ (fig. 2) et correspondant à l'eau libre du lac. Dans chacun des groupements, la moyenne de chaque ligne a été calculée. De ces cinq moyennes, on a

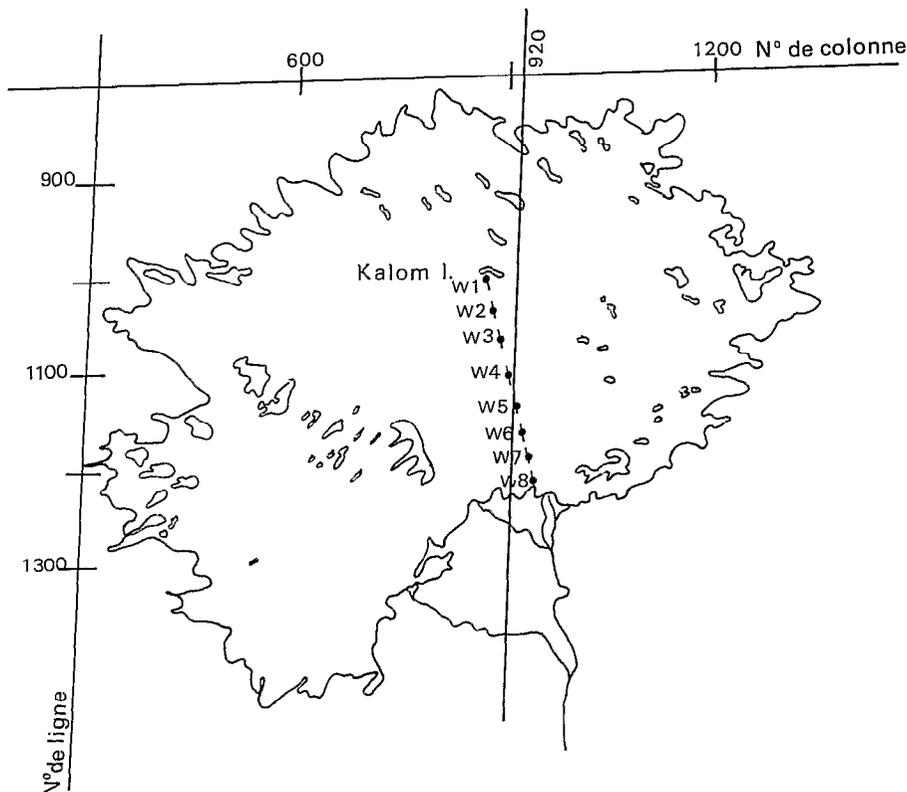


Fig. 2. — Situation de Kalom, et système de référence par ligne et colonne dans la vue du 22 juin 1975. Position des prélèvements effectués le 1^{er} juillet 1975 (points W).

The study area within the line and column reference grid of Landsat scene, 22 June 1975. In situ sampling stations (1 July 1975) are noted W.

éliminé la plus forte et la plus faible de façon à ne pas retenir les valeurs aberrantes qui peuvent provenir du dérèglement de l'un des six détecteurs (striping). La moyenne des trois lignes restantes est considérée comme définissant le groupement de centre Y, 920. Les valeurs ainsi obtenues pour 23 groupements permettent de définir une représentation synthétique des caractéristiques spectrales des eaux libres (figure 3, où sont représentées la moyenne et les valeurs extrêmes des luminances dans chaque canal). Nous remarquons en outre que :

— la gamme des luminances observées dans chaque canal, représentée par l'étendue et l'écart type de 23 valeurs, est relativement faible, mais aussi variable suivant le canal. En supposant que l'étendue représente la sensibilité à une variation de la qualité de l'eau, cette sensibilité est bonne en canal 6, encore notable en canal 7, mais très faible dans les bandes 4 et 5 ;

— les relations entre les luminances des différents canaux, résumées par la matrice de corrélation

ci-dessous, indiquent une certaine redondance entre les informations fournies par les canaux 6 et 7 en ce qui concerne la région des eaux libres de la cuvette du lac.

Matrice de corrélation (n = 23)

	L ₄	L ₅	L ₆	L ₇
L ₄	1	0,28	0,20	0,03
L ₅		1	0,16	0,16
L ₆			1	0,91
L ₇				1

La relation linéaire entre les luminances L₆ et L₇ est représentée figure 4. Cette relation, qui n'est valable que pour la région étudiée, indique que les eaux appartiennent à un même type, c'est-à-dire de constante composition relative des divers éléments qui participent à la luminance. Il n'en est pas de même des petites zones d'eau libre disséminées dans les marécages de l'archipel situé plus au nord, où une forte luminance L₇ correspond à une plus faible valeur de L₆, dans des eaux riches en matière organique dissoute et en phytoplancton, et pauvres en suspensions minérales.

