

UNIVERSITE DU QUEBEC

THESE

PRESENTEE A

L'INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAITRISE ES SCIENCES (EAU)

PAR

LUC PROULX

BACC. ES ARTS (GEOGRAPHIE)

APPLICATION DE LA TELEDETECTION A L'ETUDE DES PHENOMENES DE LIMNOLOGIE
PHYSIQUE DANS LE NORD DU QUEBEC

MARS 1983

TABLE DES MATIERES

	<u>Page</u>
TABLE DES MATIERES	ii
LISTE DES TABLEAUX	iv
LISTE DES FIGURES	v
REMERCIEMENTS	vii
INTRODUCTION	1
I TELEDETECTION: PROBLEMATIQUE ET TECHNIQUE	3
I.1 Le spectre électromagnétique et les senseurs utilisés en télédétection	3
I.1.1 Principes de fonctionnement de la télédétection	3
I.1.2 Les senseurs	4
I.2 L'ampleur des phénomènes et l'acquisition de l'information	16
I.3 L'analyse de l'information	18
I.4 Schéma synthèse	20
I.5 La télédétection et les masses d'eau	20
II LA TELEDETECTION ET LES PHENOMENES LIMNOLOGIQUES	28
II.1 La limnologie	28
II.2 Manifestation des phénomènes	30
II.3 Les phénomènes limno-physiques: description et représentation	31
II.3.1 Le bilan thermique	32
II.3.1.1 Les courants de convection	33
II.3.2 La dynamique des eaux	39
II.3.2.1 Les vagues de surface	39
II.3.2.2 Les vagues internes	40
II.3.2.3 Les seiches	48
II.3.2.4 Courants de densité des affluents	54
II.3.2.5 Les courants dans les lacs	64
II.3.2.6 La circulation de Langmuir	69
II.3.2.7 La barre thermique	74
II.3.2.8 La glace	78

III	APPLICATION AU NORD QUEBECOIS.....	84
	III.1 Les paramètres turbidité et couleur de l'eau.....	85
	III.2 Le paramètre température.....	91
	III.3 Le paramètre chlorophylle.....	92
	III.4 Le paramètre superficie.....	93
IV	LES DONNEES DE CONTROLE.....	96
	CONCLUSION.....	98
	BIBLIOGRAPHIE.....	99

LISTE DES TABLEAUX

	<u>Page</u>
TABLEAU 1: Senseurs les plus couramment utilisés au Canada et leurs caractéristiques générales	7
TABLEAU 2: Caractéristiques générales des senseurs installés à bord des satellites américains et dont les données peuvent être obtenues facilement au Canada	11
TABLEAU 3: Altitude de prise, surface couverte par cliché et résolution au sol des satellites Landsat, NOAA et Seasat	17
TABLEAU 4: Pourcentage d'absorption de diverses longueurs d'onde à travers un mètre d'eau lacustre de quelques lacs du Wisconsin ayant des concentrations de matières organiques (couleurs) différentes	25
TABLEAU 5: Indices de couleur des eaux de quelques rivières et lacs du Québec	87
TABLEAU 6: Turbidité rencontrée dans les eaux de certains plans d'eau du Québec	90

LISTE DES FIGURES

	<u>Page</u>
Figure 1: LE SPECTRE ELECTROMAGNETIQUE	5
Figure 2: COULEURS PERCUES SELON LES LONGUEURS D'ONDES	5
Figure 3: SPECTRE ELECTROMAGNETIQUE ET TRANSMITTANCE ATMOSPHERIQUE	15
Figure 4: ETAPES ET PROCESSUS NECESSAIRES A UNE ETUDE PAR TELEDETECTION	21
Figure 5: DIFFERENCES DE REACTIONS DES RAYONS SOLAIRES DEPENDAMMENT DU MILIEU RENCONTRE	23
Figure 6: INFLUENCE DES SOLIDES DISSOUS SUR L'ABSORPTION DE DIFFERENTES LONGUEURS D'ONDE A TRAVERS UNE COLONNE D'EAU D'UN METRE DE QUELQUES LACS DU WISCONSIN	26
Figure 7: DENSITE DE L'EAU DISTILLEE PAR RAPPORT A LA TEMPERATURE	34
Figure 8: EVOLUTION THEORIQUE DE LA STRATIFICATION THERMIQUE AU COURS DE L'ETE	36
Figure 9: CYCLE ANNUEL DE LA STRATIFICATION THERMIQUE DANS UN LAC	37
Figure 10: DEPLACEMENT DE L'EAU DANS UN LAC SOUS L'INFLUENCE DU VENT	42
Figure 11: DEPLACEMENT DE L'EAU DANS UN LAC STRATIFIE SOUS L'INFLUENCE DU VENT	42
Figure 12: DISTRIBUTION A LA SURFACE D'UN LAC STRATIFIE SOUS L'INFLUENCE DU VENT	43
Figure 13: STRATIFICATION HORIZONTALE SUR LE LAC SAINT-JEAN ENREGISTREE PAR LE SATELLITE LANDSAT I LE 20 JUILLET 1974	46
Figure 14: MOUVEMENTS DE BALANCEMENT D'UNE SEICHE DE SURFACE	49
Figure 15: BALANCEMENT DES COUCHES D'EAU DANS UN LAC APRES LA TOMBEE DU VENT	51
Figure 16: EFFET DE LA FORCE DE CORIOLIS SUR LE BALANCEMENT DES COUCHES D'EAU	52
Figure 17: MESURE DE L'AMPLITUDE D'UNE SEICHE	55
Figure 18: REPRESENTATION HYPOTHETIQUE DE CHANGEMENTS DE NI- VEAU CAUSES PAR DES SEICHES SUCCESSIVES	56

Figure 19:	EFFET DE LA FORCE DE CORIOLIS SUR UNE SEICHE DE SURFACE	57
Figure 20:	ENTREE DE RIVIERES DE DENSITE DIFFERENTE DANS UN LAC	59
Figure 21:	ETALEMENT EN SURFACE DE L'EAU D'UNE RIVIERE SE DEVERSANT DANS UN LAC	60
Figure 22:	PENETRATION EN PROFONDEUR DE L'EAU D'UNE RIVIERE SE DEVERSANT DANS UN LAC	60
Figure 23:	ETALEMENT EN SURFACE AU LAC SAINT-JEAN	62
Figure 24:	ETUDE PROLONGEE DE LA DIFFUSION DES EAUX D'UNE RIVIERE VERS LE FOND D'UN LAC PAR L'UTILISATION D'ONDES VISIBLES.....	63
Figure 25:	EMBOUCHURE DE LA RIVIERE TICOUAPE DANS LE LAC SAINT-JEAN	65
Figure 26:	ENTREE DU SAGUENAY DANS LE SAINT-LAURENT	65
Figure 27:	EFFET DE LA FORCE DE CORIOLIS SUR L'ENTREE DES RIVIERES DANS LES LACS (HEMISPHERE NORD)	67
Figure 28:	COURANTS DE SURFACE ENGENDRES PAR LE VENT SUR LE MICHIGAN	68
Figure 29:	LA DYNAMIQUE DES EAUX DU LAC SAINT-JEAN	70
Figure 30:	FORMATION DES BANDES DE PARTICULES A LA SURFACE DES EAUX SOUS L'INFLUENCE DU VENT	72
Figure 31:	CIRCULATION DE LANGMUIR SUR LE LAC DES DEUX-MONTAGNES	73
Figure 32:	CIRCULATION DE LANGMUIR DANS UNE BAIE SUR LA RIVIERE DU LIEVRE	73
Figure 33:	PHENOMENE DE BARRE THERMIQUE SUR LE LAC ONTARIO ...	75
Figure 34:	COURANTS DE DENSITE DE CHAQUE COTE DE LA BARRE THERMIQUE	76
Figure 35:	LAC SAINT-JEAN A LA FIN DE L'HIVER	80
Figure 36:	DEBUT DE DEGEL AU LAC SAINT-JEAN	80
Figure 37:	FRACTURES DANS LA GLACE AU DEBUT DU DEGEL AU LAC SAINT-JEAN	81
Figure 38:	FIN DU DEGEL AU LAC SAINT-JEAN	81
Figure 39:	PHENOMENE DE FOND A L'EMBOUCHURE DE LA RIVIERE MISTASSINI DANS LE LAC SAINT-JEAN	95

REMERCIEMENTS

L'auteur désire exprimer sa reconnaissance à l'égard de monsieur Gérald Jones, directeur de thèse, pour son assistance précieuse, sa disponibilité, son dynamisme et sa grande ouverture d'esprit.

Il convient également de remercier messieurs Hervé Audet et Michel Leclerc, conseillers, pour les judicieux commentaires émis lors de la correction de ce mémoire ainsi que messieurs Michel Goulet et Jacques Michaud du ministère de l'Environnement du Québec et monsieur Roger Lemire de la Société d'Energie de la Baie James pour leur aide incalculable dans l'acquisition des données sur la qualité des eaux du nord québécois.

INTRODUCTION

Bien qu'elle existe depuis un bon nombre d'années déjà, la télédétection comme outil de recherche scientifique a connu son développement le plus important depuis les cinq ou six dernières années. De nouvelles techniques, de nouveaux instruments, tous plus perfectionnés les uns que les autres, se succèdent à rythme très rapide qui malheureusement devance souvent la capacité d'application et de synthèse des chercheurs et utilisateurs dans ce domaine.

Dans son sens le plus général, le mot télédétection se définit par l'obtention de renseignements à distance. L'astronomie, par exemple, aurait pu être considérée jusqu'à tout récemment comme une science basée exclusivement sur la télédétection puisque depuis ses débuts, l'homme devait se contenter de se renseigner à distance, étant incapable de se rendre sur place pour parfaire ses études. En ce qui nous concerne toutefois, nous pouvons dire d'une façon plus technique que la télédétection vise à tirer de l'information de la surface terrestre et de l'atmosphère à partir du rayonnement qui y est émis et réfléchi (Henein et MacDowall, 1974).

La technique, telle que pratiquée présentement, est la source des données permettant une perception des phénomènes, soit spatiale, soit temporelle, sans pour autant les modifier dans leur contexte naturel.*

* Il faut toutefois souligner que l'utilisation d'émetteurs-récepteurs (par exemple les lasers) en télédétection pourrait être interprétée comme une modification, très minime il va sans dire, du système sous observation.

Les facteurs déterminants dans la perception spatiale des structures ou des phénomènes (résolution) sont la distance, la qualité du senseur, l'intensité et la qualité des ondes de même que la qualité du milieu de transmission de celles-ci. En ce qui a trait à la perception temporelle des phénomènes, le facteur déterminant est la fréquence d'observation (évolution et changement).

Il est évident qu'une connaissance de base du phénomène étudié, c'est-à-dire une connaissance de l'échelle, de la durée, de la fréquence et de l'environnement dans lequel se produit le phénomène en question, conduit à une utilisation beaucoup plus rationnelle de la télédétection. Toutefois, cette utilisation rationnelle dépend aussi de la connaissance de la technique utilisée (en l'occurrence la télédétection), de ses possibilités et de ses limites. Il nous semble donc nécessaire d'acquérir une bonne connaissance des deux éléments en cause dans ce travail, c'est-à-dire la télédétection et les phénomènes limnologiques, avant d'entreprendre une quelconque étude d'applicabilité.

CHAPITRE I

TELEDETECTION: PROBLEMATIQUE ET TECHNIQUES

I.1 Le spectre électromagnétique et les senseurs utilisés en télédétection

D'immenses progrès ont été faits depuis la première expérience de télédétection (telle que nous l'entendons aujourd'hui) c'est-à-dire la prise d'une photo aérienne de la ville de Paris à partir d'un ballon en 1856 (Harper, 1976). Le développement des techniques, tant aéronautiques que photographiques, a permis à la télédétection de devenir de plus en plus sophistiquée. Ainsi, nous sommes passés graduellement des photos aériennes en noir et blanc prises à basse altitude aux images fournies par des satellites à de très hautes altitudes. Ces images peuvent être captées dans différentes bandes du spectre électromagnétique dont certaines, même, ne sont pas visibles pour le système oculaire humain, ce qui nous permet d'étudier certains phénomènes d'un nouvel angle.

Déjà, de nouveaux appareils et une technologie encore améliorée, telle la télédétection au moyen de laser, sont à l'essai dans le but d'amener encore plus de possibilités et d'augmenter notre connaissance au niveau de certains phénomènes qui nous échappent toujours.

I.1.1 Principes de fonctionnement de la télédétection

L'image créée par le cerveau est le résultat d'une réception et d'une modification subséquente de l'énergie transmise

par les ondes électromagnétiques. Chaque objet de notre environnement réfléchit ou émet des ondes d'énergie diverse. Il est donc possible de les identifier physiquement et de caractériser leur comportement. La figure 1 nous montre la classification des ondes électromagnétiques en fonction de leur longueur d'onde et la figure 2 nous indique, dans la région visible du spectre électromagnétique, la gamme des ondes susceptibles d'être décomposées par l'oeil humain en différentes couleurs.

La télédétection fonctionne sur le même principe: elle capte l'énergie réfléchie ou émise de la surface de la terre. Toutefois, elle ne se limite pas seulement au spectre visible. Les ondes infrarouges de même que les micro-ondes peuvent être captées par certains senseurs de façon à donner plus d'envergure à notre "vision" de certains phénomènes pour des études particulières. L'étendue d'utilisation des ondes présentement pour la télédétection terrestre se situerait environ entre l'ultra-violet et les micro-ondes (Harper, 1976).*

Cependant, on ne retrouve pas cette gamme sur tous les senseurs. Au contraire, ceux-ci sont conçus généralement de façon à capter des longueurs d'onde bien définies. Il existe donc plusieurs types de senseurs, chacun étant relié à un type d'échantillonnage précis des ondes.

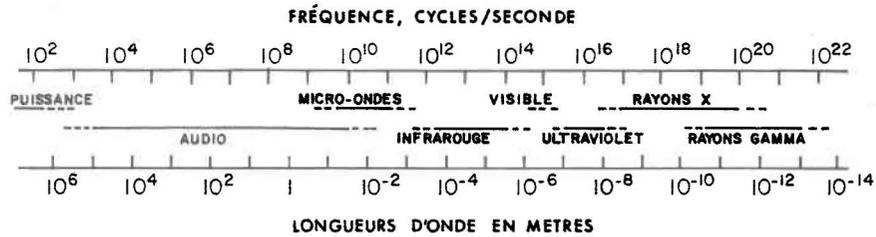
I.1.2 Les senseurs

En pratique, il existe deux grandes familles de sen-

* Il est important de noter ici que les observations astronomiques se basent sur des satellites dont les senseurs captent des longueurs d'ondes allant des rayons "X" jusqu'aux ondes radio (longues).

FIGURE 1

LE SPECTRE ELECTROMAGNETIQUE

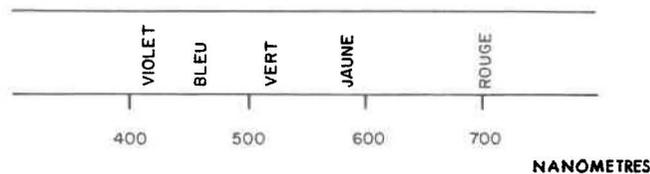


DESSINE D'APRES HALLIDAY ET RESNICK, 1966

A remarquer dans le spectre électromagnétique la portion étroite occupée par la région visible.

FIGURE 2

COULEURS PERCUES SELON LES LONGUEURS D'ONDES



DESSINE D'APRES HARPER, 1976

Les couleurs que nous percevons sont des ondes de différentes longueurs. Les ondes les plus courtes sont les "violets" et les plus longues, les "rouges".

seurs, c'est-à-dire les senseurs actifs et les senseurs passifs. Les senseurs passifs captent l'énergie solaire réfléchié ou réémise de la terre tandis que les senseurs actifs, souvent de type radar, émettent une longueur d'onde précise (souvent des micro-ondes) et captent le signal réfléchi de la surface terrestre. Les tableaux 1 et 2 nous résument certains renseignements sur les types d'appareils les plus couramment utilisés au Canada et sur les satellites américains dont les données peuvent être obtenues, de façon générale, facilement au Canada.

Comme nous pouvons le constater d'après ces tableaux, les longueurs d'onde utilisées par l'ensemble des senseurs ne couvrent pas une large portion du spectre électromagnétique. Cela est dû au fait que certaines longueurs d'onde ne peuvent pas être utilisées avec un bon rendement. En effet, comme nous le voyons à la figure 3, certaines ondes sont presque complètement absorbées par l'atmosphère et seulement un faible pourcentage de celles-ci parvient à la terre. C'est le cas par exemple des rayons "X" et des ultra-violets. Le visible, évidemment, ne l'est pratiquement pas sauf dans le rouge où il est possible de souligner une légère absorption. Dans la gamme de l'infrarouge, certaines ondes sont complètement absorbées tandis que d'autres ne le sont pratiquement pas, ce qui implique que les senseurs doivent être conçus de façon à exploiter ces "fenêtres" et non toute la gamme des infrarouges.

En ce qui concerne les micro-ondes, nous constatons qu'elles ne sont pratiquement pas influencées par l'atmosphère lorsqu'elles sont au-delà du centimètre. De plus, ces ondes peuvent pénétrer les nuages, la neige et selon certaines conditions, la pluie (Harper, 1976), ce que les ondes plus courtes (à l'exception des rayons gamma) ne réussissent pas à faire.

TABLEAU 1: SENSEURS LES PLUS COURAMMENT UTILISES AU CANADA ET LEURS CARACTERISTIQUES GENERALES

TYPES DE SENSEURS	TYPE D'INFORMATION CAPTEE	TRAITEMENT DE L'INFORMATION	PLATES-FORMES	ALTITUDE DE PRISE	FREQUENCE DE PRISE
<p>Caméras: - lentille: 88mm 3 pouces 6 pouces</p> <p>Des films noir et blanc couleurs et infrarouges peuvent être utilisés</p>	<p>Energie solaire réflé- chie de la terre: du visible au proche in- frarouge</p>	<p>Données conservées sur pellicules</p>	<p>Avion et ballon</p>	<p>Maximum d'environ 40 000 pieds selon la plate-forme</p>	<p>Telle que désirée</p>
<p>Caméras: - 70mm - multispectrale 70mm - thermovision - télévision</p>	<p>Energie solaire réflé- chie de la terre dans le spectre visible</p>	<p>Données conservées sur pellicules ou sur ban- des magnétiques selon l'appareil</p>	<p>Avion et ballon¹</p>	<p>Maximum d'environ 40 000 pieds selon la plate-forme</p>	<p>Telle que désirée</p>
<p>Radiomètre à balayage</p>	<p>Energie émise de la sur- face terrestre - infrarouge thermique: 2 bandes spectrales sont utilisées soit les bandes 3 à 5μ et 8 à 14μ</p>	<p>Données conservées sur bandes magnétiques</p>	<p>Avion</p>	<p>Maximum d'environ 40 000 pieds selon la plate-forme</p>	<p>Telle que désirée</p>

TABLEAU 1: (SUITE)

TYPES DE SENSEURS	TYPE D'INFORMATION CAPTEE	TRAITEMENT DE L'INFORMATION	PLATES-FORMES	ALTITUDE DE PRISE	FREQUENCE DE PRISE
Radiomètre à profil	Energie émise de la surface terrestre: - infrarouge thermique: 3 bandes spectrales sont utilisées soit les bandes 3,4 à 4,2 μ - 9,5 à 11,5 μ et 8 à 14 μ	Données conservées sur bandes magnétiques	Avion	Maximum d'environ 40 000 pieds selon la plate-forme	Telle que désirée
Spectrophotomètre	Energie solaire réfléchie de la surface terrestre. Cet appareil peut capter dans la bande 0,3 à 0,8 μ	Données conservées sur bandes magnétiques	Avion	Maximum d'environ 40 000 pieds selon la plate-forme	Telle que désirée
Radar latéral aéroporté ²	Etude du retour d'une émission de micro-ondes (senseur actif)	Données conservées sur bandes magnétiques	Avion	Maximum d'environ 40 000 pieds selon la plate-forme	Telle que désirée
Radar à haute résolution ²	Etude du retour d'une émission de micro-ondes (senseur actif) Longueur d'onde utilisée de 2,25cm	Données conservées sur bandes magnétiques	Avion	Maximum d'environ 40 000 pieds selon la plate-forme	Telle que désirée

TABLEAU 1: (SUITE)

TYPES DE SENSEURS	TYPE D'INFORMATION CAPTEE	TRAITEMENT DE L'INFORMATION	PLATE-FORMES	ALTITUDE DE PRISE	FREQUENCE DE PRISE
Scatteromètre à micro-ondes ²	Etude du retour d'une émission de micro-ondes (senseur actif) Longueur d'onde utilisée de 2,25cm	Données conservées sur bandes magnétiques	Avion	Maximum d'environ 40 000 pieds selon la plate-forme	Telle que désirée
Laser fluorosenseur ³	Etude du retour d'une émission d'onde d'une longueur d'onde de 0,337 μ (senseur actif)	Données conservées sur bandes magnétiques	Avion	Maximum d'environ 40 000 pieds selon la plate-forme	Telle que désirée
Laser bathymètre ³	Etude du retour d'une émission d'onde d'une longueur d'onde de 0,54 μ	Données conservées sur bandes magnétiques	Avion	Maximum d'environ 40 000 pieds selon la plate-forme	Telle que désirée
Balayeur à barette	Energie solaire réfléchie de la surface terrestre. La largeur de bande peut être choisie dans la région de 0,3u à 1,1u du spectre électromagnétique.	Données conservées sur bandes magnétiques	Avion	Maximum d'environ 40 000 pieds selon la plate-forme	Telle que désirée

TABEAU 1: (SUITE)

TYPES DE SENSEURS	TYPE D'INFORMATION CAPTEE	TRAITEMENT DE L'INFORMATION	PLATES-FORMES	ALTITUDE DE PRISE	FREQUENCE DE PRISE
1	Actuellement, ce sont surtout les caméras 70 mm qui sont utilisées sur ce genre de plate-forme.				
2	Les appareils utilisant les micro-ondes peuvent donner de bons rendements sous à peu près toutes les conditions atmosphériques vu le fait que les micro-ondes peuvent traverser facilement l'atmosphère et les nuages.				
3	Etant donné que ces appareils n'utilisent pas de micro-onde, ils ne peuvent donner de bons résultats sous toutes les conditions.				

Source: Les renseignements contenus dans ce tableau ont été tirés des ouvrages inscrits dans la bibliographie. A noter que certains appareils à l'étape expérimentale n'ont pas été inclus dans ce tableau.

TABLEAU 2: CARACTERISTIQUES GENERALES DES SENSEURS INSTALLES A BORD DES SATELLITES AMERICAINS DONT LES DONNEES PEUVENT ETRE OBTENUES FACILEMENT AU CANADA

TYPES DE SENSEURS	TYPE D'INFORMATION CAPTEE	TRAITEMENT DE L'INFORMATION	PLATES-FORMES	ALTITUDE DE PRISE	FREQUENCE DE PRISE
Radiomètre à très haute résolution	Energie solaire réfléchie et émise de la terre: - visible - infrarouge thermique	Données transmises au sol sous forme de signaux radioélectriques et stockées sur bandes magnétiques à partir desquelles sont fabriquées les images	Satellite NOAA	1 500 km	2 fois par jour
Senseur à balayage multispectral	Energie solaire réfléchie de la terre dans 4 bandes spectrales: - bande 4: 0,5 à 0,6 μ - bande 5: 0,6 à 0,7 μ - bande 6: 0,7 à 0,8 μ - bande 7: 0,8 à 1,1 μ	Données transmises au sol sous forme de signaux radioélectriques et stockées sur bandes magnétiques à partir desquelles sont fabriquées les images	Satellites Landsat I et II ³	920 km	1 fois tous les 18 jours ¹
Senseur à balayage multispectral	Energie solaire réfléchie et émise de la terre dans 5 bandes spectrales: - bande 4: 0,5 à 0,6 μ - bande 5: 0,6 à 0,7 μ - bande 6: 0,7 à 0,8 μ - bande 7: 0,8 à 1,1 μ - infrarouge thermique: 10,5 à 12,5 μ	Données transmises au sol sous forme de signaux radioélectriques et stockées sur bandes magnétiques à partir desquelles sont fabriquées les images	Satellite Landsat III ³	920 km	1 fois tous les 18 jours ¹

TABLEAU 2: (SUITE)

TYPES DE SENSEURS	TYPE D'INFORMATION CAPTEE	TRAITEMENT DE L'INFORMATION	PLATES-FORMES	ALTITUDE DE PRISE	FREQUENCE DE PRISE
Radiomètre lumière visible et infrarouge	Energie solaire réfléchie et énergie émise de la terre dans 2 bandes: - 0,52 à 0,73 μ - 10,50 à 12,50 μ	Données transmises au sol sous forme de signaux radioélectriques et stockées sur bandes magnétiques à partir desquelles sont fabriquées les images	Satellite Seasat ⁴	800 km approx.	Recouvrement global (95%) en 36 heures ⁵
Radiomètre multicanal à balayage à micro-ondes ⁶	Etude du retour d'émissions de micro-ondes dans 5 bandes: - 6,6GHZ - 10,69GHZ - 18,0GHZ - 22,235GHZ - 37GHZ (Récepteur actif)	Données transmises au sol sous forme de signaux radioélectriques et stockées sur bandes magnétiques à partir desquelles sont fabriquées les images	Satellite Seasat ⁴	800 km approx.	Recouvrement global (95%) en 36 heures ⁵
Radar à ouverture synthétique ⁶	Etude du retour d'une émission de micro-ondes dans 1 bande: 1,35GHZ	Données transmises au sol sous forme de signaux radioélectriques et stockées sur bandes magnétiques à partir desquelles sont fabriquées les images	Satellite Seasat ⁴	800 km approx.	Approx. 4 jours consécutifs tous les 70 jours près des côtes américaines ⁵

TABLEAU 2: (SUITE)

TYPES DE SENSEURS	TYPE D'INFORMATION CAPTEE	TRAITEMENT DE L'INFORMATION	PLATES-FORMES	ALTITUDE DE PRISE	FREQUENCE DE PRISE
Diffusomètre ⁶	Etude du retour d'une émission de micro-ondes dans 2 bandes: - 13,9GHZ - 14,595GHZ	Données transmises au sol sous forme de signaux radioélectriques et stockées sur bandes magnétiques à partir desquelles sont fabriquées les images	Satellite Seasat ⁴	800 km approx.	Recouvrement global (95%) en 36 heures ⁵
Altimètre à diffusion courte ⁶	Etude du retour d'une émission de micro-ondes dans 1 bande: 13,96GHZ	Données transmises au sol sous forme de signaux radioélectriques et stockées sur bandes magnétiques à partir desquelles sont fabriquées les images	Satellite Seasat ⁴	800 km approx.	Approx. 4 jours consécutifs tous les 70 jours près des côtes américaines ⁵⁻⁷
<p>¹ Chaque satellite Landsat devait passer au-dessus du même point à tous les 18 jours. Les satellites Landsat I et II assuraient une couverture à tous les 9 jours. Le satellite Landsat I a cependant cessé de fonctionner le 6 janvier 1978. Le satellite Landsat III assure quand même une couverture à tous les 9 jours avec le satellite Landsat II depuis le 2 avril 1978.</p> <p>² La bande dans l'infrarouge thermique ne fonctionne plus à cause d'un court-circuit.</p>					

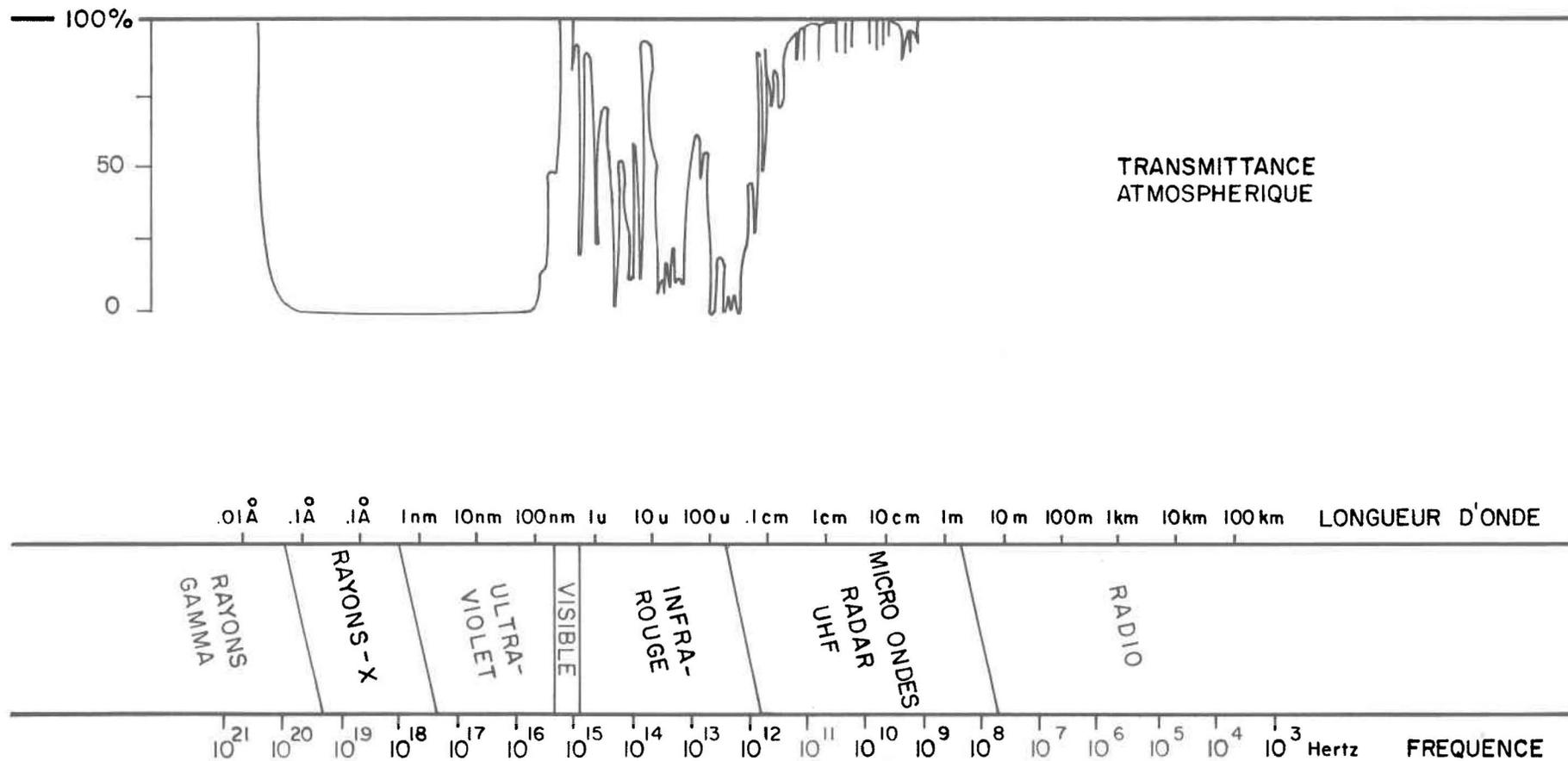
TABLEAU 2: (SUITE)

TYPES DE SENSEURS	TYPE D'INFORMATION CAPTEE	TRAITEMENT DE L'INFORMATION	PLATES-FORMES	ALTITUDE DE PRISE	FREQUENCE DE PRISE
3	Il y a un autre type de senseur sur les satellites Landsat I, II et III, soit le système "Return Beam Vidicon". Toutefois, comme ces produits ne sont pas, ou pratiquement pas accessibles au Canada, nous n'avons pas tenu à l'inclure dans ce tableau.				
4	Ce satellite n'a fonctionné que 4 mois. Il a été mis hors d'usage par un court-circuit dans le système électrique en octobre 1978.				
5	Les orbites de ce satellite ne sont pas fixes. Elles se déplacent légèrement pour permettre au satellite de pouvoir couvrir toute la surface désirée. Toutefois, ce satellite assure une couverture de 95% du territoire en 36 heures. La couverture totale de toutes les orbites se fait en 152 jours au rythme de 14,3 par jour.				
6	Les appareils utilisant les micro-ondes peuvent donner de bons rendements sous à peu près toutes les conditions atmosphériques vu le fait que les micro-ondes peuvent traverser facilement l'atmosphère et les nuages.				
7	Cet appareil peut donner des renseignements sur la topographie. Sur le satellite Seasat, il devait être en mesure de fournir ces renseignements en moins de 6 mois.				

Source: Les renseignements contenus dans ce tableau ont été tirés des ouvrages inscrits dans la bibliographie. A noter que certains appareils à l'étape expérimentale n'ont pas été inclus dans ce tableau.

Figure: 3

SPECTRE ELECTROMAGNETIQUE ET TRANSMITTANCE ATMOSPHERIQUE



Dessiné d'après Rochon, 1975

L'atmosphère absorbe certaines longueurs d'onde alors que d'autres ne sont pas absorbées du tout. Les senseurs doivent donc être conçus en fonction des "fenêtres" disponibles dans la transmittance atmosphérique.

I.2 L'ampleur des phénomènes et l'acquisition de l'information

Comme nous l'avons déjà mentionné, une connaissance de base du phénomène étudié est essentielle à une bonne utilisation de la télédétection. De même, une connaissance technique complémentaire de la télédétection est obligatoire afin de pouvoir en tirer le plus de renseignements possibles.

Cette complémentarité des connaissances nous permet d'établir une méthodologie d'acquisition et de synthèse des données. Celle-ci est basée sur un contrôle des types de données transmises par le senseur et sur un contrôle de la fréquence, de l'échelle et de la résolution des prises de données, ce qui permet d'optimiser le rendement de l'information recueillie. En effet, chaque phénomène est encadré par une dimension donnée, un pas de temps donné et, pour beaucoup de phénomènes naturels, par une fréquence de retour donnée. Ces phénomènes émettent ou causent l'émission d'ondes sur le territoire où ils se produisent, ce qui nous permet de les capter par télédétection. Par exemple, une rivière turbide entrant dans un lac très clair provoque une zone de mélange où les contrastes (dans la région visible du spectre électromagnétique) nous permettent d'étudier des phénomènes comme la dynamique des eaux du lac. Toutefois, les phénomènes ne donnent pas toujours lieu à des contrastes dans la région du visible. Souvent, les meilleurs résultats sont obtenus au moyen d'ondes "non-visibles" comme l'infrarouge thermique. C'est le cas par exemple lors d'études de mélange d'eaux non turbides mais de températures différentes.

Cependant, la longueur d'onde n'est pas le seul problème à résoudre. Le phénomène sous étude se produit à une échelle donnée et les techniques de télédétection employées doivent y être appropriées. Ainsi, lors d'études de petites surfaces, il y a avantage à utiliser un ballon ou un avion à basse altitude plutôt que

d'utiliser des appareils qui se déplacent à haute altitude. Les renseignements en provenance de ces derniers seront plus susceptibles de laisser échapper l'information désirée. Par contre, pour les études de grandes surfaces, il est préférable d'utiliser des appareils opérant à de hautes altitudes (avions et satellites) et couvrant plus de territoire sur un même cliché. Ceci permet de concentrer l'information sur un plus petit nombre de documents tout en augmentant la facilité d'utilisation.

Cette observation introduit le problème de la résolution. Celle-ci se définit comme la plus petite surface au sol pouvant être captée par le senseur. Evidemment, plus celui-ci se trouve à une altitude élevée, plus la résolution a tendance à devenir faible, c'est-à-dire que la plus petite surface au sol pouvant être captée s'agrandit, ce qui occasionne une perte des détails. Toutefois, grâce à leur grande précision, certains senseurs conservent quand même une bonne résolution en dépit de la forte altitude à laquelle ils sont utilisés. Le tableau 3 nous indique, à titre d'exemple, les altitudes de prise, les surfaces couvertes par cliché et la résolution au sol des satellites Landsat, NOAA (satellite météorologique) et Seasat.

TABLEAU 3 : Altitude de prise, surface couverte par cliché et résolution au sol des satellites Landsat, NOAA et Seasat

	ALTITUDE	SURFACE COUVERTE PAR CLICHE	RESOLUTION
NOAA (1)	1 500 km	2 200 km X 2 200 km	0,9 km X 0,9 km
Landsat (2)	900 km	185 km X 178 km	79 m X 57 m
Seasat (radar à ouverture synthétique) (3)	800 km	30 km X 24 km	25 m (4 lectures)

(1) Rebel et Wagner, 1975; (2) Clough et McQuillan, 1973; (3) Centre canadien de télédétection, 1979

Une résolution aussi forte que celle du satellite Seasat peut devenir très importante dans une étude de grande superficie requérant une bonne précision dans les détails en ce sens qu'elle permet de diminuer considérablement les problèmes de manutention des documents tout en conservant l'essentiel, c'est-à-dire la précision des détails.

Un autre facteur important de la méthodologie d'acquisition et de synthèse des données est celui de la fréquence de prise des données. En effet, si l'échelle et le type de données captées semblent à priori satisfaisants pour l'étude d'un phénomène donné, la télédétection ne nous sera pratiquement d'aucun recours si les fréquences de prise ne coïncident pas avec la période pendant laquelle se manifeste le phénomène. Par exemple, l'étude d'un phénomène qui se produit à l'intérieur d'une période de deux ou trois jours risque d'être sérieusement limitée par l'utilisation du satellite Landsat dont la fréquence de prise est d'une fois tous les neuf jours. Le problème se pose pour tous les genres de phénomène et avec tous les genres de techniques de télédétection. Les fréquences de prise de données par télédétection doivent coïncider avec la période de retour du phénomène ou, se produire plusieurs fois pendant sa manifestation sinon plusieurs détails importants peuvent être escamotés entre deux séquences de prise de données.

I.3 L'analyse de l'information

L'étude d'un phénomène particulier par télédétection nous permet de le "voir" d'une façon plus globale que nous le permettent des études sur le terrain, celles-ci étant limitées aux observations recueillies aux sites d'échantillonnage. Dans un tel cas, notre perception visuelle des grands systèmes est un assemblage d'observations individuelles qui, en l'absence de la question de résolution,

est moins complet qu'une vue globale. Toutefois, l'analyse de l'information contenue dans une étude "à vue plus globale" est beaucoup plus efficace lorsqu'il est possible de quantifier certains paramètres du sol et les relier aux données captées par le senseur. Il nous est donc nécessaire de connaître certains points sur le terrain qui, une fois relocalisés sur une image, par exemple, nous permettent d'approfondir ou d'augmenter la validité de notre étude. Les points d'échantillonnage au sol sont donc des mesures de contrôle qui, une fois reliées à la réflectante, nous permettent de quantifier la distribution spatiale de certains paramètres par une extrapolation des valeurs ponctuelles sur toute l'image obtenue.

Plusieurs genres d'études sont possibles à partir des diverses techniques de télédétection. Certaines données sont conservées sur rubans magnétiques après avoir été transmises à la terre tandis que d'autres types sont conservés sur des pellicules. Dans le premier cas, en plus de permettre la production d'images, les données conservées sur rubans magnétiques permettent une analyse directe par ordinateur. Ceci est un grand avantage sur les données conservées sur des pellicules en ce sens que les rubans magnétiques contiennent beaucoup plus d'informations, ce qui améliore la précision des résultats. Ainsi, les cartes produites à partir des valeurs de radiance (quantification de la réflectance captée par le senseur) contenues sur les rubans magnétiques peuvent être beaucoup plus précises que celles produites à l'aide d'instruments qui transforment les tons des images imprimées en valeurs numériques (ex: l'équidensitomètre) parce que ces dernières sont créées à partir d'images où l'information est déjà diminuée. De plus, les rubans magnétiques facilitent les études statistiques.

1.4 Schéma synthèse

L'étude de la définition du mot "télédétection" nous a permis d'en tirer les concepts et les divers principes de fonctionnement. A partir de ceux-ci, nous avons construit un schéma général représentant les différentes étapes et les processus nécessaires à une étude de phénomènes par télédétection. Ce schéma est représenté à la figure 4.

1.5 La télédétection et les masses d'eau

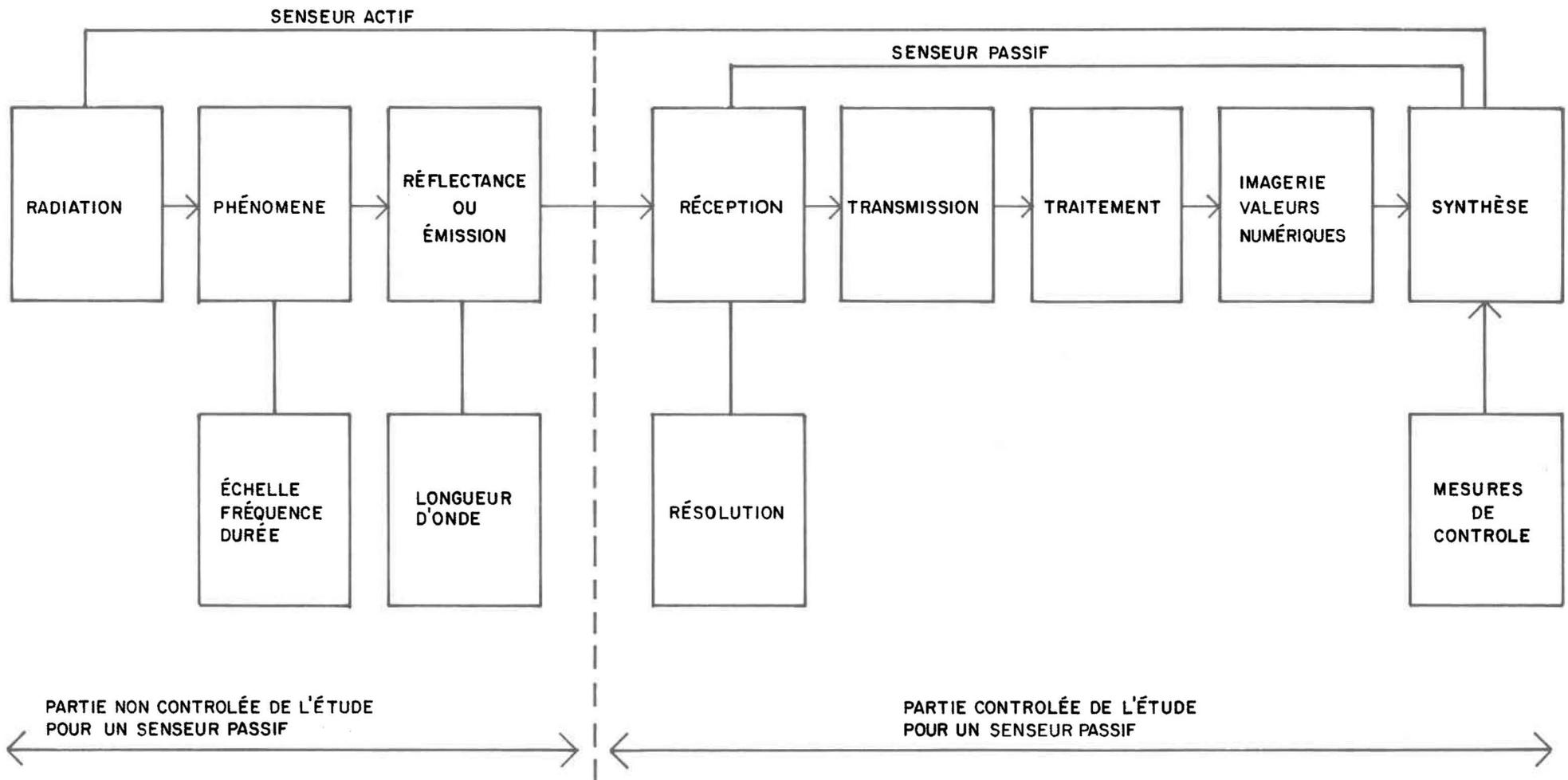
La différence fondamentale entre l'étude des masses d'eau et l'étude des surfaces terrestres réside évidemment dans la nature du substrat lui-même. Dans un cas, il est opaque; dans l'autre, il est généralement transparent sur une certaine profondeur et les rayons solaires n'y sont pas réfléchis de la même façon.