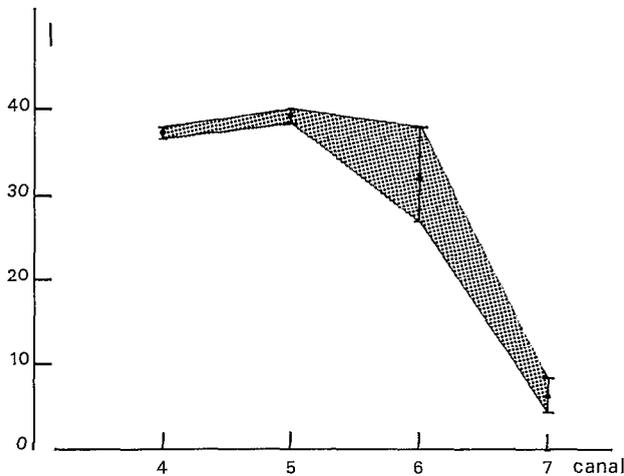


Fig. 3. — Luminances moyennes et extrêmes des eaux libres. La surface ainsi définie représente le « serpent » des eaux libres dans la scène Landsat.

Mean and extreme values of the surface radiance in the open waters. The gray area defines the « snake » characterizing the water radiances in this scene.

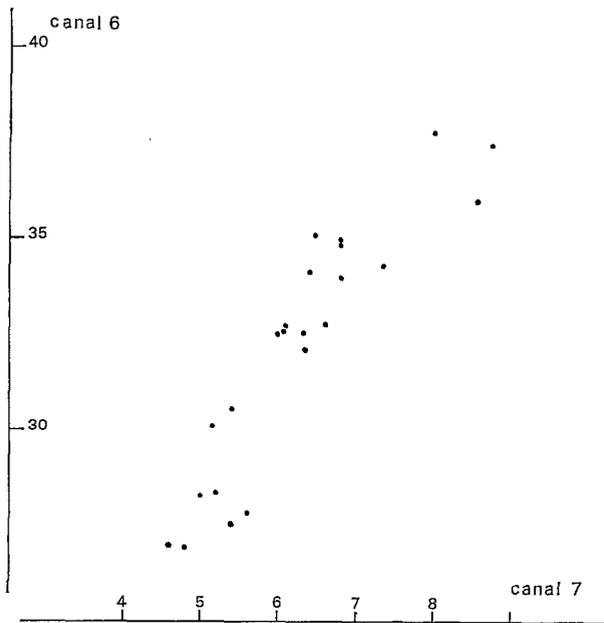


Fig. 4. — Relation entre les luminances de l'eau dans les canaux 6 et 7, pour les 23 groupements le long de la colonne 920.

Relationship between radiances in channels MSS6 and MSS7, along column 920, in the open waters.

L'évolution des luminances dans les canaux 6 et 7 a été suivie, en utilisant la même technique des groupements 5×5 éléments d'images, sur une

trajectoire correspondant au trajet parcouru sur le terrain (et définie sur l'image par l'équation $Y = 3,25 X - 1855$). Ces luminances, reportées figure 5 en fonction de Y, présentent un minimum vers le delta, les plus fortes valeurs étant observées vers le nord.

2.2. Mesures de terrain

Sur le terrain, la localisation approximative des points de prélèvements a été faite par chronométrage des temps de parcours successifs entre le delta et l'île de Kalom (fig. 2). Les paramètres retenus sont la transparence DS mesurée au disque de Secchi, et la concentration B en chlorophylle des échantillons de surface, exprimée en mg Chla/m^3 (tabl. I). Du fait de la turbulence et de la faible profondeur (entre 1 et 2 m aux points de prélèvement), la répartition verticale du phytoplancton est en général homogène. La concentration de surface est donc représentative de toute la colonne d'eau.

TABLEAU I

Paramètres concernant les mesures de terrain (1.7.1975) et les luminances Landsat (22.6.75) dans les eaux libres
In situ measurements (july, 1975) and Landsat radiance (june 22, 1975) of the open waters area

Point	B (mg.m^{-3})	DS (cm)	p %	L_6	L_7
w1	80	11	13	33,0	6,45
w2	52	19	15	34,7	6,70
w3	89	12	16	33,7	6,57
w4	64	17	16	31,9	5,85
w5	47	19	13	29,9	5,10
w6	38	27	15	28,2	4,85
w7	20	30	9	27,5	4,50
w8	12	35	6	27,0	4,50

Alors qu'il n'existe pas, en période de Tchad normal, de relation entre la transparence et la chlorophylle, une relation du type $B = f(1/DS)$ apparaît parfois depuis l'assèchement partiel de 1973. C'est notamment le cas des échantillons prélevés le 1^{er} juillet 1975 où, pour les 8 échantillons, le coefficient de corrélation entre B et $1/DS$ est de 0,96 (fig. 5), bien que la part du phytoplancton dans l'absorption de la lumière soit relativement faible (14 % dans les eaux centrales de la cuvette) (p %, tabl. I). Une telle relation, fréquente dans des lacs plus profonds généralement pauvres en suspensions minérales, limite, ici, la généralité pour le Tchad de l'exemple traité.

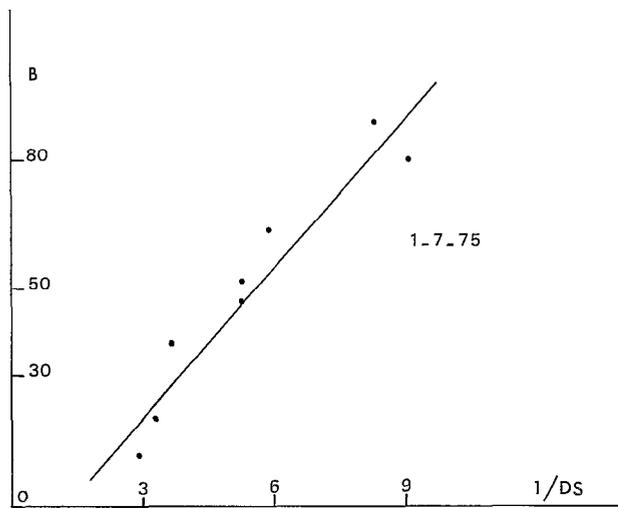


Fig. 5. — Relation entre les mesures de terrain B (mg Chla m⁻³) et 1/DS (m⁻¹).

Relationship between chlorophyll concentration B (mg Chla m⁻³) and Secchi disc reciprocal 1/DS (m⁻¹).

L'examen de la figure 5 indique par ailleurs que tous les échantillons présentent la même relation entre B et DS, ce qui définit un même type d'eau incluant aussi le point W2, bien que celui-ci se situe à part dans l'évolution nord-sud des concentrations et des transparences.

2.3. Relations entre les données Landsat et les mesures de terrain

Ayant déterminé les coordonnées des points de prélèvement dans le système (Y, X) de l'image Landsat, les courbes de la figure 6 représentant $L_6 = f(Y)$ et $L_7 = f(Y)$ permettent de définir les luminances de ces points (tabl. I). Les relations entre les luminances L_6 et L_7 et les paramètres B et 1/DS sont représentés figure 7.

Dans les quatre cas de figure, un point se détache du groupe de mesures : le point W2 dont nous avons indiqué que, bien que correspondant au même type d'eau que les autres, il se situait à part dans l'évolution spatiale des transparences. Nous pouvons supposer que les valeurs trouvées en W2 le 1^{er} juillet correspondent à une masse d'eau très localisée qui n'existait pas à cet endroit lors du passage du satellite le 22 juin.

En admettant cette hypothèse, il est possible d'éliminer le point W2 et de tracer les relations liant L_6 et L_7 à B et 1/DS (fig. 7). Rappelons que ces relations ne sont valables que pour la scène considérée et dans la gamme de variation des

paramètres mesurés. Elles mettent cependant en évidence l'effet des paramètres du milieu sur les luminances perçues par le satellite, et donc l'utilité de ce dernier pour détecter les variations spatiales de la qualité de l'eau d'un lac.

Les droites de régression, qui donnent la meilleure estimation de B ou de 1/DS, L_i étant mesuré, sont :

$$\begin{cases} 1/DS = 0,86 L_6 - 20,5 & n = 7 & r = 0,963 \\ B = 10,58 L_6 - 269 & n = 7 & r = 0,987 \end{cases} \quad (1)$$

Pour cette dernière droite, l'intervalle de confiance de la droite, avec une probabilité de 95 %, est défini par :

$$t_{0,05} s_{\hat{y}} = 2,57 \times 4,95 \sqrt{\frac{1}{7} + \frac{x^2}{44,59}}$$

$$\begin{cases} \text{soit pour } I_6 = 30 & B = B_{\text{estimé}} \pm 4,8 \text{ mg/m}^3 \\ I_6 = 30 \pm 3 & B = B_{\text{estimé}} \pm 7,5 \text{ mg/m}^3 \end{cases}$$

Bien que la sensibilité en canal 7 soit moindre, les équations :

$$\begin{cases} 1/DS = 2,68 I_7 - 9,0 & n = & r = 0,973 \\ B = 32,2 I_7 - 125 & n = 7 & r = 0,983 \end{cases} \quad (2)$$

permettent d'estimer les paramètres de terrain avec une précision du même ordre :

$$\begin{cases} \text{pour } I_7 = 5,4 & B = B_{\text{estimé}} \pm 5,7 \text{ mg/m}^3 \\ \text{pour } I_7 = 5,4 \pm 1 & B = B_{\text{estimé}} \pm 9,1 \text{ mg/m}^3 \end{cases}$$

Le trajet effectué le 1^{er} juillet 1975 s'arrête à l'île de Kalom. Les relations observées sont donc limitées à $B \leq 80 \text{ mg/m}^3$. Cependant, des mesures effectuées à la même époque ont mis en évidence une augmentation de la chlorophylle au voisinage de la bordure de marécages qui forment la limite septentrionale des eaux libres. Les fortes luminances L_6 et L_7 détectées dans cette dernière région sont donc en accord avec les connaissances que nous en avons, et permettent d'extrapoler légèrement les relations que nous venons d'établir.

2.4. Discussion. Production journalière des eaux libres

Bien que de faible profondeur, la région étudiée peut être considérée comme optiquement profonde vis-à-vis de la télédétection, c'est-à-dire que le fond n'intervient pas dans les luminances de surface. En effet, la profondeur active Z_{90} s'écrit pour le Tchad $Z_{90} < 0,55 DS$ dans le visible (LEMOALLE, 1979) et est beaucoup plus faible dans le proche infra-rouge.