Ceci nous place face à un problème particulier. En effet, la télédétection, telle que nous l'entendons aujourd'hui, est une science très jeune et, même si elle a fait un bond prodigieux depuis une décennie, la majorité des senseurs mis au point sont plutôt axés vers les études de surfaces terrestres.

Quelques-uns cependant sont bien adaptés aux études de surfaces aquatiques et semblent donner de bons résultats. Ces senseurs peuvent facilement être utilisés sur des avions mais le problème se complique au niveau des satellites. Ceux-ci ont toujours été tournés vers l'étude des surfaces terrestres ou vers les phénomènes météorologiques. Les satellites Landsat par exemple ne possèdent pas de senseur d'infrarouge thermique, type d'onde très important pour les études dans le domaine de l'eau. Par contre, certains satellites météorologiques, tel NOAA (tableau 1) possèdent ce type de senseurs. Toutefois, ceux-ci ont une faible résolution au sol de sorte que l'étude des lacs au moyen de ces appareils devient prati-

FIGURE 4

Étapes et processus nécessaires à une étude par télédétection



Il est important de remarquer sur ce schéma que notre contrôle s'exerce au niveau de l'acquisition, du traitement et de la synthèse seulement lors de l'utilisation de senseurs passifs tandis qu'il s'exerce sur tout le processus lors de l'utilisation de senseurs actifs.

quement impossible.

Cependant, pour la première fois, les Etats-Unis ont lancé en 1978 un satellite voué principalement aux études des ressources aquatiques, le Seasat, à bord duquel se trouvent les appareils jugés les plus appropriés à l'étude du domaine de l'eau, tel le radar à ouverture synthétique et le radiomètre lumière visible et infrarouge thermique.*

Il ne faut tout de même pas oublier qu'il est possible d'utiliser les données des satellites, tels Landsat ou NOAA, dans l'étude des surfaces aquatiques. Toutefois, à cause du caractère bien spécial de la matière étudiée, nous sommes relativement limités dans l'interprétation de certains phénomènes.

En effet, lorsque l'on étudie une masse d'eau par télédétection, on doit faire face à certaines caractéristiques typiques à l'eau par rapport à celles de la terre. Les rayons solaires qui frappent une masse d'eau ne se comportent pas du tout de la même

* Il est important de noter que le Seasat est maintenant hors d'usage à cause d'un problème électrique. Cependant, bien qu'il n'ait fonctionné que 99 jours, ce satellite a pris des informations en 14 occasions au-dessus du Québec, ce qui pourrait s'avérer très utile au niveau de certaines études.

De même, quelques mois avant le lancement du Seasat, les Etats-Unis avaient lancé un autre satellite, le Landsat 3, à bord duquel on retrouvait un senseur de bande thermique. Malheureusement, cette bande n'a jamais très bien fonctionné et n'est plus en opération (Service de la Cartographie, ministère des Terres et Forêts du Québec, 1978).

façon que les rayons frappant la terre ferme (voir figure 5).

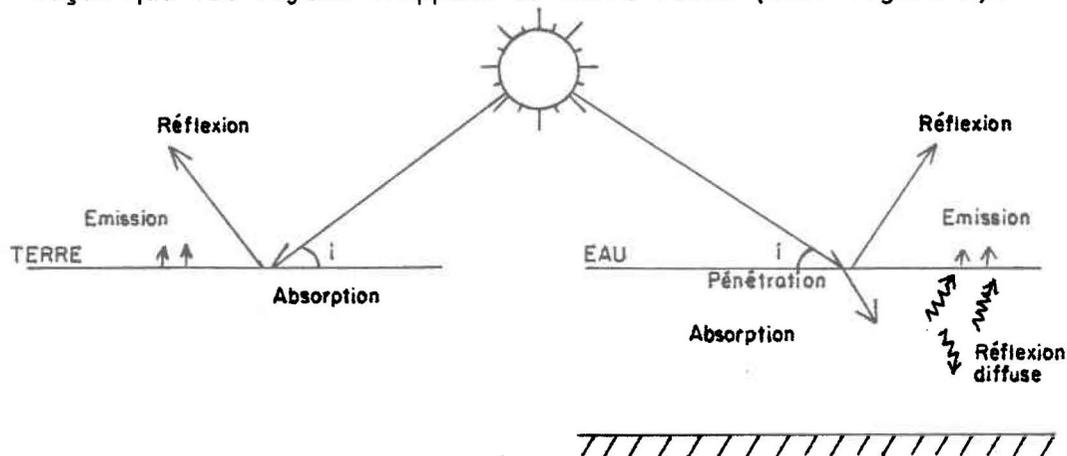


Figure: 5
DIFFERENCES DE REACTIONS DES RAYONS SOLAIRES
DEPENDAMMENT DU MILIEU RENCONTRE

Dans le cas de rayons frappant la terre, un certain nombre d'entre eux sont absorbés et les autres sont réfléchis, dépendant de la surface terrestre elle-même et de l'angle d'incidence (i). En ce qui concerne l'absorption, celle-ci se fait généralement sur une couche très faible pour la partie visible du spectre, tandis que pour l'infrarouge par exemple, elle se fait sur une couche un peu plus épaisse. Une certaine partie de l'énergie acquise par absorption est ensuite réémise sous forme de chaleur (rayons infrarouges).

Dans le cas de rayons frappant une masse d'eau, nous observons à peu près les mêmes phénomènes; toutefois, ils se passent d'une façon très différente. En effet, l'eau (milieu liquide) laisse pénétrer les rayons solaires beaucoup plus profondément que la terre (milieu solide), ce qui implique par le fait même que l'absorption se fait sur une couche beaucoup plus épaisse. Celle-ci n'est cependant pas toujours de la même épaisseur et dépend de la composition chimique de l'eau (solides dissous et/ou solides en suspension dans l'eau).

En ce qui concerne la réflexion, celle-ci dépend de l'angle d'incidence (i) et, tout comme pour l'absorption, de la composition chimique de l'eau. Cette dernière (composition chimique) est de fait très importante et mérite une attention particulière. Prenons d'abord le cas des solides dissous. On peut voir au tableau 4 qu'une eau contenant très peu de solides dissous, donc peu colorée, telle l'eau distillée, n'absorbe pratiquement pas les ondes caractéristiques des couleurs bleu et vert comparativement aux ondes caractéristiques des couleurs jaune, brun et rouge. Par contre, une eau contenant beaucoup de solides dissous, donc très colorée, telle l'eau du lac Helmet (tableau 4), absorbe complètement les ondes caractéristiques des couleurs bleu et vert et ce sont plutôt les ondes caractéristiques des couleurs brun et brun foncé qui sont le moins absorbées. On peut donc s'attendre à ce qu'une eau contenant peu ou aucun solide dissous nous apparaisse bleue ou bleu-verte et qu'une eau contenant des solides dissous nous apparaisse de couleur jaune, brun ou même brun foncé, dépendamment de la concentration de solides dissous rencontrée.*

Dans un même ordre d'idée, on remarque à partir de la figure 6 (tirée du tableau 4) que l'absorption dans une eau fortement colorée est toujours plus élevée (en pourcentage) que dans une eau non-colorée et ce, pour toutes les longueurs d'onde** Cela

* Il est important de noter ici que ces tests (tableau 4) ont été réalisés avec des solides dissous de type organique. Il est probable que les résultats seraient différents si les solides dissous avaient été d'un autre type.

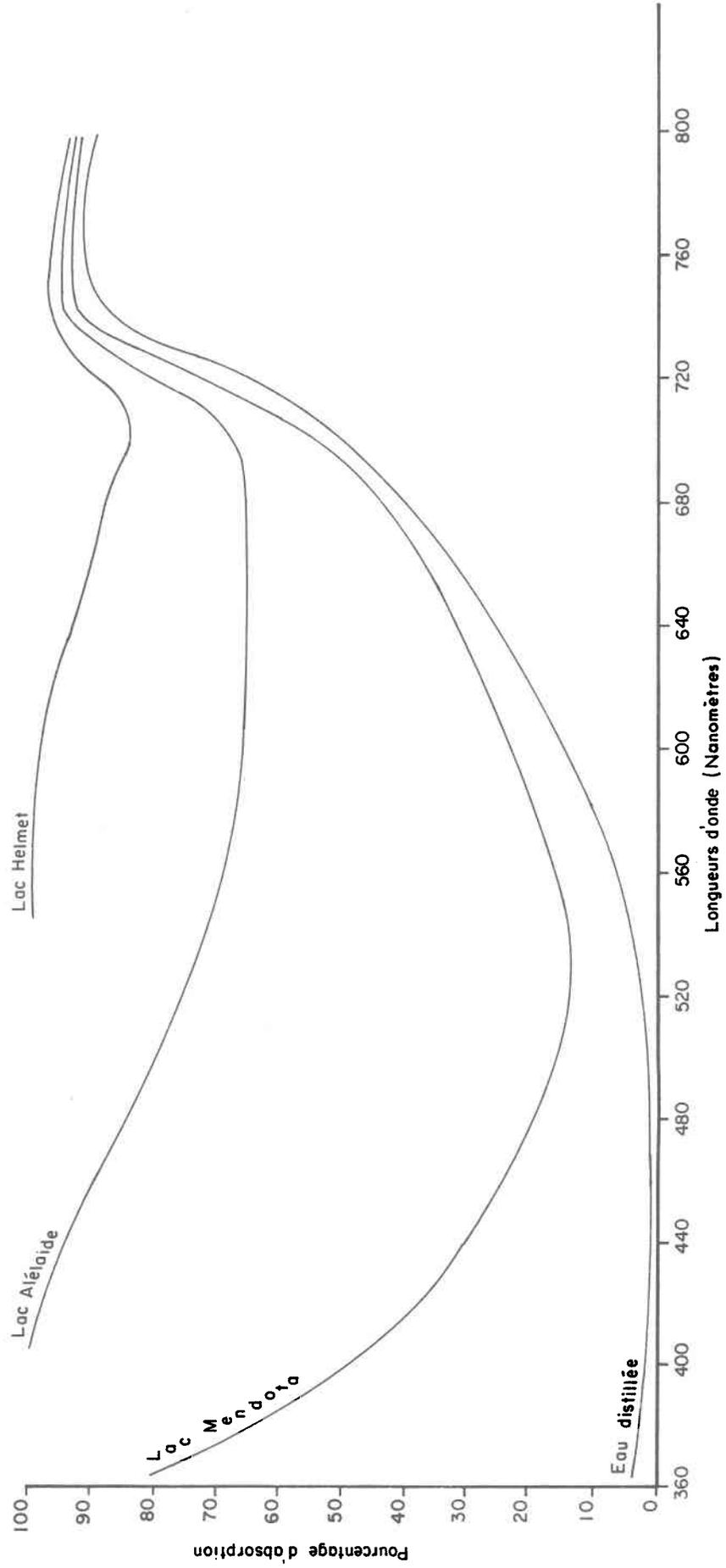
** L'absorption au lac Crystal est légèrement différente cependant puisque, pour une couleur plus faible que le lac Mendota, l'absorption y est plus forte pour les longueurs d'onde de 500 à 700 microns environ. La différence est généralement faible cependant.

TABLEAU 4: POURCENTAGE D'ABSORPTION DE DIVERSES LONGUEURS
D'ONDE A TRAVERS UN METRE D'EAU LACUSTRE DE QUEL-
QUES LACS DU WISCONSIN AYANT DES CONCENTRATIONS
DE MATIERES ORGANIQUES (COULEURS) DIFFERENTES

Longueur d'onde (nm)	Eau distillée	Lac Crystal	Lac Mendota	Lac Alelaide	Lac Mary	Lac Helmet
800	88,9	89,9	90,5	92,4	91,7	93,2
780	90,2	91,3	91,9	93,5	93,0	94,5
760	91,4	93,5	92,6	94,5	94,8	96,0
740	88,5	89,3	91,5	92,7	93,0	96,2
720	64,5	67,6	71,0	78,0	78,0	86,9
700	45,0	50,4	49,7	66,3	70,7	82,5
685	38,0	45,2	42,2	65,7	71,7	86,6
668	33,0	40,3	36,8	65,0	72,3	88,0
648	28,0	37,0	31,9	64,5	75,2	91,2
630	25,0	34,4	28,9	65,8	77,8	94,0
612,5	22,4	32,1	26,3	66,8	80,3	96,0
597	17,8	27,5	22,5	67,0	83,2	97,6
584	9,8	22,0	17,6	67,1	85,7	98,2
568,5	6,0	19,3	14,0	67,6	88,5	98,6
546	4,0	19,2	13,5	70,9	91,6	99,3
525	3,0	19,8	14,1	74,5	94,8	----
504	1,1	20,7	15,2	81,0	97,4	----
473	1,5	21,7	21,7	88,6	99,4	----
448	1,7	23,8	27,8	92,2	----	----
435,9	1,7	24,4	31,0	95,2	----	----
407,8	2,1	28,1	44,3	99,0	----	----
365	3,6	40,0	80,0	----	----	----
Echelle de cou- leur (unités Pt)	0	0	6	28	101	264

Tiré de: Wetzel, 1975

FIGURE 6
INFLUENCE DES SOLIDES DISSOUS SUR L'ABSORPTION DE DIFFÉRENTES LONGUEURS D'ONDE
À TRAVERS UNE COLONNE D'EAU D'UN MÈTRE DE QUELQUES LACS DU WISCONSIN *



* D'après les données du tableau 4
Le pourcentage minimum d'absorption se déplace dépendamment de la couleur de l'eau. Ainsi, pour de l'eau non colorée, il est aux environs de 450 nm alors qu'il est à peu près à 700 nm pour de l'eau très colorée (Lac Helmet)

signifie que les rayons réfléchis d'une masse d'eau non-colorée proviennent d'une plus grande profondeur que ceux provenant d'une masse d'eau colorée puisque cette dernière les absorbe beaucoup plus et ce, dès les premières couches. Cette notion très importante nous sera très utile lors d'études de phénomènes limnologiques par télédétection.

Tout comme les solides dissous, les solides en suspension peuvent aussi changer l'absorption et la réflexion d'une masse d'eau. En effet, ces particules de différentes grosseurs absorbent et réfléchissent d'une manière diffuse (scattering) des rayons solaires qui sont généralement différents de ceux absorbés et réfléchis par l'eau.* Ainsi, plus leur concentration est forte, plus la couleur de l'eau se rapproche de celle réfléchie par ces particules.

Si on revient à la figure 5, on remarque aussi, tout comme sur la terre, qu'une partie de l'énergie solaire captée par la masse d'eau est réémise sous forme de chaleur (rayons infrarouges).

Il ne faut pas croire cependant que l'application de la télédétection aux études des masses d'eau soit rendue impossible par les particularités mentionnées auparavant (il s'agit plutôt d'en être conscients). Au contraire, cette technique est utilisée pour plusieurs genres d'études dans le domaine de l'eau.

A la lumière de ces travaux, nous tenterons de voir, dans les prochains chapitres, comment la télédétection peut être utilisée pour l'étude des phénomènes limnologiques en général et, d'une façon plus spécifique, pour l'étude de ces mêmes phénomènes dans le contexte québécois.

* Tout comme pour les solides dissous, la nature des solides en suspension influence probablement le type d'onde absorbé et réfléchi.

CHAPITRE II

LA TELEDETECTION ET LES PHENOMENES LIMNOLOGIQUES

II.1 La limnologie

La limnologie est l'étude de la productivité des communautés biotiques et des relations fonctionnelles qui s'exercent entre elles, le tout étant influencé par les paramètres physiques, chimiques et biotiques (Wetzel, 1975).

Pour compléter cette définition, on pourrait ajouter que ces communautés et que ces relations évoluent en milieu aqueux, la limnologie se rapportant habituellement aux lacs ou aux eaux intérieures.

Comme on peut le constater, les phénomènes limnologiques sont très importants puisqu'ils sont responsables du maintien de la vie et de l'évolution d'un lac. La connaissance de ces derniers semble donc essentielle à l'étude de l'état d'un lac ou de l'une de ses composantes.

Toutefois, l'ampleur de certains phénomènes, comme ceux par exemple qui se manifestent sur toute la surface d'un lac, pose certains problèmes surtout si le phénomène étudié se produit sur un lac de grande superficie. C'est à ce niveau que la télédétection devient un outil de travail intéressant puisqu'elle nous permet d'obtenir une perception qui n'était pas possible auparavant.

Toutefois, celle-ci ne peut être employée pour toutes les études limnologiques, la nature des phénomènes et les limites actuelles de la technique ne le permettant tout simplement pas.

La télédétection ayant été étudiée au chapitre précédent, attardons-nous maintenant aux phénomènes limnologiques. Ces derniers se divisent grosso modo en trois groupes différents, soit les phénomènes physiques, chimiques et biologiques. Les phénomènes biologiques se rapportent aux différents échanges de matière, vivante ou non, entre les divers maillons de la chaîne alimentaire. De leur côté, les phénomènes physiques englobent tous les mouvements giratoires. De par leur nature, ils influencent souvent les phénomènes chimiques et biologiques et sont souvent responsables directement de l'état du lac lui-même et de ses différentes composantes telles l'eau, la flore et la faune.

Au niveau de la télédétection, les phénomènes chimiques et biologiques semblent très difficiles à étudier. Ceux-ci sont souvent dépendants des phénomènes physiques comme nous l'avons mentionné et sont, par conséquent, fréquemment dissimulés par ces derniers, ce qui, en plus du fait qu'ils se produisent généralement à petite échelle, les rend imperceptibles aux appareils utilisés en télédétection. Par contre, les phénomènes physiques se font remarquer généralement à plus grande échelle et nous semblent, par le fait même, se rapprocher beaucoup plus du champ d'étude de la télédétection. En effet, ces phénomènes se répercutent habituellement jusqu'en surface et ce, sur toute la superficie des lacs (ou du moins sur une bonne partie). Nous axerons donc notre étude dans cette direction.

Toutefois, les phénomènes chimiques et biologiques ne seront pas délaissés pour autant. Ceux-ci nous seront très utiles comme information supplémentaire dans la compréhension de phénomènes complexes où plusieurs facteurs entrent en jeu.

II.2 Manifestation électromagnétique des phénomènes

Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, la télédétection fonctionne par l'entremise d'ondes électromagnétiques, ces dernières étant la manifestation du phénomène qui se produit.

En ce qui concerne les phénomènes limno-physiques, ils se manifestent de plusieurs façons. En effet, ceux-ci sont intimement reliés à la qualité du milieu et manifestent leur présence via plusieurs paramètres, soit chimiques, soit biologiques comme la couleur, la turbidité et la chlorophylle. Ils peuvent aussi se manifester via d'autres paramètres qui sont plutôt physiques, telles la température, la superficie et la glace.

A tous ces paramètres correspondent une émission ou une réflexion d'ondes, lesquelles peuvent être captées par différents senseurs utilisés en télédétection. Ainsi, la température peut être mesurée facilement et de façon très précise par infrarouge thermique, c'est-à-dire dans les longueurs d'onde de 3 à 14 μ environ (Harper, 1976; Bennett et Sydor, 1974). La superficie d'une nappe d'eau peut être facilement délimitée par l'utilisation d'ondes appropriées notamment le proche infrarouge (0,8 à 2 μ environ) et l'infrarouge thermique étant donné la grande différence de radiation thermique entre l'eau et la terre.

La turbidité (solides en suspension) et la chlorophylle, lorsqu'elles sont en concentration assez forte, peuvent être généralement évaluées avec une bonne précision au moyen d'ondes de 0,5 à 0,7 μ pour la turbidité et de 0,7 à 0,8 μ pour la chlorophylle, cette dernière réfléchissant le proche infrarouge (Rochon, 1975). Notons qu'elle réfléchit aussi les ondes dans la région verte du spectre visible mais, comme dans cette gamme de longueurs d'onde elle risque d'être confondue avec les solides en suspension, il est préférable de la déterminer en utilisant les longueurs d'onde du proche infrarouge.

La couleur de l'eau (solides dissous) semble par contre un paramètre plus délicat à utiliser. Cette difficulté provient du fait que souvent, la différence remarquée par exemple entre deux masses d'eau est causée par une différence de turbidité, c'est-à-dire de solides en suspension. La couleur (solides dissous) est alors reléguée au second plan. Toutefois, dans les eaux où les solides en suspension sont en faible concentration, il semble que, sous certaines conditions, la couleur peut devenir un paramètre important (Bennett et Sydor, 1974). Les longueurs d'onde à utiliser varient selon la couleur de l'eau, c'est-à-dire selon la concentration de solides dissous dans l'eau. Ainsi, pour une eau brun foncé, les meilleurs résultats semblent être atteints avec les longueurs d'onde de 0,7 à 0,8 μ , alors que pour une eau plus claire, les longueurs d'onde de 0,5 à 0,7 μ semblent plus efficaces (Bennett et Sydor, 1974).