Nous avons constaté que, dans la scène étudiée, les canaux 4 et 5 sont relativement insensibles aux variations de qualité de l'eau. Les concentrations

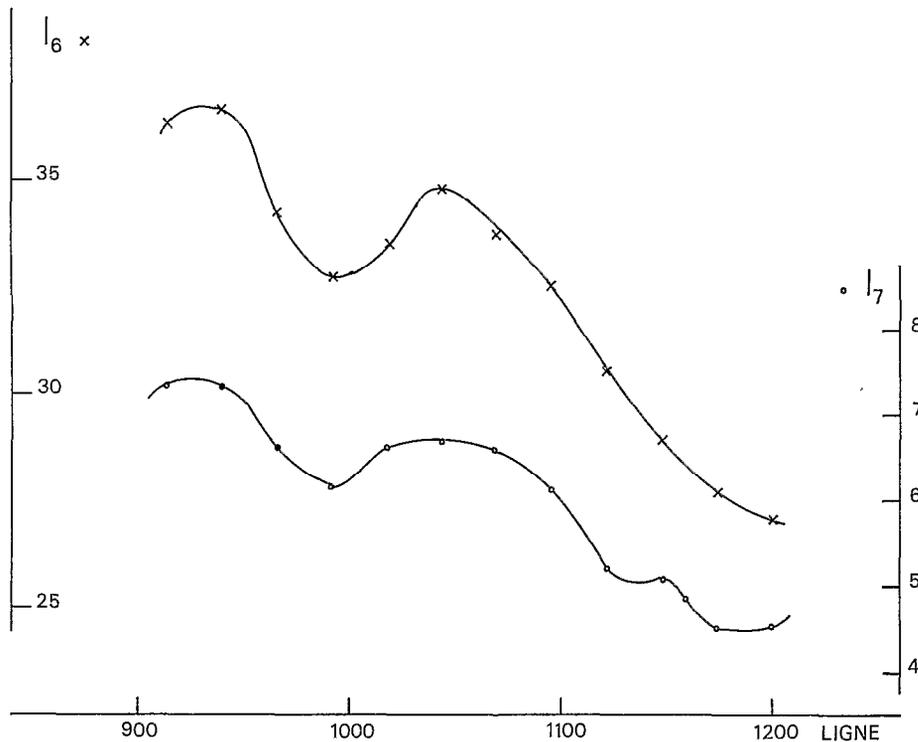


Fig. 6. — Évolution des luminances L_6 et L_7 sur la radiale joignant le delta à Kalom.
Radiance variations along the sampling path from the Chari delta to Kalom.

de suspensions ne sont cependant pas supérieures aux exemples décrits ailleurs (jusqu'à 300 mg/l) pour lesquels le canal 5 est un bon indicateur. Bien que la nature des particules ait une importance, nous pouvons penser que la diffusion atmosphérique, qui est surtout sensible dans les canaux 4 et 5, joue un rôle important dans cette scène.

Une représentation de la répartition des luminances dans les canaux 6 et 7 a été faite sur table traçante, ce qui permet de distinguer plusieurs classes d'eau et d'en tracer les limites, représentées figure 8. La zone subissant l'influence directe du Chari apparaît ainsi bien représentée à l'ouest du delta fonctionnel, le long de la côte. La zone péri-deltaïque au sens large occupe aussi la pointe sud du lac, tandis que les plus fortes valeurs de chlorophylle et de turbidité occupent les régions les plus éloignées du delta, avec cependant des zones plus transparentes sous le vent (de sud-ouest) de certains îlots-bancs.

Il a été montré que l'activité photosynthétique journalière $\Sigma\Sigma A$ ($\text{mg O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ jour}^{-1}$) pour un jour d'ensoleillement normal peut s'écrire (LEMOALLE, 1979) :

$$\log \Sigma\Sigma A = 2,50 + 1,044 \log B - \log (1/DS) \quad (3)$$

La production phytoplanctonique peut donc être évaluée au moyen des données Landsat, pour l'ensemble des eaux libres de la cuvette, en utilisant les relations (1) et (2) introduites dans (3). On en déduit une production journalière des eaux libres de 5 640 tonnes O_2/j pour une surface de 1 500 km^2 , soit en moyenne 3,76 $\text{g O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ jour}^{-1}$ pour la date considérée (22 juin 1975). La concentration moyenne étant $B = 86 \text{ mg m}^{-3}$, soit, pour une profondeur moyenne de 1,5 m, une quantité de phytoplancton de l'ordre de 40 000 tonnes en appliquant un facteur de conversion (poids frais/chlorophylle) de 200. Ces relations ne seraient cependant pas valables pour les mares de l'archipel, qui contiennent des concentrations notables de matière organique dissoute et peu de suspensions minérales.

La même technique a été appliquée aux données Landsat en canal MSS7 du 8 octobre 1975, avec des mesures de terrain du 10 octobre (figure 9, tableau II). A cette époque de l'année, la région des eaux libres est soumise à une intense circulation horizontale correspondant à la crue du Chari, et le temps de renouvellement de la masse d'eau considérée est de l'ordre de 18 jours. Les relations entre B et DS d'une part, et L_7 et DS d'autre part, sont évidemment différentes de ce qu'elles étaient en juin, mais elles

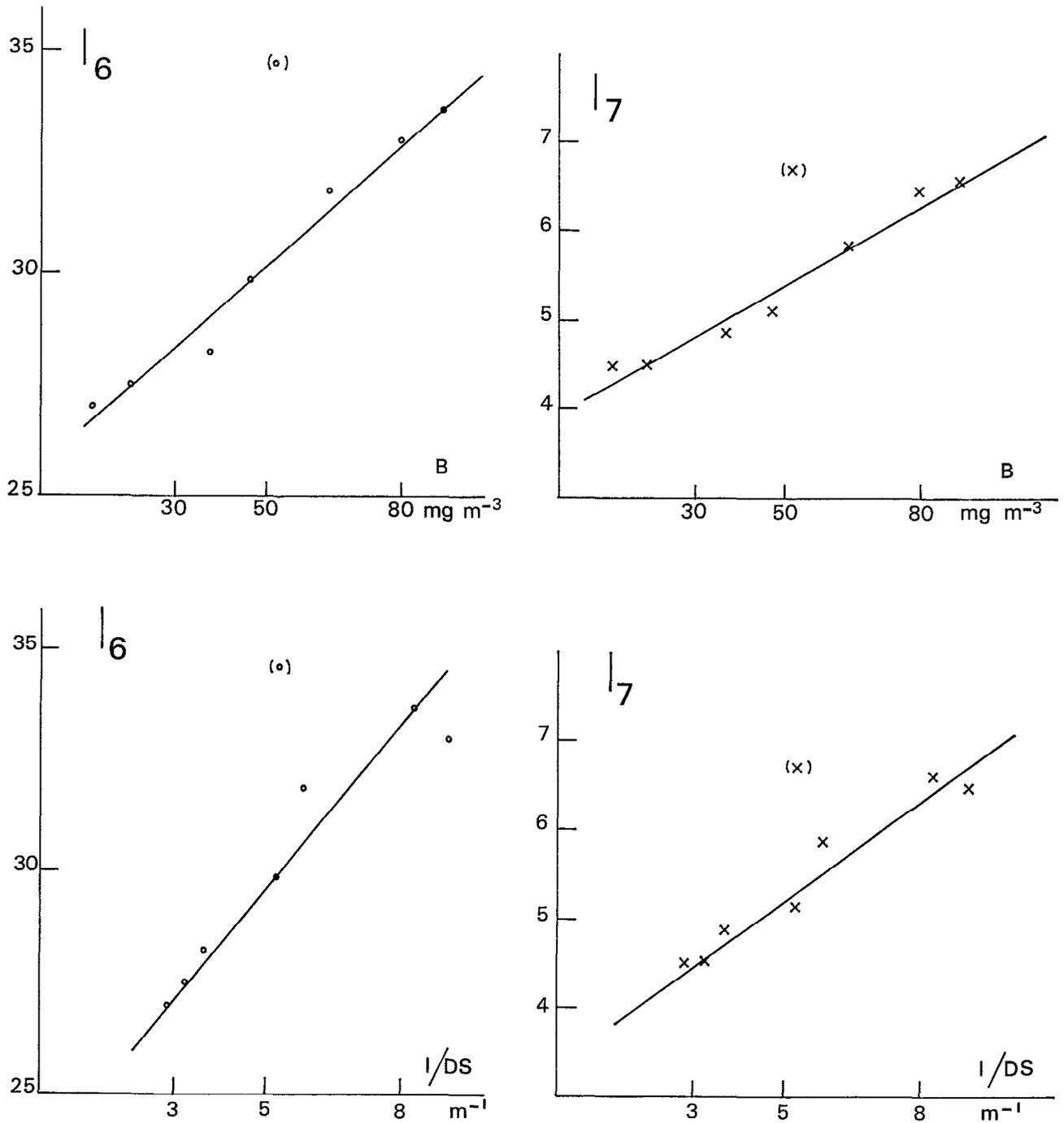


Fig. 7. — Relations entre les mesures de terrain et les luminances observées par le satellite.
Relationships between in situ measurements and Landsat radiance.