Quant à la glace, elle peut être détectée très facilement avec l'utilisation d'ondes du spectre visible à cause de son aspect très visuel. L'infrarouge thermique peut aussi être utilisé. Il présente l'avantage de signaler précisément les zones de gel et de dégel. En ce qui concerne les études plus poussées, comme le type ou l'épaisseur de la glace, les micro-ondes doivent être utilisées. Les longueurs d'onde les plus fréquemment employées se situent entre 2 et 25 cm.

A l'aide de ces paramètres, nous tenterons donc d'étudier les phénomènes limno-physiques par télédétection.

II.3 Les phénomènes limno-physiques: description et représentation

La majeure partie des phénomènes physiques à l'intérieur d'un lac sont reliés à deux grandes classes de processus, soit le

bilan thermique et la dynamique des eaux. De l'interaction des apports solaires, éoliens et hydrologiques va résulter toute une gamme de phénomènes physiques influençant le comportement entier d'un lac, tant au point de vue biologique qu'au point de vue chimique.

II.3.1 Le bilan thermique

Le principal élément relié au bilan thermique est sans contredit le soleil. Selon Wetzel (1975), la radiation solaire constitue la plus grande source de chaleur des lacs et elle est en majeure partie absorbée directement par l'eau.

L'atmosphère et les sédiments sont aussi, sous certaines conditions, des sources de chaleur importantes. En effet, dans le premier cas, le vent peut être un facteur important en permettant à l'atmosphère d'être en contact plus direct avec l'eau. Dans le cas des sédiments, lorsque la profondeur est faible, ceux-ci reçoivent quasi directement les rayons solaires. Il peut donc y avoir réchauffement des sédiments et par conduction, réchauffement de l'eau.

De même, dans certains cas, les apports venants du bassin versant peuvent jouer un grand rôle au niveau de la température. Par exemple, un lac recevant un grand débit et où le temps de séjour est faible, sera plus influencé au niveau de la température par ce débit que par la radiation solaire. Nous pouvons citer ici le lac des Deux Montagnes. Son débit provient à 90% de la rivière des Outaouais et le temps de séjour moyen y est de 3,5 jours*. La température du lac, dans la partie centrale, est par conséquent pratiquement la même que celle de la rivière.

* Source: Régie des Eaux du Québec et Commission des ressources en eau de l'Ontario, 1971.

Pour ce qui est des pertes de chaleur, elles sont en principe dues, selon Wetzel (1975), à la radiation thermique des lacs. De même, des quantités importantes de chaleur sont perdues par évaporation, par conduction à l'air et dans une plus faible proportion, aux sédiments.

Il est intéressant de noter ici que la majorité des gains ou des pertes de chaleur se fait à la surface. En effet, comme nous l'avons vu au début, les rayons infrarouges pénètrent très peu dans l'eau, ce qui implique que ce sont principalement les premières couches d'eau qui se réchauffent. De même, ce sont surtout celles-là qui perdent leur énergie. Ce phénomène nous conduit par ricochet à l'étude de la distribution de la chaleur en milieu lacustre.

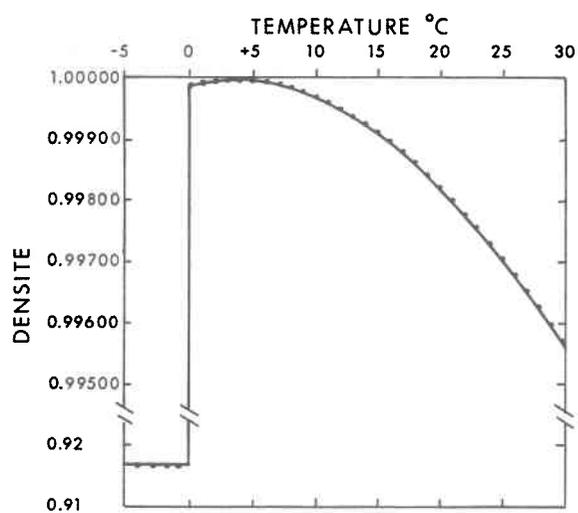
II.3.1.1 Les courants de convection

L'eau est un liquide dont la densité varie avec la température de sorte qu'un réchauffement ou un refroidissement peut causer une stratification de l'eau en différentes couches et par subséquent, des courants de convection dont l'envergure dépend du gradient thermique entre les diverses couches.

La figure 7 représente la courbe de densité de l'eau en fonction des changements de température.

Comme on peut le constater, le maximum de densité se situe à 4°C et, plus l'eau se réchauffe, plus elle devient légère. Ceci implique que, dans un lac, il est caractéristique en été de retrouver de l'eau plus légère (plus chaude) à la surface qu'en profondeur, causant une stratification thermique.

FIGURE 7 DENSITE DE L'EAU DISTILLEE PAR RAPPORT A LA TEMPERATURE



DESSINE D'APRES WETZEL, 1975

A remarquer que la densité maximale se situe à 4⁰c et qu'entre 4 et 0⁰c, la densité diminue.

La figure 8 nous montre l'évolution globale de cette stratification thermique à partir du printemps (ou plutôt du moment où l'on a une homogénéisation complète) jusqu'à la fin de l'été.

On remarque que la chaleur se distribue graduellement vers le fond à mesure que l'été avance. Ce phénomène est dû à l'apport de chaleur des rayons solaires, au brassage causé par le vent et, d'une façon moins importante, à la conduction.

A la figure 9 est représenté (par étapes) un cycle complet (annuel) des changements théoriques de température qui se produisent dans les lacs de nos régions. Nous nous servons de cette figure dans l'explication de chacune de ces étapes.

En premier lieu, situons-nous au printemps avec un lac homogène à 4° c (voir figure 9A). Par une journée ensoleillée, une couche de surface (épilimnion) devient plus chaude, donc moins dense et on assiste à une stratification de surface (voir figure 9B).

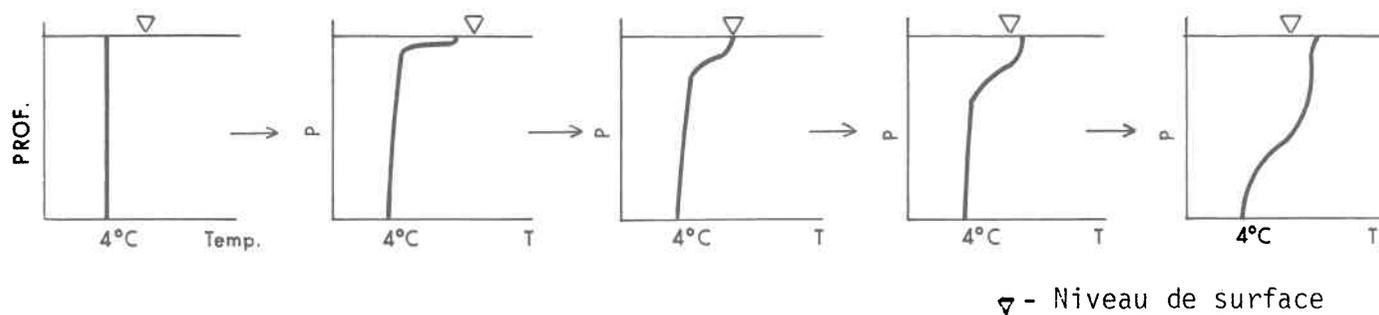
Pendant ce temps, l'action du vent vient assurer un brassage qui rompt l'équilibre densimétrique et permet l'advection de chaleur vers les couches sous-jacentes, ce qui résulte en un épaissement de la couche plus chaude de surface (voir figure 9C).

Le phénomène se continue de jour en jour établissant du même coup une forte stratification dans le lac. A la fin de l'été, deux couches d'eau de température différente se superposent de chaque côté de la thermocline (gradient maximum de température) (voir figure 9D).

En automne, les températures deviennent plus froides et la couche de surface perd de la chaleur, la température de l'eau de surface étant plus chaude que l'air ambiant. Ainsi, l'eau immédiatement à la surface verra sa densité augmenter si bien qu'elle aura tendance à descendre. Le vent contribuera également, par le brassage qu'il produit, à assurer un mélange des eaux de surface de sorte que, petit à

FIGURE 8

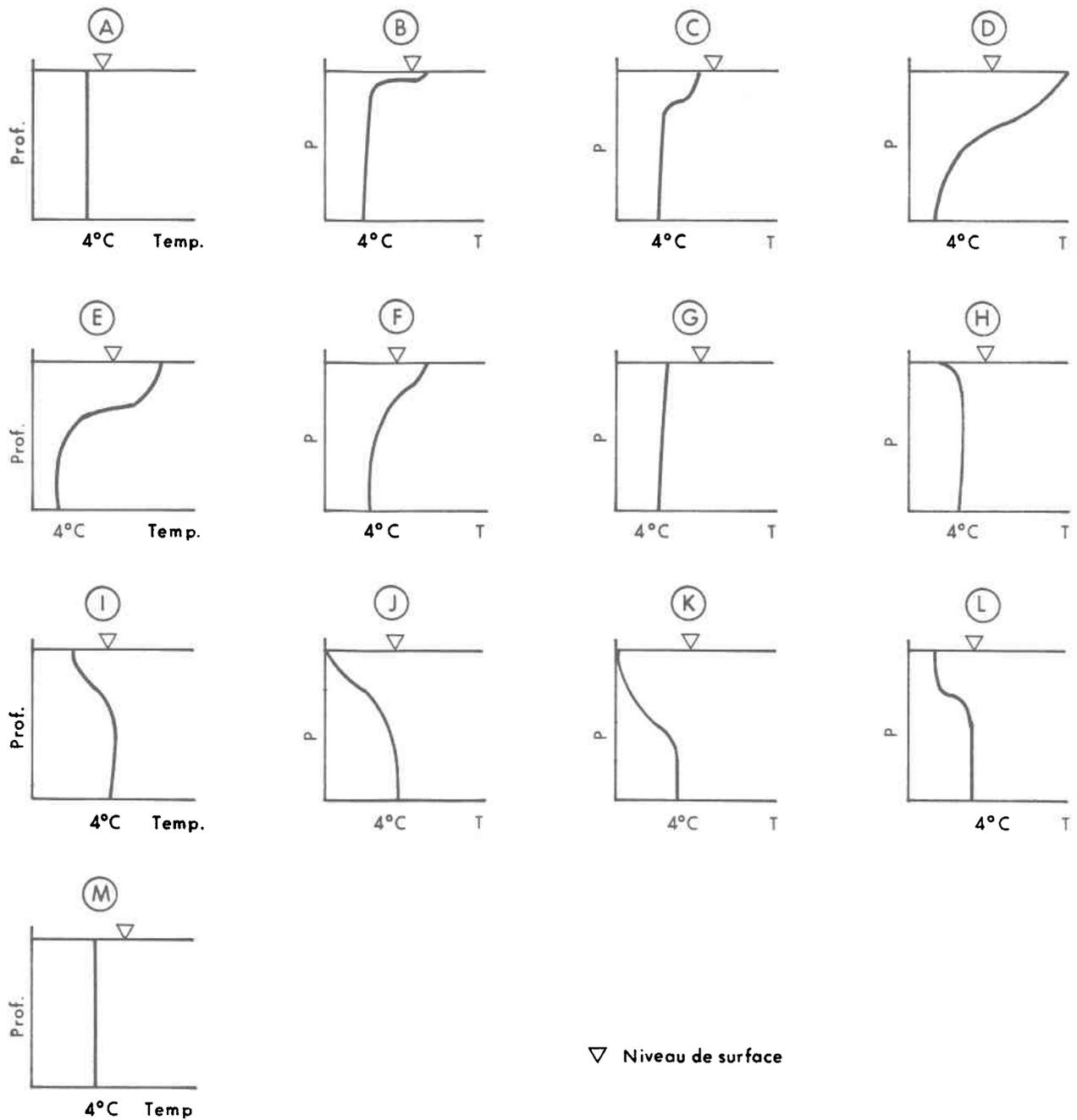
ÉVOLUTION THÉORIQUE DE LA STRATIFICATION THERMIQUE AU COURS DE L'ÉTÉ,



Courbe théorique de l'évolution à partir du retournement des eaux du printemps. Il est sous-entendu que la température ne monte pas au-dessus de 4°C en profondeur, ce qui n'est pas toujours le cas dépendamment du lac étudié.

Figure: 9

CYCLE ANNUEL DE LA STRATIFICATION THERMIQUE DANS UN LAC



Il est sous-entendu que l'eau en profondeur reste toujours à 4°C que ce soit en été ou en hiver. Il arrive, dépendamment des lacs étudiés (profondeur, quantité d'eau, localisation géographique, etc) que l'eau par exemple se maintienne à moins de 4°C en hiver. Il s'agit ici de courbes théoriques.

petit, la température de l'épilimnion descendra jusqu'à l'isothermie, soit en général à 4° c, température à laquelle la densité de l'eau est la plus forte (voir figures 9E, 9F et 9G).

Au début de l'hiver, l'eau en surface devient plus froide. Etant donné qu'elle est moins dense entre 0 et 4° c qu'à 4° c (voir figure 7), il y a à ce moment une stratification inverse (voir figure 9H).

A mesure que l'hiver avance, l'eau de surface continue de se refroidir et sous l'action du vent (brassage), la couche plus froide en surface continue de s'épaissir (voir figure 9I).

Lorsque l'eau de surface atteint 0° c, la glace se forme. A ce moment, la couche plus froide de surface s'épaissit au fur et à mesure que le lac perd la réserve de chaleur qu'il a en profondeur. Cela se produit par le phénomène de conduction et par le brassage que peuvent occasionner les courants sous la glace (voir figures 9J et 9K).

A la fin de l'hiver, la température commence à se réchauffer. La glace fond et l'eau immédiatement à la surface devient plus chaude que l'eau en profondeur. Du même coup, sa densité augmente et elle a tendance à descendre, toujours également sous l'action du vent qui assure un brassage. Il en résulte un réchauffement de la couche froide de surface et ce, jusqu'à l'isothermie et le cycle recommence (voir figures 9L et 9M).

Il va sans dire que ces phénomènes sont très importants dans les lacs pour la répartition des solides en suspension, chlorophylle, oxygène dissous, etc. car, lorsqu'il y a une bonne stratification, les mélanges entre les couches se font d'une façon beaucoup plus réduite.

Il est important de noter que jusqu'à maintenant, seulement les phénomènes provoqués par la température ont été considérés. Nous verrons maintenant comment les eaux d'un lac sont brassées mécaniquement sous les effets des grands mouvements de l'eau causés principalement par le vent.

II.3.2 La dynamique des eaux*

Dans les lacs, les phénomènes dynamiques sont relativement nombreux et fréquents. Qui n'a jamais remarqué l'effet du vent sur la surface d'un lac (vagues, stries blanches d'écume, etc.)? Ce phénomène est le plus connu parce qu'il est le plus visible. Toutefois, plusieurs autres phénomènes, tous aussi importants pour l'étude de la dynamique des eaux d'un lac, se manifestent mais d'une façon moins visuelle.

II.3.2.1 Les vagues de surface

Lorsque le vent souffle sur un lac, il exerce un mouvement de friction qui met la surface de l'eau en mouvement (force

* A part la glace que nous verrons plus loin, les phénomènes que nous avons étudiés auparavant, tels les changements de température en profondeur, ne se manifestent pas en surface. Il nous est, par conséquent, très difficile de les étudier par télédétection; nous pourrions, tout au plus, connaître la température à la surface du lac. Toutefois, ces informations nous étaient nécessaires pour mieux comprendre les phénomènes physiques reliés à la dynamique des eaux. Nos études d'application de la télédétection aux phénomènes limnologiques commencent donc véritablement avec cette section.

d'impulsion du vent). Il en résulte des oscillations de la surface de l'eau, c'est-à-dire les vagues de surface (Wetzel, 1975). Ces vagues sont très importantes pour l'oxygénation du lac, de même que pour le mélange thermique et chimique superficiel. Elles sont de deux types, soit:

- les vagues courtes où la longueur d'une vague est inférieure à la profondeur de l'eau. Dans ce cas, l'effet horizontal est assez négligeable et l'effet vertical décroît rapidement selon la hauteur de la vague. On peut considérer que ces vagues sont au large;
- les vagues longues où la longueur de la vague est supérieure à la profondeur de l'eau. Ce type de vague se produit sur le rivage en eau peu profonde. Ici, l'effet est beaucoup plus grand car ces vagues viennent déferler sur le rivage en empêchant du même coup la sédimentation ou remettant en suspension les sédiments déjà déposés sur la partie déjà submergée de la plage.

Du point de vue de la télédétection, nous ne nous sommes pas attardés à ce type de vague (vagues de surface) car elles sont très facilement observables du rivage lorsque le vent souffle. De même, en survolant les rives des lacs à basse altitude, il est très facile d'identifier les zones d'érosion ou de remise en suspension des sédiments.

II.3.2.2 Le déplacement de l'eau sous l'influence du vent

Lorsque le vent souffle sur un lac, cela occasionne un déplacement de l'eau de surface dans le sens du vent. Il en résulte donc une augmentation d'eau à un bout du lac et une diminution à l'autre. Ce phénomène est représenté à la figure 10.

On remarque également sur cette figure que ce déplacement d'eau en surface entraîne une circulation de l'eau en profondeur dans le sens contraire du déplacement de surface, le liquide cherchant à rétablir l'équilibre. Il en résulte que l'eau en profondeur monte à la surface. Si le lac est stratifié, le même phénomène se produit. Toutefois, comme les couches de fond sont souvent légèrement plus froides que les couches de surface, la stratification verticale s'accompagne dès lors d'une stratification horizontale. La distribution de l'eau dans le lac suit la direction du vent, c'est-à-dire de la plus froide vers la plus chaude (voir figure 11).

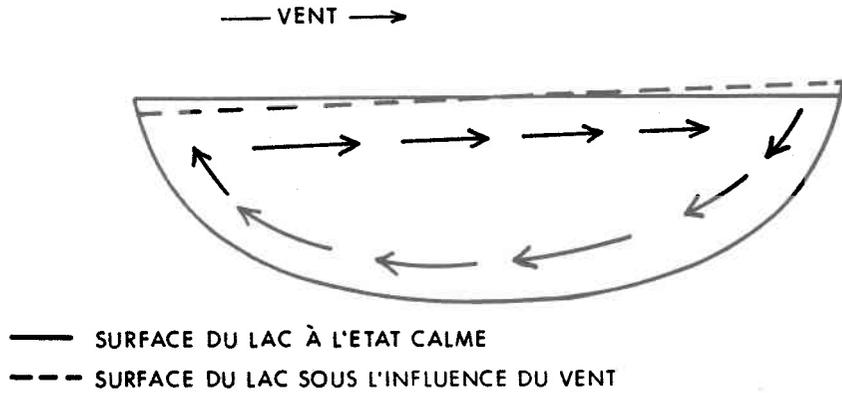
Ce phénomène est très important en limnologie car il en résulte un brassage en profondeur des eaux alors que, dans le cas des vagues de surface, seules les rives et la couche superficielle en subissent les effets.

Il faut noter ici qu'en plus du fait que les eaux du fond sont remontées à la surface, un mélange des couches d'eau entre elles peut se produire. En effet, lorsqu'une masse d'eau glisse sur une surface, il y a émission d'ondes, celles-ci étant provoquées par la friction associée au déplacement. Lorsque l'amplitude de ces ondes devient telle que les sommets se brisent, il y a apparition de turbulence.

Ainsi, dans un lac stratifié, lorsque deux couches d'eau glissent l'une sur l'autre, il y a émission d'ondes, lesquelles sont appelées vagues internes. Il peut donc arriver, si les vitesses sont assez grandes, que de la turbulence apparaisse et qu'il y ait mélange des couches d'eau.

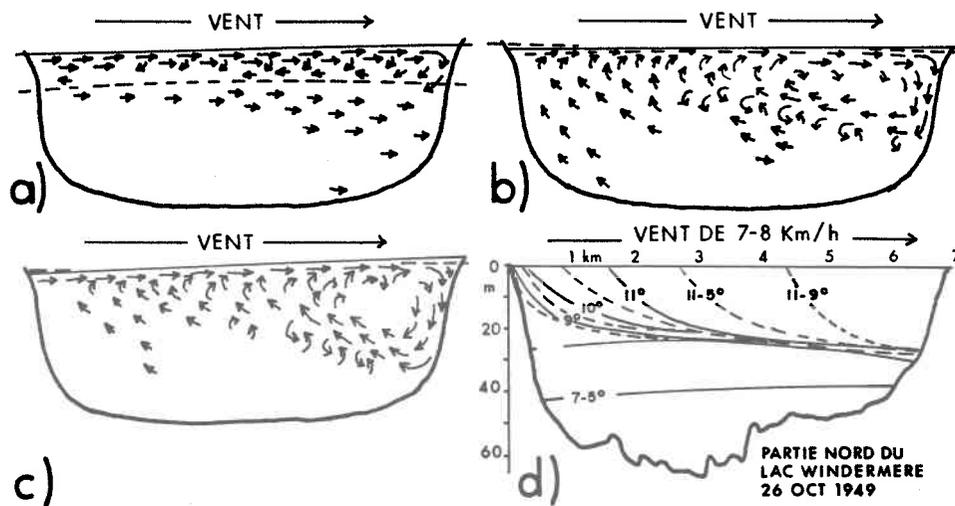
La télédétection pourrait apporter une aide précieuse lors d'études limnologiques en permettant de savoir (en période prolon-

Figure 10
DÉPLACEMENT DE L'EAU DANS UN LAC
SOUS L'INFLUENCE DU VENT.



A remarquer que l'eau en profondeur est également influencée par le phénomène même s'il se produit en surface.