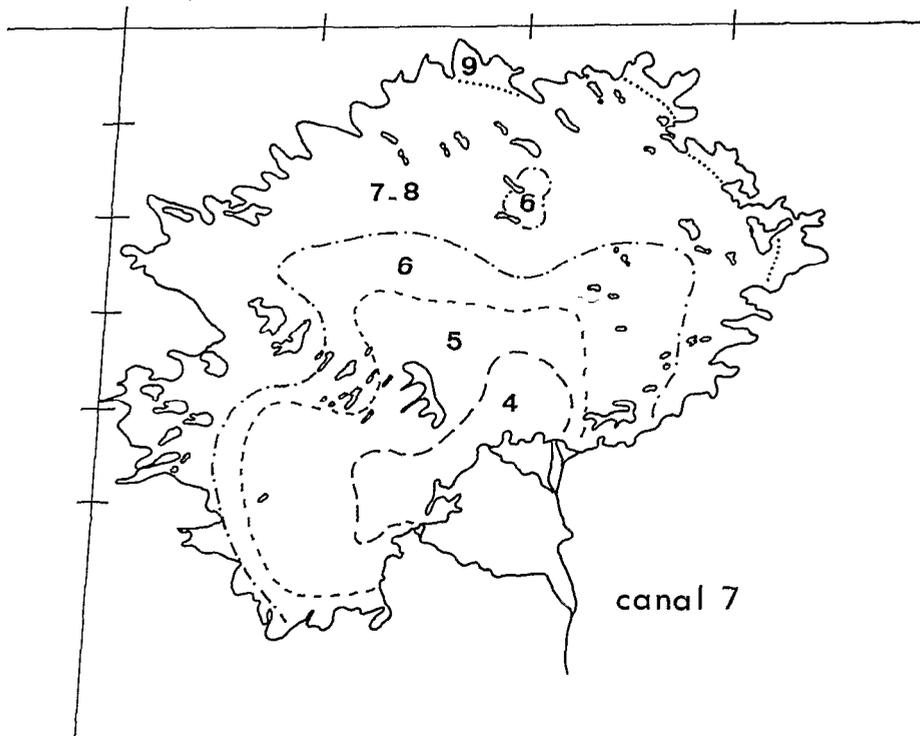
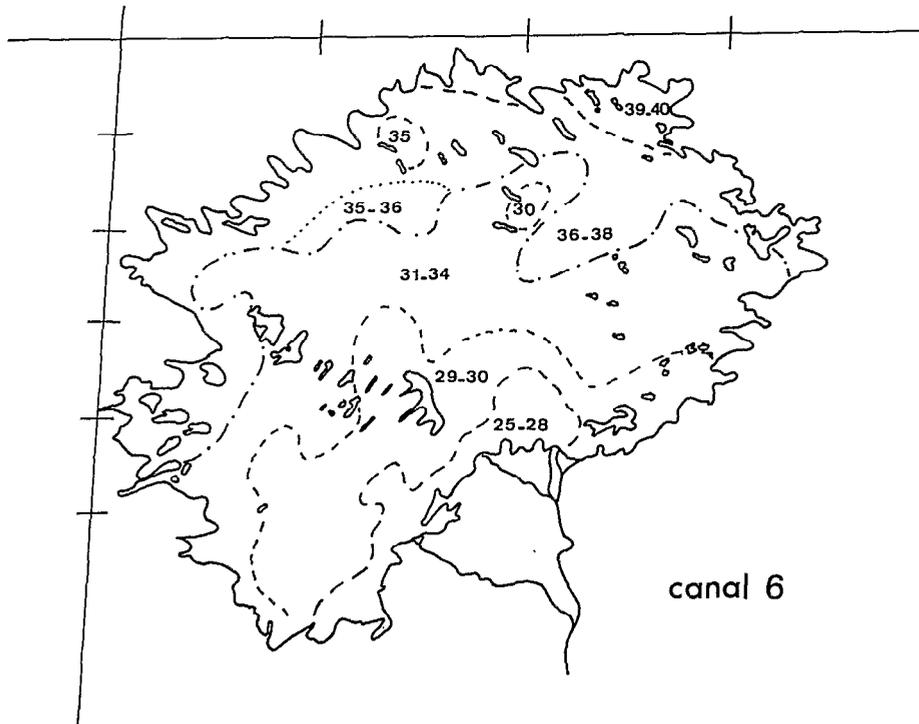


Fig. 8. — Schéma de répartition des luminances, en canal MSS6 et MSS7, dans les eaux libres de la cuvette sud, le 22 juin 1975. Aux fortes luminances correspondent les eaux turbides à forte concentration de chlorophylle.

Surface radiance distribution (channels MSS6 and MSS7) in the study area on June 22, 1975. High radiance values indicate high turbidity and chlorophyll concentrations.

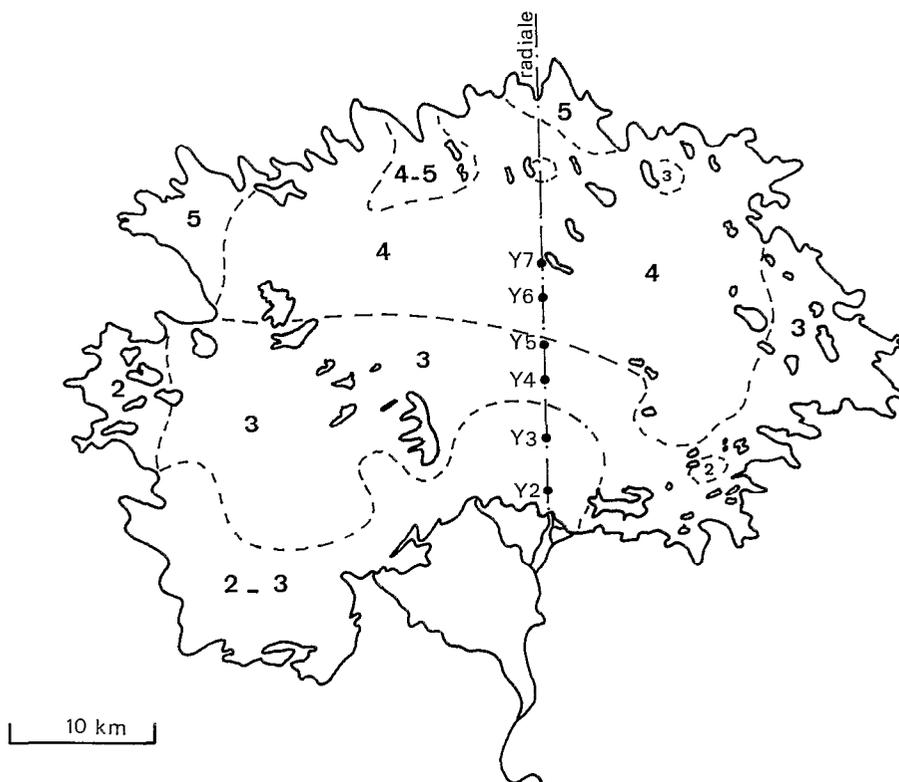


Fig. 9. — Les eaux libres de la cuvette sud le 8 octobre 1975. Position des points de prélèvements (10 octobre) sur la radiale, et répartition des luminances en canal MSS7.

Sampling stations (october 10, 1975) and distribution pattern of Landsat MSS7 radiance (october 8, 1975) in the open waters of the southern basin of Lake Chad.

TABLEAU II

Données de terrain et luminances correspondantes (8-10 octobre 1975)

In situ measurements and Landsat radiances (8-10 october 1975)

Point	B (mg.m ⁻³)	DS (cm)	Z	L ₄	L ₅	L ₆	L ₇
Y1	8	50	3,3	30,83	31,81	18,44	2,72
Y2	12	60	3,3	31,44	30,61	18,08	2,44
Y3	8	50	3,4	32,00	31,58	20,33	2,67
Y4	—	43	2,8	33,03	33,14	23,06	3,17
Y5	3,1	35	3,4	33,44	34,33	25,78	3,75
Y6	5	35	3,2	33,42	34,22	26,22	3,81
Y7	5	38	2,7	33,44	34,11	25,53	3,67

correspondent aux conditions d'application qui ont été définies.

Les valeurs moyennes déterminées à partir de ces relations sont :

$$\overline{DS} = 0,4 \text{ m}, \quad \overline{B} = 5,5 \text{ mg Chla m}^{-3}, \\ \Sigma \Sigma A = 0,91 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ j}^{-1}$$

avec au total une production brute de 1 345 tonnes d'oxygène par jour sur une surface d'eau libre de 1 480 km² (328 964 éléments d'image).

3. CONCLUSION

Grâce aux données Landsat, il est donc possible d'extrapoler à une surface de lac les mesures de chlorophylle et de transparence effectuées sur le terrain le long d'une transversale. Dans le cas où de grandes distances sont en jeu, comme pour le lac Tchad, cette technique présente un intérêt évident. Il faut cependant remarquer qu'elle n'est valable que si :

- la colonne d'eau est homogène dans la zone euphotique,
- les paramètres B et DS sont situés dans une gamme telle que leurs variations sont détectables par le satellite,
- la surface étudiée ne comporte ni nuage ni ombre de nuage,

— des données de terrain sont collectées de façon aussi synchrone que possible du passage du satellite, — les eaux étudiées appartiennent toutes à un même type. C'est-à-dire qu'il doit exister une relation univoque entre la transparence de l'eau et la concentration en phytoplancton, la même relation étant valable pour toute la surface considérée.

Ces conditions limitent certes l'utilisation des données des satellites. Nous venons cependant de montrer qu'il existe des cas favorables, qui sont

probablement plus fréquents pour des lacs eutrophes, de profondeur moyenne, où la zone euphotique est homogène et moins sujette à des turbidités minérales. Dans de telles situations, l'apport des données Landsat prend toute sa valeur et apporte une connaissance du milieu qui n'était pas accessible par les moyens classiques.

*Manuscrit reçu au Service des Publications de l'O.R.S.T.O.M.
le 18 septembre 1979.*