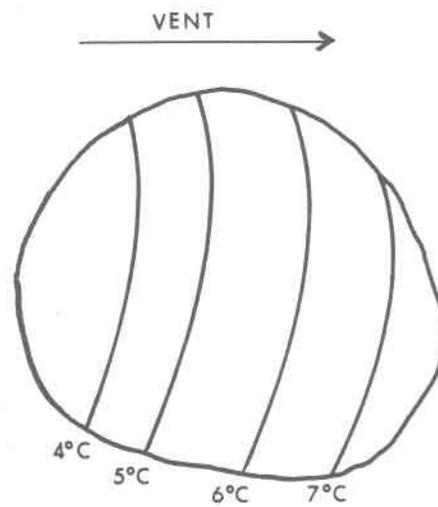
Figure 11
DÉPLACEMENT DE L'EAU DANS UN LAC
STRATIFIÉ SOUS L'INFLUENCE DU VENT.



DESSINÉ D'APRÈS WETZEL, 1975

Sous l'effet du vent, la stratification verticale s'accompagne d'une stratification horizontale.

Figure 12
DISTRIBUTION À LA SURFACE D'UN LAC
STRATIFIÉ SOUS L'INFLUENCE DU VENT.



Représentation théorique: gradient de température

gée de vent évidemment) s'il y a effectivement stratification thermique. En effet, lorsque la stratification horizontale de température est en place, il est possible de détecter ce phénomène par l'utilisation de senseurs à infrarouge thermique, lesquels peuvent évaluer la température de surface de façon très précise (au degré près). Il serait donc possible de connaître le pattern de distribution de la température à la surface du lac. Celui-ci devrait être semblable à celui présenté à la figure 12.

De plus, dans le cas où la connaissance de la qualité physico-chimique des eaux d'un lac serait suffisamment élaborée (conditions à l'état stable), il serait possible, par un échantillonnage des eaux lorsque le phénomène est en place, d'analyser les effets du vent sur la stratification elle-même (brassage, mélange des eaux, etc).

Un autre type d'étude pourrait également être mené avec l'aide de la télédétection. Celle-ci pourrait porter sur la différence de qualité physico-chimique entre les eaux de surface et les eaux de profondeur.

En effet, il est possible que l'eau en profondeur n'ait pas la même composition chimique que celle en surface. Supposons par exemple, qu'il y ait une différence dans la concentration des solides en suspension et/ou dissous entre les eaux de surface et de fond. Cela changerait les caractéristiques optiques de l'eau et il deviendrait possible d'observer le phénomène par télédétection. Toutefois, dans ce cas, le paramètre utilisé ne serait pas la température mais plutôt la composition chimique de l'eau (différence de réflectance entre une eau claire et une eau contenant des solides en suspension et/ou dissous).

La télédétection nous permettrait donc, avec l'aide de mesures de contrôle sur le terrain, c'est-à-dire un échantillonnage de la qualité physico-chimique de l'eau de surface en différents points du lac, de connaître par extrapolation la qualité physico-chimique de toute la masse d'eau du lac.

La photographie suivante (figure 13) a été prise d'une image reproduite par ordinateur lors d'une analyse numérique des radiances fournies par le satellite Landsat I le 20 juillet 1974. Comme on peut le remarquer, au moins la moitié de la superficie du Lac St-Jean est stratifiée. Cette stratification horizontale est située directement dans le sens du vent.*

Selon l'analyse habituelle des radiances, les eaux les plus chargées en solides dissous et en solides en suspension se trouveraient à l'extrémité Est du lac, ce qui signifierait que les eaux de surface seraient plus chargées que les eaux en profondeur. Toutefois, comme nous ne possédons pas de données de contrôle sur le terrain, nous ne pouvons savoir si cet interprétation est exacte ou non.

Il nous est impossible toutefois de savoir si le phénomène s'est manifesté sur toute la surface du lac car des nuages couvraient la partie Nord-Ouest du lac.

Bien que nous ayons utilisé ici une image fournie par un des satellites Landsat, il serait préférable, pour l'étude de ce phénomène sur un lac particulier, d'utiliser l'avion comme

* Selon le Service de la Météorologie du Ministère de l'Environnement du Québec, le vent aurait également soufflé dans cette direction et avec la même intensité moyenne les 18 et 19 juillet 1974.

FIGURE 13

STRATIFICATION HORIZONTALE SUR LE LAC SAINT-JEAN
ENREGISTRÉE PAR LE SATELLITE LANDSAT I LE 20 JUILLET 1974.

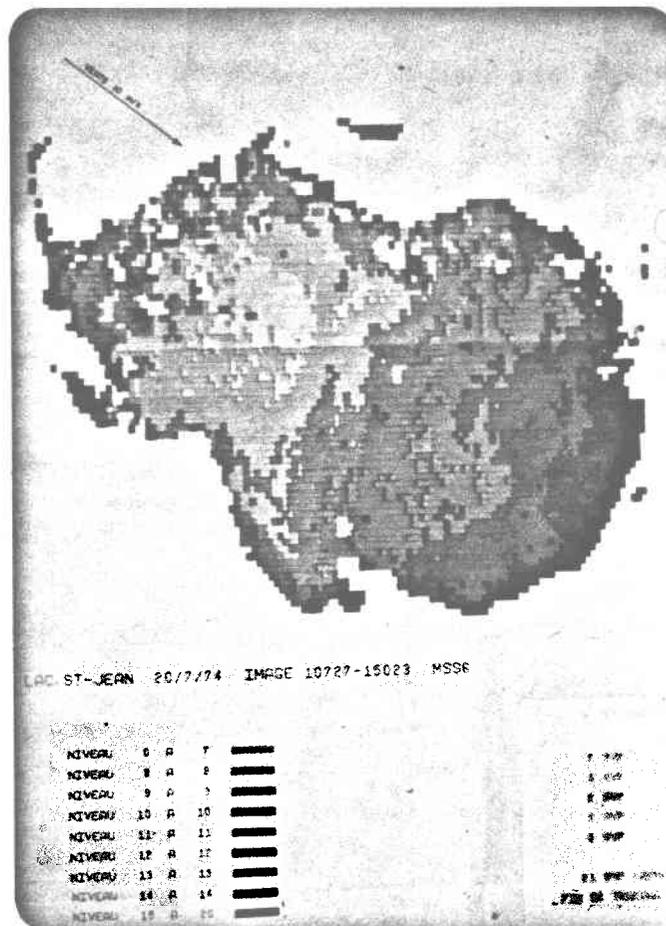


Image reproduite par ordinateur suite à une analyse numérique des radiances. Source: W. Sochanska, INRS-Eau; communication personnelle.

plate-forme et ce, pour au moins deux raisons. Premièrement, les satellites Landsat ont une fréquence de prise trop faible pour espérer enregistrer ce phénomène aussi souvent qu'il serait nécessaire. Deuxièmement, ces satellites n'ont pas de senseur pour l'infrarouge thermique. *

L'utilisation de l'avion par contre permettrait l'usage de deux types de senseurs, un pour l'infrarouge thermique et l'autre pour les caractéristiques optiques de l'eau et pour la chlorophylle (même type de senseur que ceux des satellites Landsat ou encore que le senseur Balayeur à barette) de sorte que le phénomène pourrait être enregistré pour un lac stratifié ou non. Cependant, pour un lac non stratifié, comme nous l'avons vu précédemment dans la composition chimique de l'eau, certaines conditions sont nécessaires.

De plus, l'avion permettrait une fréquence de prise plus élevée que celle des satellites. Il faut toutefois penser que l'étude par avion devrait se faire à une altitude assez élevée de façon à éviter, lors d'étude de grandes surfaces, que la stratification change entre le début et la fin du survol.

* Le satellite NOAA possède un senseur pour l'infrarouge thermique et une fréquence de prise adéquate pour ce genre d'étude. Toutefois, sa résolution au sol est trop faible pour nous permettre de distinguer des détails aussi précis que ceux désirés.

Le satellite Seasat était muni d'un senseur à infrarouge thermique et sa fréquence de passage était de 36 heures. Toutefois, sa résolution au sol de 5 km aurait été trop faible pour permettre une bonne étude. Par contre, le radar à ouverture synthétique aurait permis une excellente couverture de ce type de phénomène étant donné sa forte résolution au sol (25 m) et sa fréquence élevée de prise (4 jours consécutifs tous les 70 jours; U.S. Department of Commerce, NOAA, 1977). Toutefois, les produits de ce satellite ne sont pas encore disponibles au Québec.

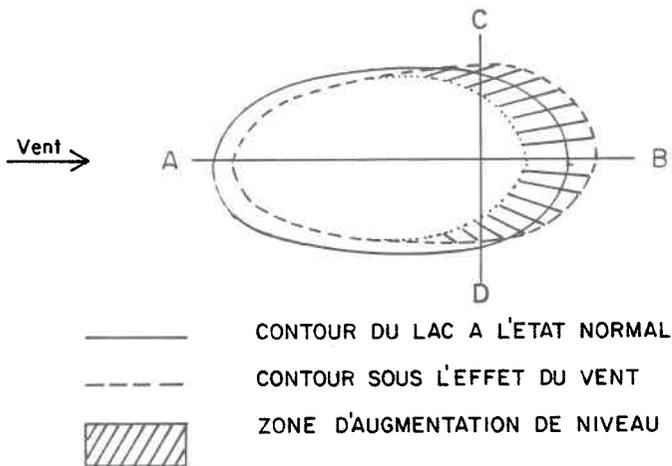
II.3.2.3 Le déplacement de l'eau après la tombée du vent

Lorsque le vent souffle sur un lac, cela occasionne, comme nous l'avons vu précédemment (voir figure 10), une diminution de l'eau à un bout du lac et une augmentation à l'autre bout. Lorsque le vent cesse, un retour vers l'équilibre s'effectue. Toutefois, cela ne se fait pas sans qu'il y ait création de nouveaux mouvements de la masse d'eau. En effet, à ce moment, commence un phénomène de balancement qui se continue jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint. Ce mouvement de toute la masse d'eau donne naissance à des vagues de la longueur du lac et dont l'amplitude la plus forte est en surface. Ces vagues sont appelées seiches de surface (figure 14). Il est important de noter que ces dernières n'ont pas une très grande amplitude (de 1 à 2 mm pour les petits lacs jusqu'à un peu plus de 2 m pour les très grands lacs; Wetzel, 1975) ni une forte périodicité (environ 5 minutes pour les petits lacs jusqu'à environ 15 heures pour les très grands lacs; Wetzel, 1975). De fait, ces deux caractéristiques dépendent de la longueur et de la profondeur du lac.

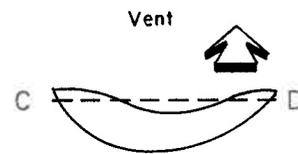
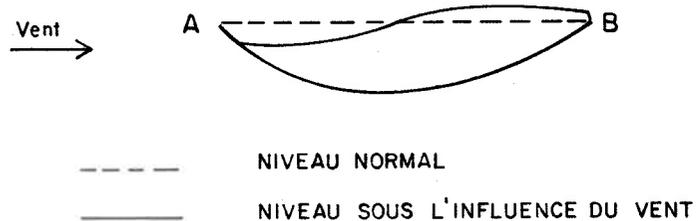
Si le lac est stratifié, un autre type de seiche est produit, soit les seiches internes. Elles ont une amplitude et une périodicité beaucoup plus grande que les seiches de surface (amplitude de 0,5 m pour les petits lacs jusqu'à plus de 10 m pour les très grands lacs; périodicité d'environ 5 minutes pour les petits lacs jusqu'à environ 900 heures pour les très grands lacs; Wetzel, 1975). Elles se différencient aussi des seiches de surface par le fait que leur maximum d'amplitude est près de la thermocline. Encore ici, il faut mentionner que ces phénomènes sont très importants car ils permettent les échanges entre les couches d'eau (à cause de la turbulence causée à l'interface des couches), échanges qui se font difficilement lorsqu'il y a une stratification stable. Il va

Figure 14
MOUVEMENTS DE BALANCEMENT
D'UNE SEICHE DE SURFACE

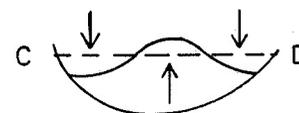
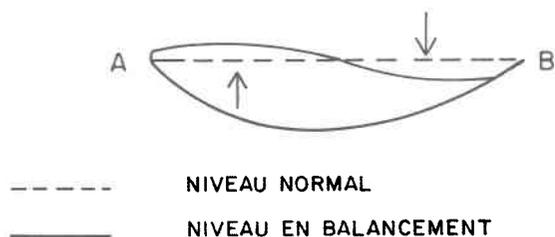
a) LAC SOUS L'EFFET DU VENT



b) COUPES TRANSVERSALES DU CROQUIS a)



c) MÊMES COUPES TRANSVERSALES QU'EN b)
MAIS UNE FOIS LE VENT ARRÊTÉ



Effets exagérés pour permettre une meilleure visualisation du phénomène.

sans dire que ces échanges sont très importants car ils modifient la composition chimique de l'eau et par le fait même la productivité du milieu.

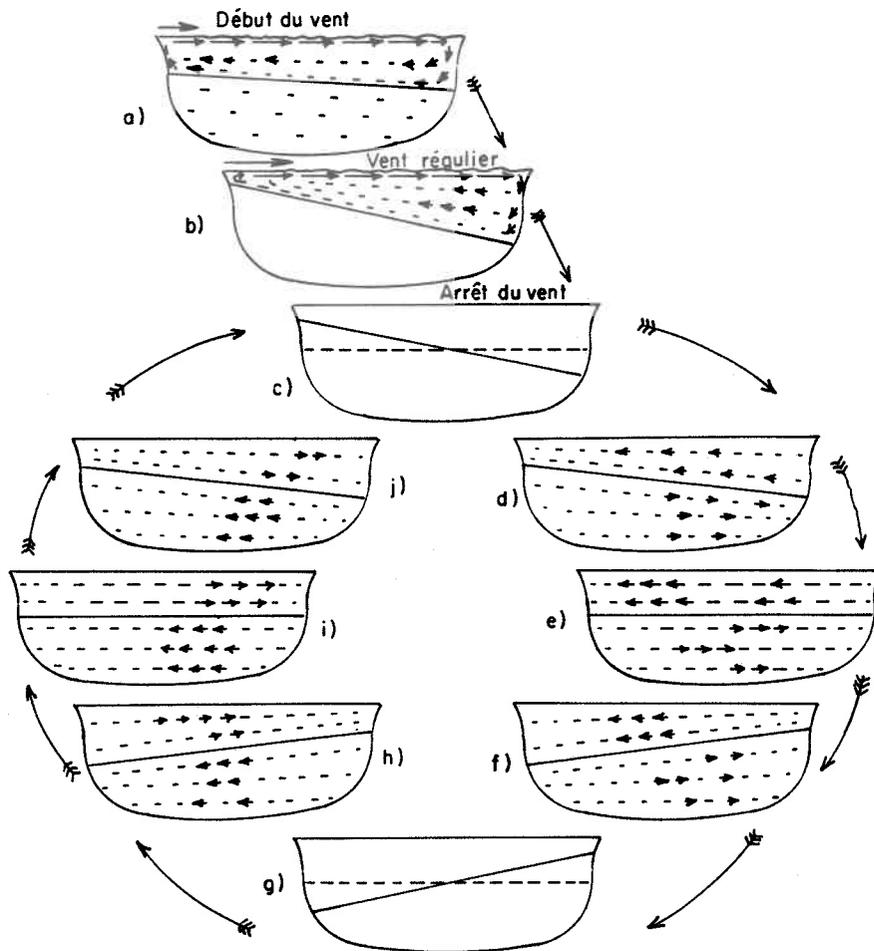
La figure 15 démontre ce phénomène dans un lac stratifié. On remarque sur cette figure qu'il y a formation (lorsque le vent cesse; croquis C) d'un mouvement de balancement des couches d'eau l'une sur l'autre (du fait de leur densité différente) jusqu'à l'équilibre.

On remarque également que ce jeu de balancier entre les couches d'eau affecte toute la masse d'eau et que l'amplitude maximale de ces seiches se situe aux environs de la thermocline.

Toutefois, le phénomène présenté à la figure 15 ne se produit pas d'une façon aussi simpliste. Plusieurs autres facteurs, comme la topographie du fond par exemple, viennent modifier ce mouvement de balancement. Un des plus importants est la force de Coriolis. On peut l'expliquer comme suit: une masse d'eau en mouvement a une inertie qui la pousse à se diriger en ligne droite dans l'espace. Le résultat de la force de rotation de la terre et du mouvement en ligne droite de la masse d'eau donne naissance à une petite force de rotation appelée la force de Coriolis. Dans l'hémisphère Nord, celle-ci tend à faire dévier les courants vers la droite. Toutefois, cette force n'est vraiment effective que dans les grands lacs; dans les petits, les effets sont si faibles qu'ils peuvent être considérés comme non-significatifs.

Les seiches de la figure 15 auront donc, dans l'hémisphère Nord, un mouvement de rotation vers la droite, tel que présenté à la figure 16.

FIGURE 15
BALANCEMENT DES COUCHES D'EAU DANS UN LAC APRES LA TOMBEE DU VENT.

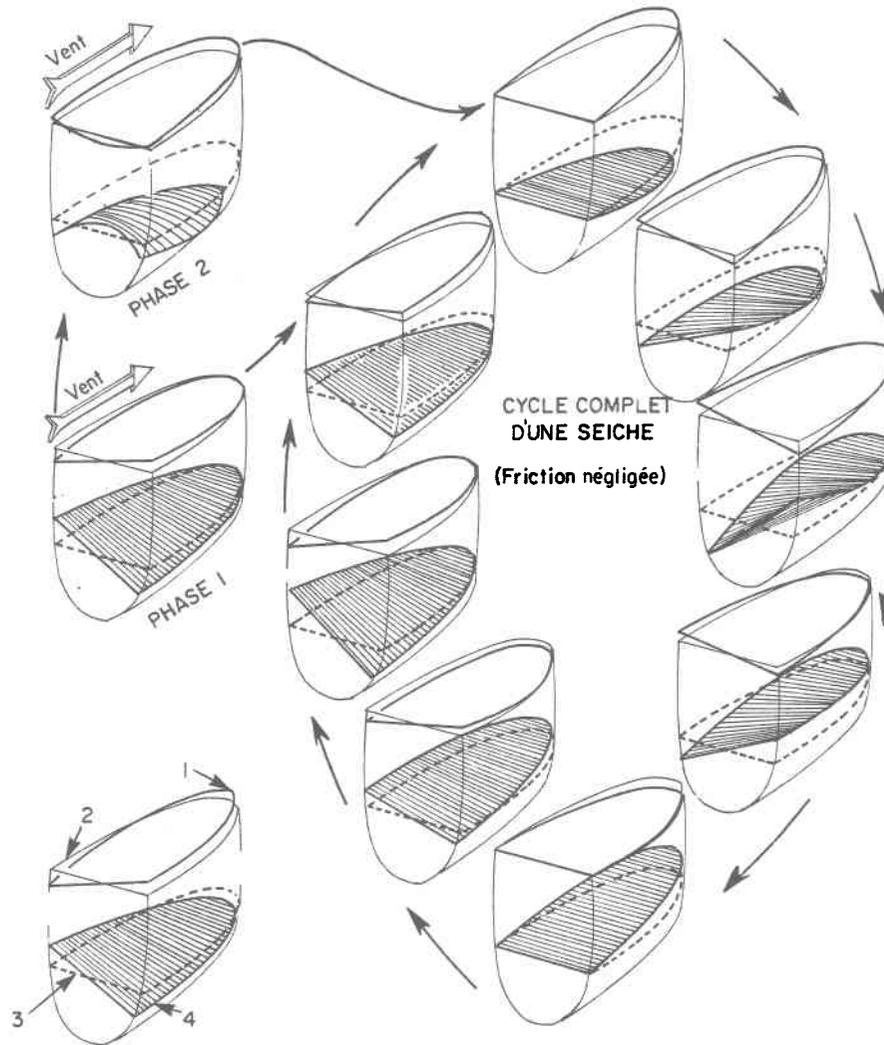


DESSINÉ D'APRÈS WETZEL, 1975

A remarquer la circulation interne de va et vient de l'eau qui se produit lors du balancement, ce qui produit de la turbulence et des échanges entre les couches d'eau.

Figure 16

EFFET DE LA FORCE DE CORIOLIS SUR LE BALANCEMENT DES COUCHES D'EAU



- 1: NIVEAU DE L'ÉPILIMNION LORS DU BALANCEMENT
- 2: NIVEAU DE L'ÉPILIMNION A L'ÉTAT STABLE
- 3: NIVEAU DE L'HYPOLIMNION A L'ÉTAT STABLE
- 4: NIVEAU DE L'HYPOLIMNION LORS DU BALANCEMENT

Dessiné d'après Wetzel, 1975

L'effet de la force de Coriolis se fait sentir sur les couches d'eau autant en surface qu'en profondeur.

L'étude des seiches par télédétection pose cependant certains problèmes. En effet, comme nous venons de le voir dans les pages précédentes, il peut se produire deux types de seiche dans un lac. Les seiches de surface se produisent dans tous les lacs tandis que les seiches internes se produisent dans les lacs stratifiés seulement.

Dans le cas d'un lac non stratifié, le phénomène devrait être assez facilement identifiable car la surface est influencée par un type de seiche seulement. Il ne faut pas oublier cependant que dans les petits lacs, l'amplitude des seiches n'est pas très forte.

Dans le cas d'un lac stratifié, les choses se compliquent puisque la surface n'est plus influencée simplement par un seul type de seiche mais par deux types. En effet, on peut remarquer à la figure 16 que les seiches internes se manifestent jusqu'en surface et ce, même si elles se produisent en profondeur. Il faut mentionner toutefois que ces oscillations en surface sont relativement faibles par rapport à celles produites en profondeur. Mortimer (1972) a enregistré dans le lac Léman (580 km^2) une différence du niveau de l'eau de 15 mm pour une oscillation de la thermocline de 9 m. Par contre, sur le même lac, on a enregistré des seiches de surface d'une amplitude de 1,87 m.

Pour conclure en ce qui concerne l'étude des seiches par télédétection, il nous semble très difficile de capter des différences de niveau de l'ordre de 1 à 2 cm et ce, tant au niveau des seiches internes que des seiches de surface. Toutefois, concernant ces dernières, il nous semble possible de détecter les différences

de niveau de l'ordre de 1 à 2 m se produisant dans les lacs de grande superficie.*

En effet, si le niveau de l'eau fluctue, le phénomène se répercute aussi sur le rivage. Si la pente de la berge et la ligne de rivage sont connues, il est possible de connaître, par un calcul simple, l'amplitude de la seiche en mesurant la longueur de la berge qui sera inondée (voir figure 17).

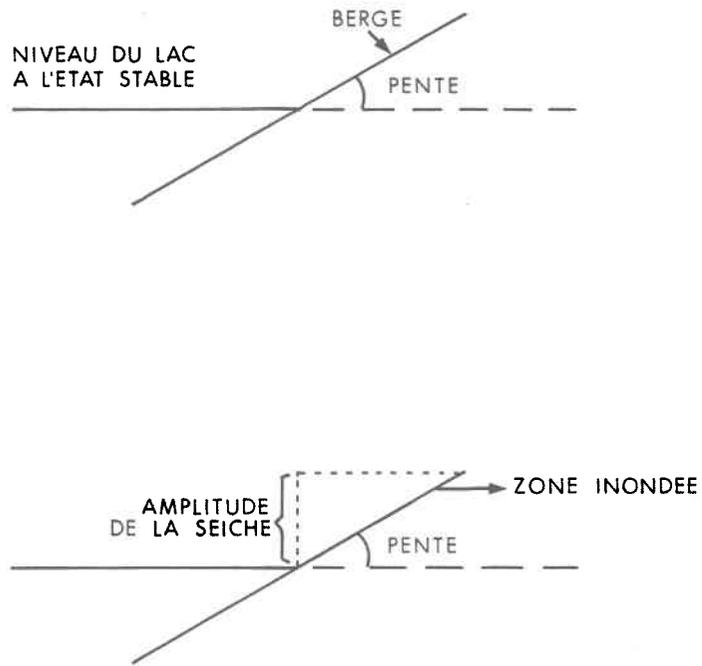
De plus, en prolongeant la durée des prises de données, il serait possible de connaître la périodicité et l'atténuation des seiches à chaque retour (voir figure 18).

Comme les phénomènes étudiés devraient se produire dans de grands lacs où l'effet de la force de Coriolis n'est pas négligeable, il faudrait envisager de poster plusieurs observateurs tout autour du lac car, comme on peut le remarquer sur la figure 19, le mouvement de balancement ne se fait pas en ligne droite mais en exerçant une rotation autour du lac.

L'étude de ce phénomène demande une forte résolution au sol de même qu'une fréquence de prise assez élevée de façon à ne pas "sauter" une période. L'utilisation de ballons stationnaires à très basse altitude tout autour du lac nous semble toute indiquée ici, car on peut y installer des caméras ayant une forte résolution au sol et une fréquence de prise élevée. Toutefois, quoique simple en théorie, cette expérience pourrait s'avérer difficilement réalisable en pratique à cause, en particulier, des conditions météorologiques.

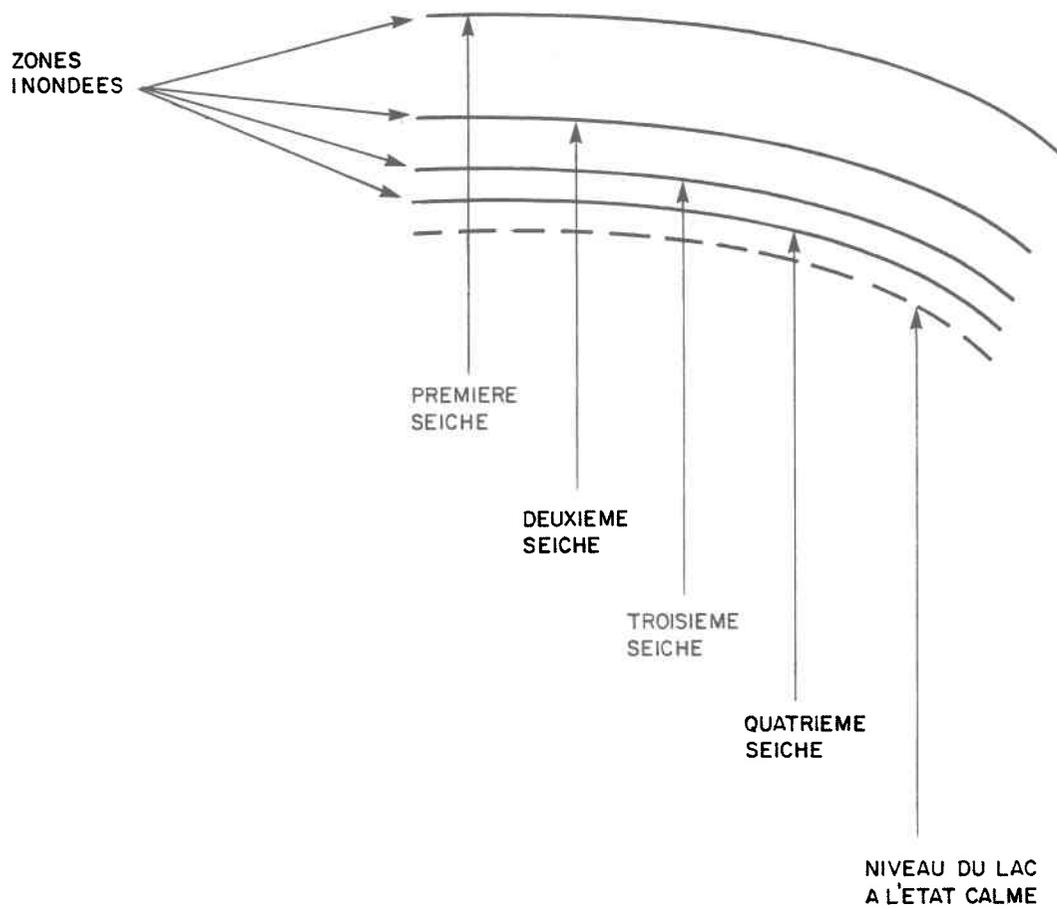
* Etant donné l'ordre de grandeur de ces seiches de surface, nous considérons que les différences de niveau à la surface qui pourraient être apportées par les seiches internes sont négligeables.

FIGURE 17 MESURE DE L'AMPLITUDE D'UNE SEICHE



La longueur de la zone inondée de la berge et la pente de cette dernière permettent de connaître l'amplitude d'une seiche.

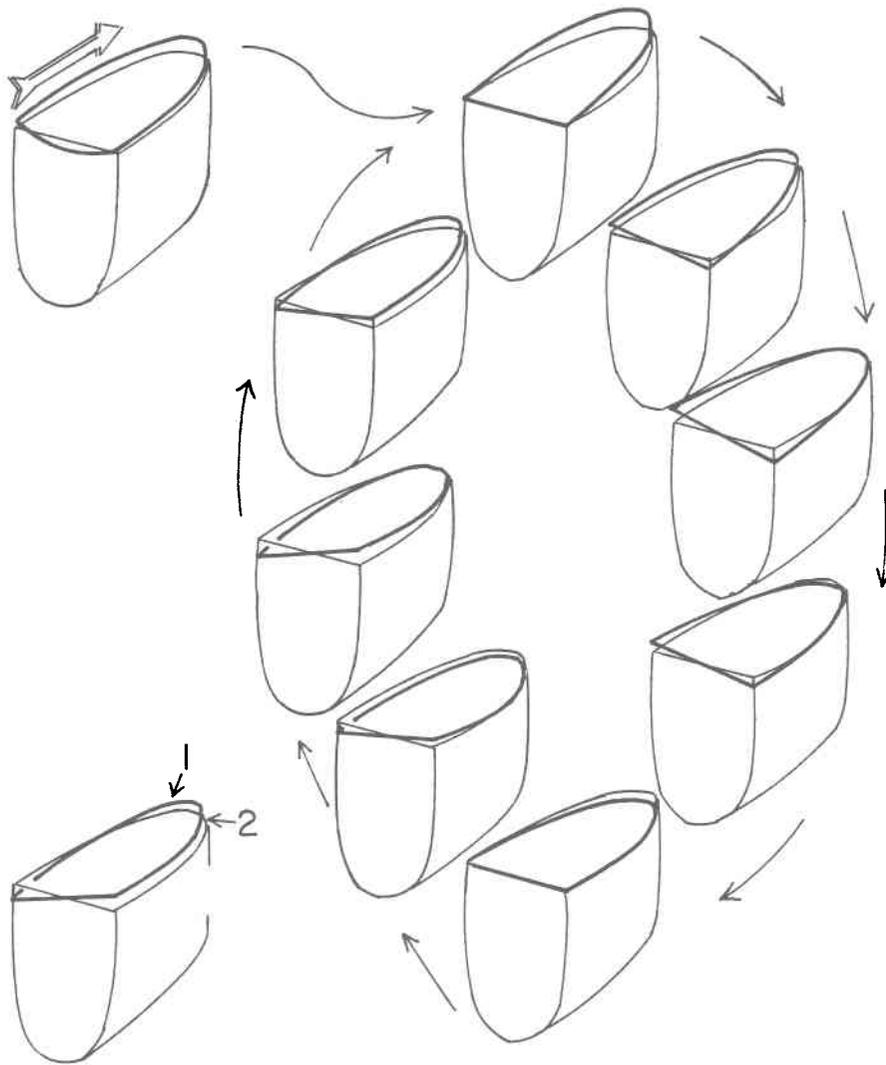
FIGURE 18
REPRESENTATION HYPOTHETIQUE DE CHANGEMENTS DE NIVEAU
CAUSES PAR DES SEICHES SUCCESSIVES



Au fur et à mesure du balancement, l'amplitude des seiches diminue jusqu'à l'état stable.

FIGURE 19

EFFET DE LA FORCE DE CORIOLIS SUR UNE SEICHE DE SURFACE



1-NIVEAU DE L'ÉPILIMNION LORS DU BALANCEMENT.
2-NIVEAU DE L'ÉPILIMNION À L'ÉTAT STABLE.

DESSINÉ D'APRÈS WETZEL , 1975

Une étude de l'amplitude des seiches et des temps de retour demanderait plusieurs observateurs sur le pourtour d'un lac car, comme on peut le constater, les seiches ne se manifestent pas toujours au même endroit à cause de la force de Coriolis.

II.3.2.4 Courants de densité des affluents

Lorsqu'une rivière entre dans un lac, son eau est rarement de la même température que celle du lac, donc rarement de la même densité.

On peut s'attendre, à cause des différences de densité, à ce que l'eau moins dense demeure en surface tandis que l'eau plus dense descende en profondeur. Si toutefois, l'eau d'une rivière est plus dense que celle de l'épilimnion et moins dense que celle du métalimnion ou de l'hypolimnion, on peut s'attendre à retrouver l'eau de cette rivière à la même profondeur que l'eau du lac de même densité (voir figure 20).

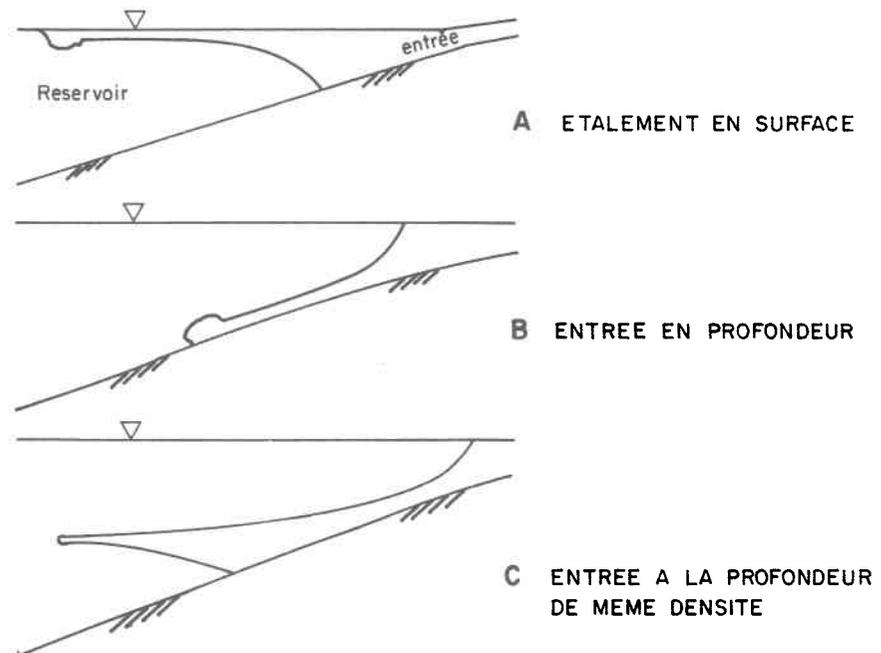
Ces phénomènes sont très importants au niveau de la productivité du milieu. En effet, si ces eaux courantes restent en surface à cause d'une densité moins forte, la production photosynthétique dans cette région devrait être différente de celle du reste du lac. De même, si la rivière est fortement chargée en éléments nutritifs, la production primaire devrait être plus forte dans cette région. Il est donc important de savoir, au cours d'une étude limnologique, si les échantillons pris dans cette zone contiennent réellement de l'eau du lac ou de l'eau du cours d'eau qui s'y déverse.

Ces phénomènes devraient pouvoir être étudiés assez facilement en télédétection. En effet, si l'on prend la situation présentée au croquis A de la figure 20 où l'eau de la rivière est moins dense que celle du lac, on doit s'attendre à un étalement en surface de l'eau de la rivière (voir figure 21). Par contre, si l'on prend la situation présentée au croquis B de la figure 20 où l'eau de la rivière est plus dense que celle du lac, on doit s'attendre à une situation contraire, c'est-à-dire à une pénétration rapide de l'eau de la rivière au fond du lac (voir figure 22).

L'utilisation d'un senseur pour l'infrarouge thermique (par avion) représente ici un excellent moyen d'étudier le phénomène. Celui-ci, en distinguant les températures, pourra suivre le cheminement des eaux des rivières.

Figure 20

ENTREE DE RIVIERES DE DENSITE DIFFERENTE DANS UN LAC

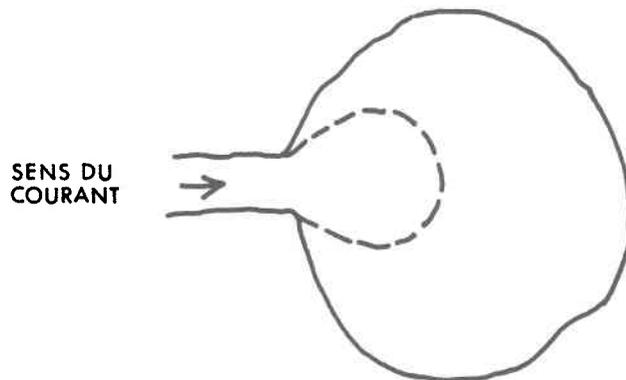


DESSINE D'APRES WETZEL , 1975

Si l'eau de la rivière est moins dense que celle du lac où elle se jette, elle s'étalera en surface (croquis A); si elle est plus dense, elle descendra au fond (croquis B) ou jusqu'à ce qu'elle rencontre une eau de même densité (croquis C).

Figure 21

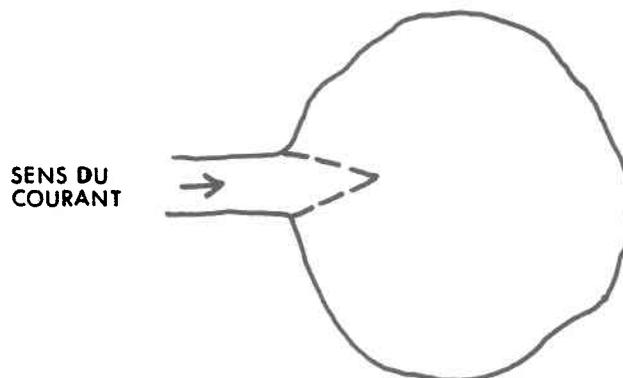
ÉTALEMENT EN SURFACE DE L'EAU D'UNE RIVIÈRE SE DÉVERSANT DANS UN LAC.



Lorsque l'eau de la rivière est moins dense que celle du lac, il y a étalement en surface.

Figure 22

PÉNÉTRATION EN PROFONDEUR DE L'EAU D'UNE RIVIÈRE SE DÉVERSANT DANS UN LAC.



Lorsque l'eau de la rivière est plus dense que celle du lac, il y a pénétration en profondeur.

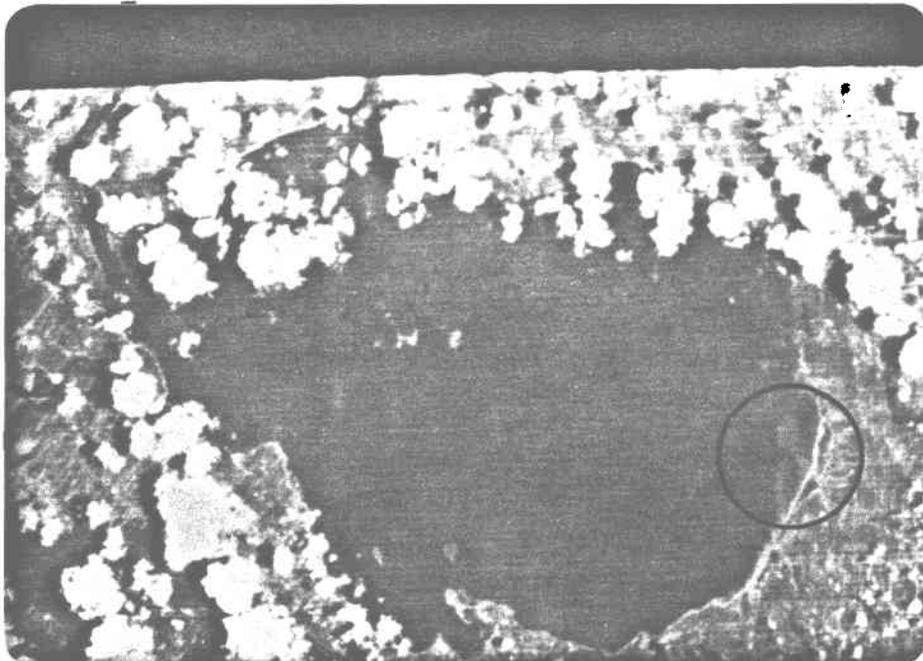
L'utilisation des satellites Landsat peut être également envisagée si la composition chimique de l'eau du lac (solides en suspension et dissous) est différente de celle de l'eau de la rivière ou encore si la concentration de la chlorophylle est différente dans les deux masses d'eau. Dans le cas de la chlorophylle cependant, il est plus probable que de meilleurs résultats soient obtenus avec l'utilisation d'un senseur du même type que le balayeur à barette.

La photographie suivante (figure 23) nous laisse voir le phénomène d'étalement des eaux d'une rivière à la surface d'un lac. Il s'agit d'un agrandissement d'une image d'un des satellites Landsat prise au mois de juin 1975. Comme on peut le constater sur cette image, les eaux des rivières Belle Rivière et des Aulnaies s'étaient en surface sur les eaux du Lac St-Jean. Etant donné la date de la prise, on peut supposer que l'eau des rivières est plus chaude que celle du lac.

Il est important de mentionner ici que les satellites Landsat peuvent nous fournir d'excellents renseignements pour ce type de phénomène car celui-ci se produit d'une façon pratiquement constante. On peut envisager certains problèmes d'application en période de crue mais, pour le reste du temps, l'usage de ces satellites semble efficace.

L'utilisation de techniques différentes (infrarouge thermique ou ondes visibles) risque cependant de donner des résultats légèrement différents et ce, lors de l'étude du même phénomène.

FIGURE 23
ÉTALEMENT EN SURFACE AU LAC SAINT-JEAN.

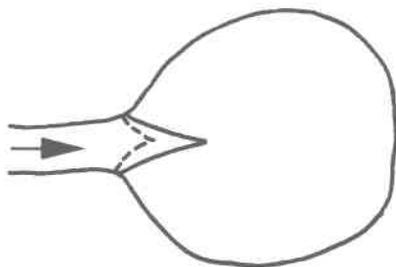


On remarque dans ce cercle l'étalement en surface des rivières Belle Rivière et des Aulnaies; agrandissement d'image (satellite Landsat, juin 1975). Source: H.G. Jones, INRS-Eau; communication personnelle.

En effet, les rayons infrarouges sont pratiquement tous absorbés dans l'eau en moins d'un mètre. En conséquence, nous aurons une vision du phénomène sur une couche d'eau très peu profonde. Par contre, dans le cas d'ondes visibles, il est possible, dépendant de la composition chimique de l'eau, que les ondes réfléchies proviennent d'une couche d'eau plus épaisse.

Prenons un lac où l'eau est claire et où, par conséquent, les longueurs d'onde associées au bleu et au vert peuvent pénétrer profondément. Une rivière dont l'eau démontre une concentration de solides en suspension plus élevée que celle du lac et qui se diffuse vers le fond pourra être suivie plus longtemps par les ondes visibles que par les rayons infrarouges thermiques parce que ces derniers sont absorbés plus rapidement. La figure 24 nous présente ce phénomène.