BIBLIOGRAPHIE

- ABIODUN (A. A.), 1976. — Satellite survey of particulate distribution patterns in Lake Kainji. *Remote Sens. Environ.* 5 : 109-123.
- BENNETT (P.), SYDOR (M.), 1974. — Use of ERTS in measurements of water quality in lake Superior and the Duluth Superior Harbor. *In Remote Sensing of Earth Res.* Vol 3, Tullahoma, Tennessee, USA : 85-92.
- BOLAND (D. H. P.), 1976. — Trophic classification of lakes using Landsat 1 (ERTS-1) multispectral scanner data. USA ; E.P.A. 600/3-76-037, 245 p.
- BOWKER (D. E.) *et al.*, 1975. — An investigation of the waters in the Lower Chesapeake Bay area. Proc. 10th Symp. *Remote sensing of Environn.* Ann Arbor : 411-420.
- BOWKER (D. E.), WITTE (W. G.), 1975. — Evaluation of ERTS MSS digital data for monitoring water in the lower Chesapeake Bay area. *In Remote Sensing of Earth Res.* Vol. 4, Tullahoma, Tennessee USA : 591-600.
- BUKATA (R. P.), HARRIS (G. P.), BRUTON (J. E.), 1974. — The detection of suspended solids and chlorophyll *a* utilizing digital multispectral ERTS-1 data. *Comptes rendus 2^e symp. Canad. Télédétection*, Ottawa, 551-579.
- BUKATA (R. P.), HARAS (W. S.), BRUTON (J. E.), 1975. — The application of ERTS-1 digital data to water transport phenomena in the Point Pelee Rondeau area. *Verh. int. Verein. theor. angew. Limnol.* 19 : 168-178.
- CHANTRAINE (J. M.), LEMOALLE (J.), 1976. — Analyses d'eau du lac Tchad en 1975. *O.R.S.T.O.M. N'Djaména*, 14 p. *multig.*
- DAVID (D. J.) *et al.*, 1976. — Cartographie automatique des données des satellites Landsat. *Soc. Fr. Photograph. Bull. Fr.* 62 : 25-31.
- DEUTSCH (M.), 1976. — Optical processing of ERTS data for determining extent of the 1973 Mississippi river flood, in ERTS-1, a new window on our planet. *Geological Survey Profess. Paper* 929 : 209-213.
- DUNTLEY (S. Q.) *et al.*, 1974. — Ocean color analysis. *Scripps Inst. Ocean.* 74-10, 67 p.
- ÉQUIPE FRALIT, 1977. — Télédétection du littoral océanique de la France. Moutouge École Normale Sup., 310 p.
- GORDON (H. R.), MC CLUNEY (W. R.), 1975. — Estimation of the depth of sunlight penetration in the sea for remote sensing. *Applied Optics* 14, 2 : 413-416.
- HARRIS (G. P.), BUKATA (R. P.), BRUTON (J. E.), 1976. — Satellite observations of water quality. *Transp. Engineering J.*, Vol. 102, TE 3 : 537-554.
- JOHNSON (R. W.), 1975. — Quantitative sediment mapping from remotely sensed multispectral data. *Remote Sensing of Earth Res.* Vol 4, Tullahoma, Tennessee USA : 565-576.
- KLEMAS (V.), Bartlett (D.) *et al.*, 1974. — Coastal and estuarine studies with ErtS I and Skylab. *Remote Sens. Environ.* 3, 3 : 153-174.
- KRINSLEY (D. B.), 1976. — Lake fluctuations in the Shiraz and Neriz playas of Iran. *In ERTS-1, a new window on our planet; Geological Survey Profess. Paper* 929 : 143-149.
- LEMOALLE (J.), 1978. — Application des images Landsat à la courbe bathymétrique du lac Tchad. *Cah. O.R.S.-T.O.M. sér. Hydrobiol.*, vol. XII, n° 1 : 83-87.
- LEMOALLE (J.), 1979. — Biomasse et production phytoplanctoniques du lac Tchad (1968-1976). Relations avec les conditions de milieu. Thèse Doct. ès Sciences, Univ. Paris 6, 287 p.
- MC CAULEY (J. R.), YARGER (H. L.), 1975. — Kansas water quality using ERTS-1 *In Remote Sensing of Earth Res.* Vol. 4, Tullahoma, Tennessee, 521-541.
- MOREL (A.), PRIEUR (L.), 1977. — Analysis of variation in ocean color *Limnol. Oceanogr.* 22, 4 : 709-722.
- MOREL (A.), PRIEUR (L.), 1978. — Mesures par télédétection de la teneur de la mer en chlorophylle. Possibilités et limites des méthodes. *Publ. Sci. Tech. CNEXO, Actes Colloq. n° 5* : 67-92.

- O.R.S.T.O.M., 1977. — Les satellites d'observation de la terre Landsat. *Init. Doc. Techn.*, O.R.S.T.O.M., Paris, n° 34, 41 p.
- O.R.S.T.O.M., 1978. — Analyse multivariable. Procédure Loterie, *Init. Doc. Techn.*, O.R.S.T.O.M., Paris, n° 39, 78 p.
- RITCHIE (J. C.), SCHIEBE (F. R.), WILSON (R. B.), MAY (J.), 1975. — Sun angle, reflected solar radiation and suspended sediment in North Mississippi Reservoirs, in *Remote Sensing of Earth Res.* vol. 4. Tullahoma, Tennessee USA : 555-564.
- RITCHIE (J. C.), SCHIEBE (F. R.), MC HENRY (J. R.), 1976. — Estimating suspended sediment load from measurement of reflected solar radiation. In *Interactions between sediment and freshwater* H. L. Golterman ed., Junk Pudoc 1977 : 466-471.
- ROUSE (L. J.), COLEMAN (J. M.), 1976. — Circulation observations in the Louisiana Bight using Landsat imagery *Remote Sens. Environ.* 5, 1 : 55-66.
- STRONG (A. E.), 1974. — Remote sensing of algal blooms by aircraft and satellite in Lake Erie and Utah Lake. *Remote Sens. Environ.* 3, 2 : 99-107.
- SZEKIELDA (K. H.), SUSZKOWSKI (D. J.), TABOR (P. S.), 1977. — Skylab investigation of the upwelling off the northwest coast of Africa. *J. Cons. int. Explor. mer*, 37, 3 : 205-213.
- THOMAS (Y. F.), 1978. — Utilisation des données Landsat, pour la mise en évidence de la turbidité en zones littorales, limites des méthodes. *Publ. Sci. Tech. CNEXO*, Actes Colloq. n° 5 : 109-121.
- WEZERNAK (C. T.), TANIS (F. J.), BAJZA (C. A.), 1976. — Trophic state analysis of inland lakes. *Remote Sens. Environ.* 5, 2 : 147-165.