Figure 24
ETUDE PROLONGEE DE LA DIFFUSION DES EAUX D'UNE RIVIERE VERS LE FOND
D'UN LAC PAR L'UTILISATION D'ONDES VISIBLES



--- CÔNE DE DIFFUSION OBTENU
PAR INFRAROUGE THERMIQUE
— CÔNE DE DIFFUSION OBTENU
PAR ONDES VISIBLES

Etant donné la particularité des ondes visibles de pouvoir pénétrer plus profondément dans l'eau claire que les ondes infrarouges, il est possible de suivre le phénomène de diffusion des eaux vers le fond plus longtemps.

Il est possible d'utiliser ce phénomène de représentation pour améliorer notre connaissance du comportement de la rivière à son arrivée dans le lac.

En effet, plus le cône de diffusion obtenu par l'utilisation de rayons infrarouges se rapprochera, par superposition, de

celui obtenu par l'utilisation d'ondes visibles plus il nous sera possible de déduire que le taux de diffusion vers le fond est élevé (diffusion rapide vers le fond). Par contre, une diffusion lente vers le fond sera indiquée par des cônes de diffusion de température et de turbidité non-superposables.

La diffusion des rivières ne se produit pas seulement dans les lacs mais aussi dans les rivières. Toutefois, dans ce cas, la diffusion ne se fait pas du tout de la même façon. En effet, à cause de la vitesse d'écoulement des eaux de la rivière qui reçoit les eaux de l'affluent, il se produit une stratification horizontale dans le cours d'eau récepteur de telle sorte que les eaux des cours d'eau glissent côte à côte dans un écoulement stratifié, le mélange des eaux se produisant généralement sur une distance relativement longue.

Tout comme dans le cas de la diffusion des eaux d'une rivière dans les eaux d'un lac, la diffusion des eaux d'une rivière dans celles d'une autre rivière peut être étudiée par télédétection. Les paramètres de température, de composition chimique des eaux (solides en suspension et/ou dissous) et de chlorophylle peuvent être utilisés si les conditions le permettent.

De plus, comme ces phénomènes sont constants, ils peuvent facilement être étudiés par satellite. Les figures 25 et 26 illustrent bien le phénomène d'écoulement stratifié dont il a été question auparavant.

II.3.2.5 Les courants dans les lacs

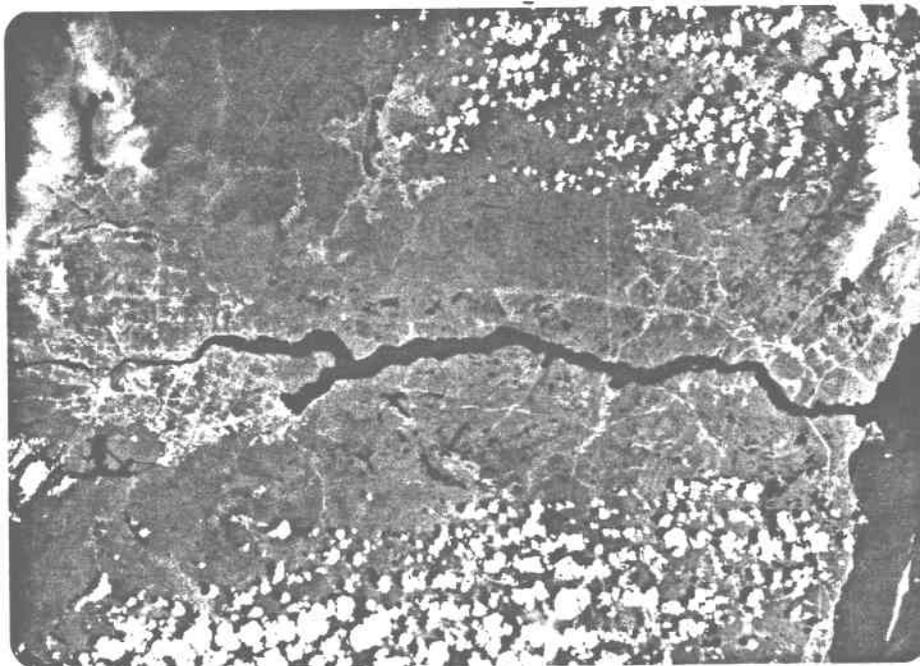
Les étendues d'eau tels les lacs sont constamment en mouvement. Ces mouvements qui peuvent se répercuter sur toute la mas-

FIGURE 25
EMBOUCHURE DE LA RIVIÈRE TICOUAPÉ DANS LE LAC SAINT-JEAN.



Les eaux chargées de la Ticouapé nous laissent voir clairement l'écoulement stratifié sur les berges du lac St-Jean. De plus, on peut remarquer que l'eau dévie vers la droite (Source: H.G. Jones, INRS-Eau; communication personnelle).

FIGURE 26
ENTRÉE DU SAGUENAY DANS LE SAINT-LAURENT.



La différence de teinte des eaux du Saguenay par rapport à celles du Saint-Laurent nous permet de bien voir que celles du Saguenay se collent à la rive nord; image Landsat (Source: H.G. Jones, INRS-Eau; communication personnelle).

se d'eau ou simplement sur une partie de celle-ci sont causés par deux facteurs principaux, soit l'entrée des rivières dans les lacs et le vent.

L'entrée d'une rivière dans un lac entraîne un déplacement de l'eau du lac. Ceci produit par le fait même la création d'un courant dans le lac, courant qui aura tendance à dévier vers la droite dans l'hémisphère Nord à cause de la force de Coriolis.* Ce phénomène est illustré à la figure 27.

Le vent, pour sa part, peut aussi être la cause de grands courants dans les lacs. En effet, le vent en se déplaçant sur la surface de l'eau entraîne cette dernière dans sa direction comme nous l'avons vu précédemment à la page 41 et aux figures 10 et 11.

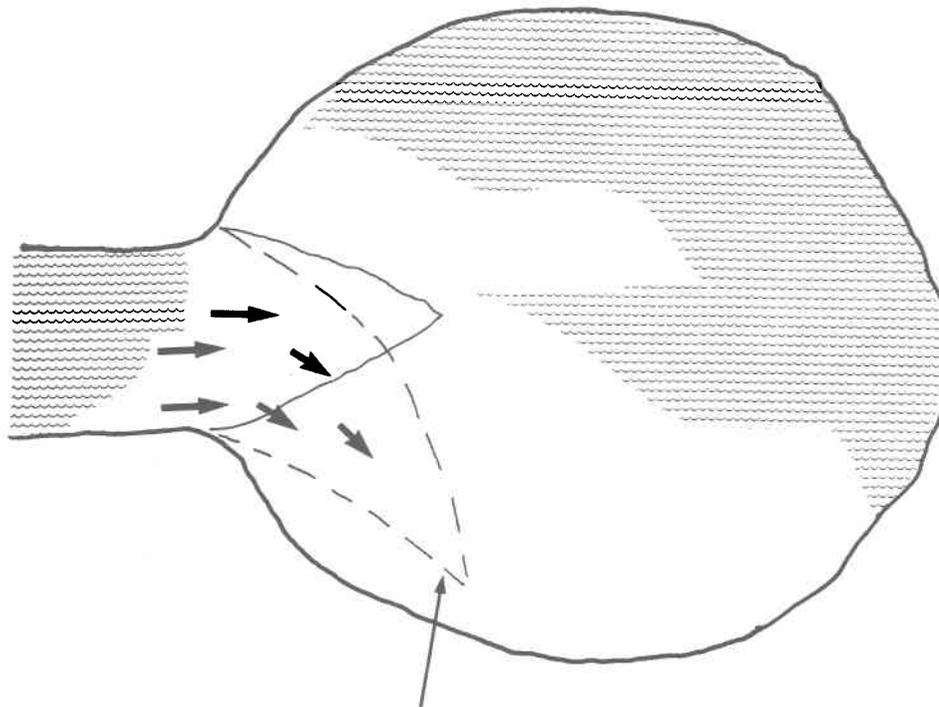
Lorsque le lac est de grande superficie, il est possible que le vent provienne, dépendamment des zones, de directions différentes, ce qui cause la formation de courants tournant dans le sens contraire l'un de l'autre. On peut donc en déduire que le vent peut engendrer des courants dont la force est supérieure à la force de Coriolis. Ce phénomène est facilement observable à la figure 28.

L'étude de la dynamique des eaux d'un lac peut être effectuée par télédétection en utilisant les affluents des lacs comme "repères". En effet, les rivières qui se déversent dans les lacs ont souvent une eau de température et/ou de composition chimique différente de celle des lacs, ce qui nous permet de suivre leur évolution dans les lacs et du même coup, de connaître la dynamique des eaux des lacs. Les techniques de télédétection à en-

* Il est important de noter que dans plusieurs cas, l'effet de la force de Coriolis ne sera pas perceptible à cause de la faible superficie des lacs. De même, dans d'autres cas, elle sera annihilée par la force des courants (qui peuvent être dans le sens contraire) causés par les rivières.

FIGURE 27

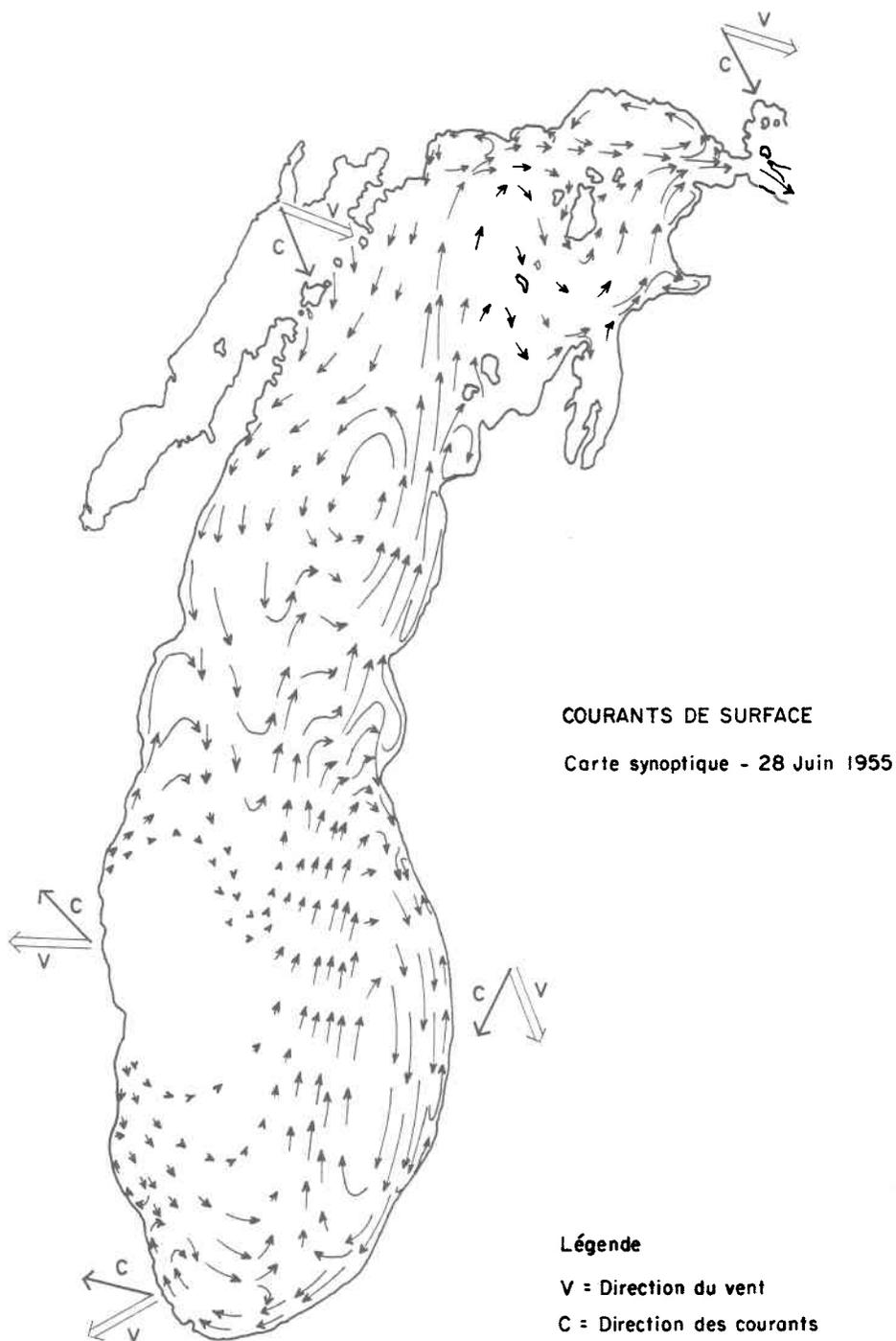
EFFET DE LA FORCE DE CORIOLIS SUR L'ENTREE DES RIVIERES
DANS LES LACS (HEMISPHERE NORD)



EFFET DE CORIOLIS FAISANT DEVIER
LES COURANTS VERS LA DROITE

Les eaux auront tendance à se coller à la rive droite et à circuler dans le sens contraire des aiguilles d'une montre (hémisphère nord).

FIGURE 28
COURANTS DE SURFACE ENGENDRES PAR LE VENT SUR LE LAC MICHIGAN



DESSINÉ D'APRÈS WETZEL, 1975

Certains courants tournent dans le même sens que les aiguilles d'une montre, ce qui est contraire à la circulation prévue dans l'hémisphère nord. Ces courants sont engendrés par des vents dont la force est supérieure à la force de Coriolis.

visager pour ces études sont évidemment les mêmes que celles élaborées dans la section précédente (section II.3.2.4).

La figure suivante (figure 29) laisse voir clairement la dynamique des eaux du lac Saint-Jean, notamment dans la partie ouest du lac. On remarque que les eaux des rivières Péribonca (au nord) et Ticouapé (entre les rivières Mistassini et Chamouchouane*) sont déviées vers la gauche lors de leur entrée dans le lac, ce qui nous indique un mouvement giratoire contraire à celui qui est habituellement observé sur ce lac. En effet, selon les observations faites sur ce lac, les eaux tournent généralement dans l'autre sens (H.G. Jones, communication personnelle).

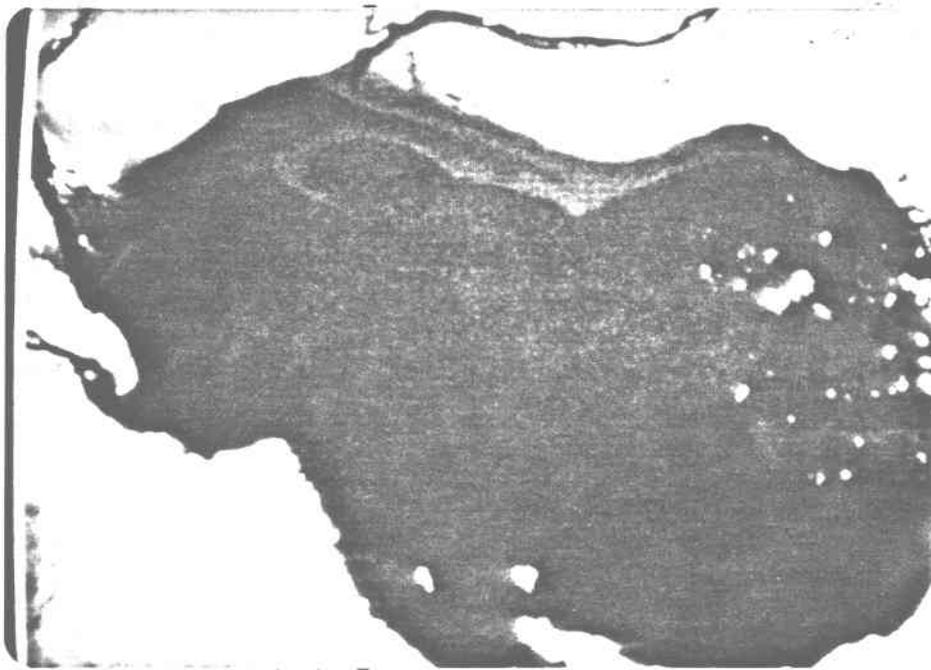
La cause la plus probable d'un tel mouvement est sans contredit le vent; ce jour-là, un vent d'environ 18 km/h soufflait dans la direction Sud-Est dans cette région. Il est possible que ce vent ait pu provoquer un renversement du sens du mouvement giratoire des eaux.

II.3.2.6 La circulation de Langmuir

La circulation de Langmuir est un phénomène de circulation de l'eau de surface sous l'effet du vent qui cause la formation de longues bandes de matières (débris, écumes, algues, etc.) à la surface des masses d'eau. Ces bandes sont parallèles entre elles et se forment dans le sens du vent. On les retrouve sur tous les lacs et elles prennent naissance avec des vents de vitesse aussi faible que 7 à 10 km/h.

* On ne distingue pas clairement les eaux des rivières Chamouchouane et Mistassini.

FIGURE 29
LA DYNAMIQUE DES EAUX DU LAC SAINT-JEAN.



Agrandissement d'image (satellite Landsat). Source: H.G. Jones, INRS-Eau; communication personnelle.

Comme on peut le voir à la figure 30, la formation de ces bandes serait causée par la rotation de cellules d'eau dans le sens inverse l'une de l'autre, créant du même coup des points de convergence et de divergence où les matières flottantes s'accablent. Cette rotation proviendrait selon Faller (1969) d'une instabilité en surface engendrant un mouvement vers le bas et mettant en branle un mécanisme de convection. Cette instabilité serait générée par les oscillations verticales causées par les vagues de surface.

La connaissance de ce phénomène est très importante lors de l'étude des lacs car la distribution des micro-organismes, de la matière organique ou des autres matières en surface sera influencée sur toute la superficie exposée au vent.

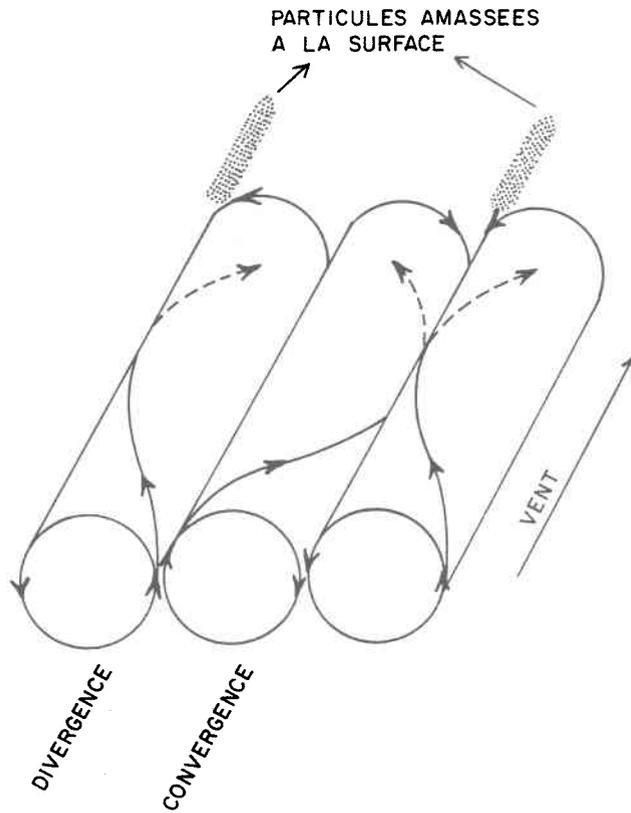
Ainsi, les résultats d'une campagne d'échantillonnage pourraient ne pas être représentatifs des valeurs réelles retrouvées dans le milieu si, par exemple, tous les échantillons seraient pris entre les bandes. Mentionnons ici que lorsque l'on se déplace sur un lac, pour échantillonner, nous sommes très près de la surface de l'eau. De ce fait, si les bandes sont le moins éloignées l'une de l'autre, elles peuvent passer complètement inaperçues.

L'observation de ce phénomène par télédétection est relativement simple. En effet, il est facile de prévoir le moment de la manifestation (vent); de plus, il se manifeste de façon très nette à la surface de l'eau (bandes blanchâtres alignées parallèlement dans le sens du vent) de sorte qu'il peut être capté par tous les senseurs opérant dans la région visible du spectre électromagnétique.

Le principal problème se situe au niveau de l'échelle de représentation. En effet, les bandes sont généralement assez longues mais de très faible largeur de sorte qu'une forte résolution au sol est nécessaire sinon le phénomène passera inaperçu. Le survol

Figure:30

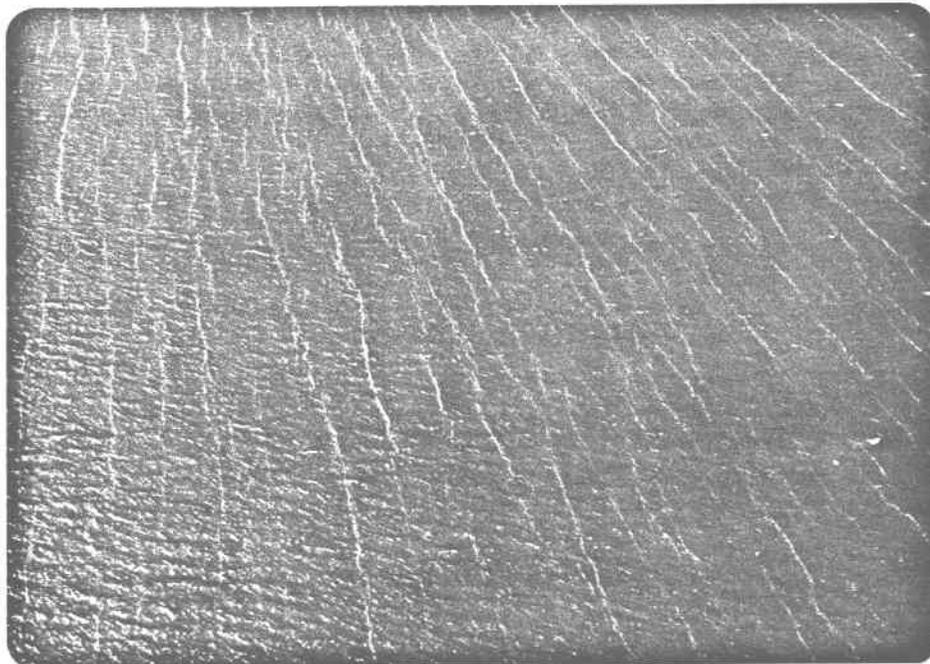
FORMATION DES BANDES DE PARTICULES A LA SURFACE
DES EAUX SOUS L'INFLUENCE DU VENT.



Dessiné d'après Wetzel , 1975

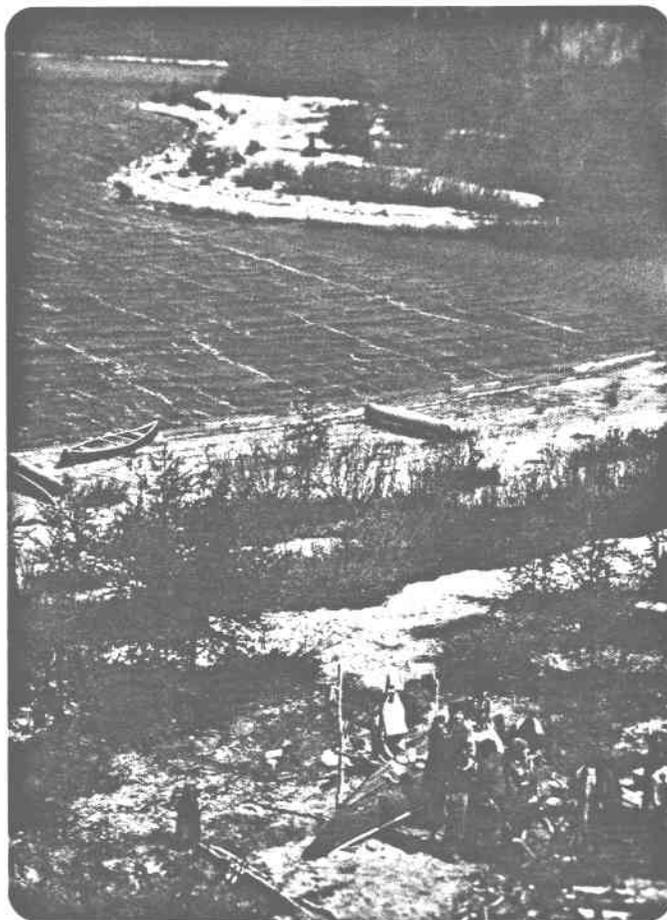
Les particules sont amassées à la surface par un mécanisme de rotation des cellules d'eau en sens inverse l'une de l'autre.

FIGURE 31
CIRCULATION DE LANGMUIR SUR LE LAC DES DEUX-MONTAGNES



Les bandes de particules peuvent être longues et très minces. Photo prise par hélicoptère, mai 1977.

FIGURE 32
CIRCULATION DE LANGMUIR DANS UNE BAIE SUR LA RIVIÈRE DU LIÈVRE



Ce phénomène ne se produit pas seulement en lac; il peut également se produire en rivière si les conditions s'y prêtent. (Source: R. Lamontagne, ministère de l'Environnement du Québec; communication personnelle).

par avion à basse altitude semble ici le meilleur moyen d'étudier ce phénomène puisqu'il permet une bonne résolution et une fréquence de prise élevée si désirée. Il va sans dire que les satellites ne peuvent être utilisés ici étant donné leur résolution au sol et leur fréquence de prise.

Les figures 31 et 32 nous laissent bien voir les bandes blanches à la surface de l'eau. On peut voir facilement (sur la figure 31 entre autres) que les bandes sont très minces mais qu'elles peuvent être relativement longues.

II.3.2.7 La barre thermique

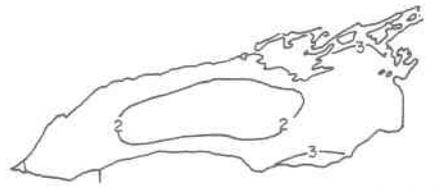
Le phénomène de la barre thermique se produit dans les lacs (les grands lacs surtout) au printemps lors du réchauffement des eaux. Il consiste en la formation d'une stratification verticale de l'eau près des berges alors que le centre est toujours en isothermie.

En effet, à la fonte des glaces au printemps, l'eau peu profonde des berges se réchauffe plus rapidement que l'eau du large. Il en résulte que l'eau près des berges se stratifie alors que l'eau du large demeure en isothermie. La zone de transition entre les eaux stratifiées et les eaux non-stratifiées est appelée barre thermique (voir figure 33). Celle-ci est en fait un isotherme vertical à 4⁰ C qui se déplace vers le large au fur et à mesure que l'eau du lac se réchauffe. Elle disparaît lorsque les différences de température de chaque côté de la barre diminuent et que toute la masse d'eau devient stratifiée.

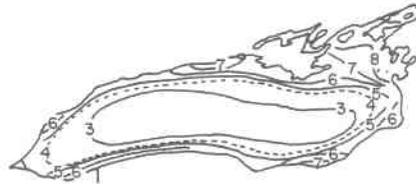
Ce phénomène de barre thermique est relativement important car il permet un certain brassage des eaux. En effet, des courants de densité se forment de chaque côté de la barre thermique causant une circulation de l'eau dans toute la masse d'eau. Comme on peut le constater à la figure 34, du côté de la rive l'eau près de la barre thermique se refroidit à environ 4⁰ C, ce qui augmente sa densité et crée un courant de densité. De l'autre côté de la barre, le même phénomène se produit, mais à l'inverse. L'eau plus

FIGURE 33 PHÉNOMÈNE DE BARRE THERMIQUE SUR LE LAC ONTARIO

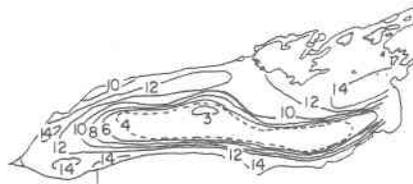
TEMPERATURE A LA SURFACE



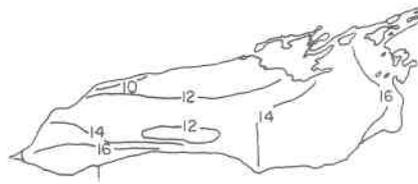
26-29 AVRIL 1965



17-20 MAI 1965

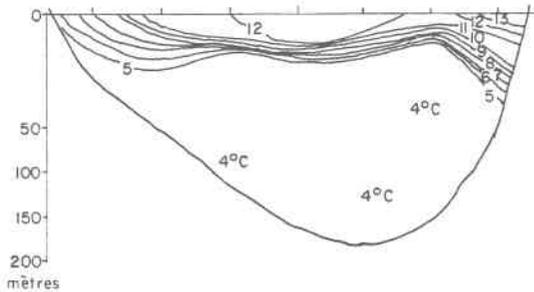
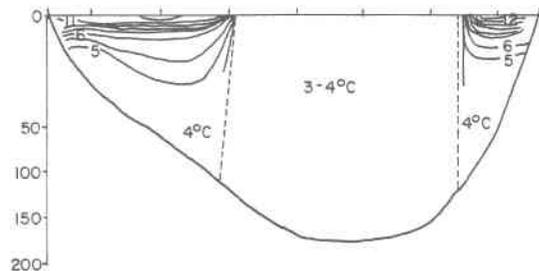
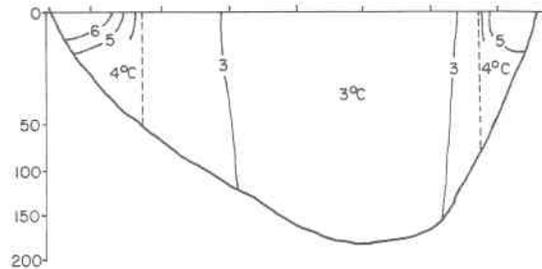
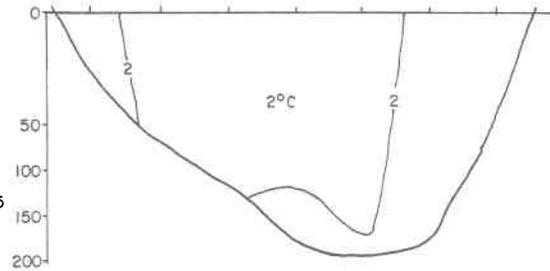


7-10 JUIN 1965



28-30 JUIN 1965

TEMPERATURE EN PROFONDEUR
[PARTIE CENTRALE DU LAC (NORD-SUD)]

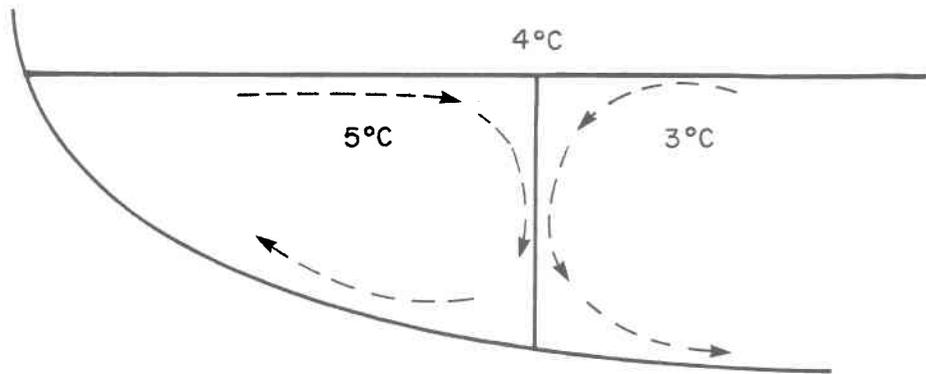


Dessiné d'après Wetzel, 1975

A remarquer qu'il y a, jusqu'à la fin juin, deux types de stratification. La stratification horizontale disparaît lorsque la stratification verticale s'installe.

Figure 34

COURANTS DE DENSITE DE CHAQUE COTE DE LA BARRE THERMIQUE



Mécanique de convection relié à la barre thermique.

froide se réchauffe au contact de la barre thermique et devient plus dense, créant également un courant de densité le long de cette dernière.

Ce phénomène peut influencer la production primaire d'un lac. En effet, il est possible que les eaux des rivières qui alimentent un lac soient plus chargées en éléments nutritifs que les eaux de ce lac à cause du lessivage qui se produit lors de la fonte de la neige. Il peut donc se produire, à cause du phénomène de la barre thermique, que les eaux d'un lac près des berges soient plus riches en éléments nutritifs et plus chaudes que celles du large, ce qui y amènera une plus grande productivité.

Encore ici, il est important que le chercheur soit informé de la manifestation de ce phénomène lors d'études du milieu aquatique car les résultats de l'échantillonnage peuvent être grandement influencés.

L'observation de ce phénomène par télédétection peut être faite de diverses façons. En effet, le phénomène de la barre thermique, tout comme celui de la circulation de Langmuir, peut occasionner une accumulation de particules en surface au niveau de la barre. Ainsi, un senseur opérant dans la région du visible du spectre électromagnétique permettra de bien capter ce phénomène. De même, il est possible d'envisager l'utilisation du proche infrarouge si la concentration de chlorophylle est assez élevée. Les différences perçues de chaque côté de la barre nous permettraient une bonne représentation du phénomène.

Toutefois, l'utilisation de l'infrarouge thermique semble la technique la plus intéressante à utiliser parce qu'elle est la plus sûre. En effet, advenant le cas où la production serait la même de chaque côté de la barre ou encore s'il n'y avait pas d'accumulation de débris à la surface au niveau de la barre, les deux techniques pré-

cédentes ne nous seraient d'aucune utilité. L'utilisation de senseurs à infrarouge thermique permet par contre d'obtenir la température à la surface du lac et ce, pour tous les survols.

En ce qui concerne les plates-formes, l'avion semble encore ici le meilleur outil à utiliser car il permet une fréquence élevée de survols et une plus forte résolution au sol que les satellites, ce qui semble très important pour l'étude de ce phénomène.

De plus, étant donné la possibilité d'une fréquence élevée de survols, l'avion permet de suivre l'évolution du phénomène dans le temps, ce qu'il est impossible de faire en se fiant aux données prises par satellites.

II.3.2.8 La glace

Le phénomène de la glace est très familier pour toute personne vivant au Québec puisque les lacs en sont recouverts pendant quatre à six mois et plus par année dépendant des régions.

Avec les vagues de surface, la glace est le phénomène le plus connu de tous ceux dont il a été question dans ce travail et ce, à cause de sa très grande facilité d'observation. Ainsi, contrairement aux phénomènes de seiches ou de la barre thermique par exemple, le phénomène de la glace en milieu lacustre "est ignoré" de personne et de plus, a été étudié depuis longtemps.

Nous avons vu au début du présent chapitre les différentes étapes de la prise et de la fonte de la glace sur les lacs. Nous porterons notre attention maintenant sur l'application de la télédétection dans l'étude de ce phénomène.

La télédétection peut être utilisée ici dans plusieurs genres d'études, telles l'évolution du gel et du dégel sur un lac, la localisation des zones de transparence de la glace, l'identifica-

tion des types de glace, la localisation des bancs de glace, des zones de pression dans la glace (failles), etc.

Plusieurs techniques différentes peuvent être utilisées selon l'étude à réaliser. Ainsi, concernant les études de localisation, elles peuvent être envisagées à partir de plusieurs types d'appareils. En effet, à cause du facteur visuel qui accompagne la glace et la neige, des photographies prises par avion à haute altitude ou encore des images de satellites (NOAA, Landsat ou Seasat) peuvent facilement servir à l'identification des zones englacées, renseignements essentiels pour les navires sillonnant ces eaux.

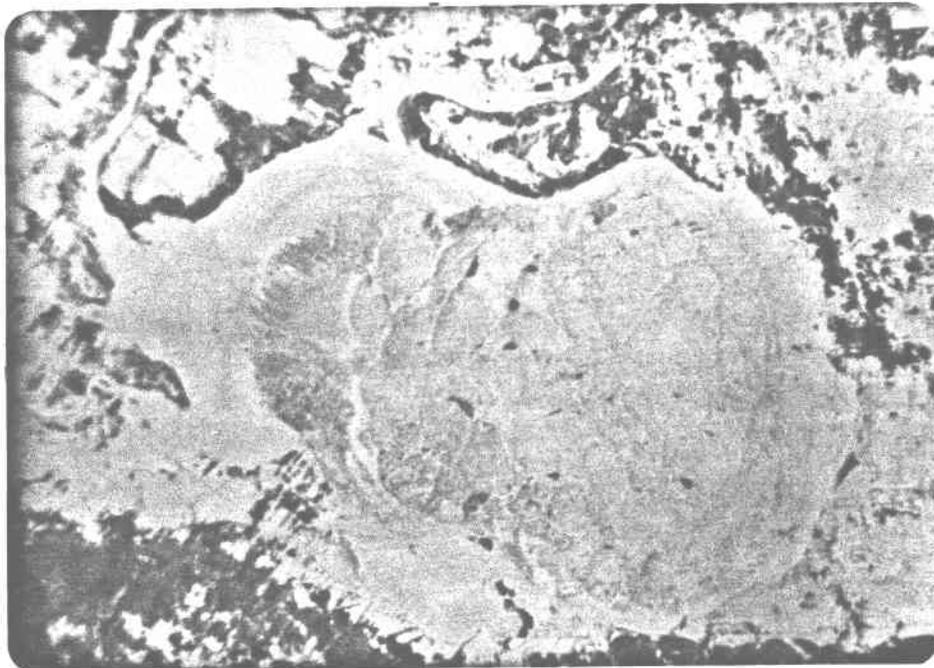
Les satellites peuvent aussi nous permettre de localiser les zones de glace transparente où, au printemps, on peut appréhender une production primaire sous la glace (toutefois, le satellite NOAA ne devrait pas être d'une grande utilité ici étant donné sa faible résolution au sol).

De même, les satellites nous permettent de localiser les zones de failles et de stries dans la glace, ce qui révèle les zones de pression dues à la thermodynamique ou à une baisse du niveau du lac. Les figures 35, 37 et 38 nous laissent bien voir les phénomènes; à remarquer sur la figure 38 la façon dont la glace se brise sur le lac Saint-Jean et la pression qui est exercée sur la rive Est, ce qui est susceptible de provoquer l'érosion des berges du lac.

En ce qui concerne la localisation des bancs de glace se déplaçant sur l'eau, elle peut être faite facilement à partir des données transmises par les satellites (Landsat et Seasat)*. Toutefois, la fréquence de prise de ces appareils risque d'être trop faible pour que l'on puisse suivre avec précision les déplacements de ces bancs de glace. Il faudrait donc prévoir une couverture par avion à haute altitude pour compléter l'information.

* Quoique la fréquence de prise du satellite NOAA soit adéquate, sa résolution au sol semble très faible pour ce genre d'étude.

FIGURE 35
LAC SAINT-JEAN À LA FIN DE L'HIVER.



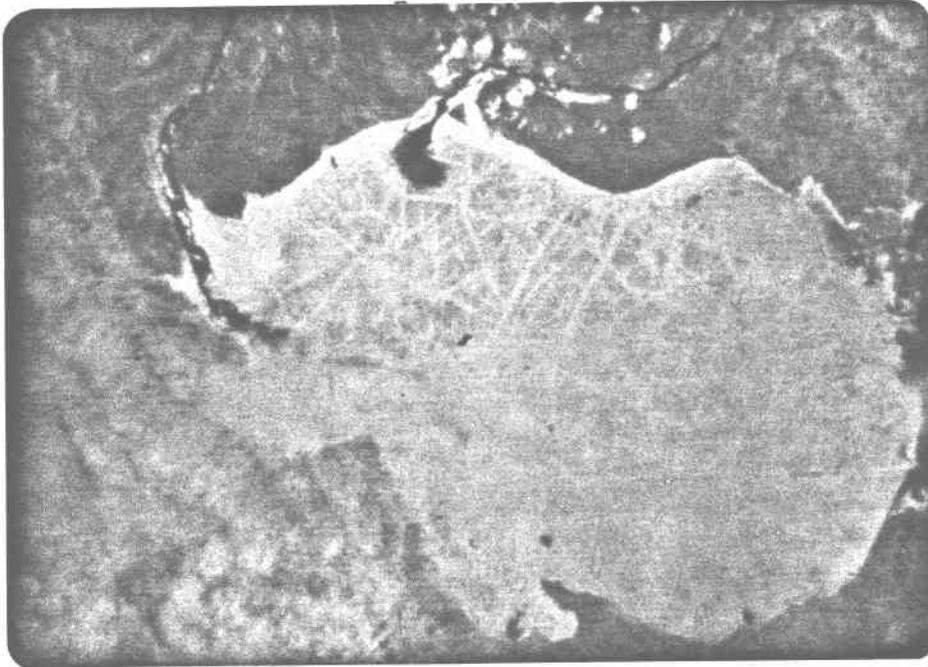
Le lac est couvert de glace. On remarque les fractures et les crêtes de pression dans la glace; agrandissement d'image (satellite Landsat). Source: H.G. Jones, INRS-Eau; communication personnelle.

FIGURE 36
DÉBUT DU DÉGEL AU LAC SAINT-JEAN.



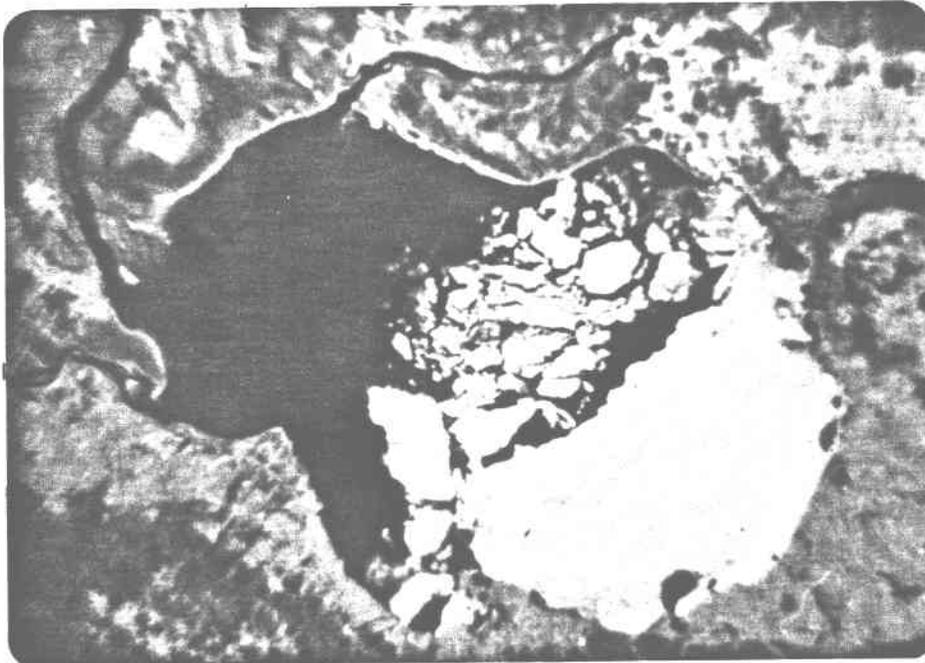
Les rivières les plus importantes sont libres de glace et leurs eaux commencent à briser celle du lac St-Jean; agrandissement d'image (satellite Landsat). Source H.G. Jones, INRS-Eau; communication personnelle.

FIGURE 37
FRACTURES DANS LA GLACE AU DÉBUT DU DÉGEL AU LAC SAINT-JEAN.



A remarquer en ce début de dégel les nombreuses fractures et crêtes de pression dans la glace; agrandissement d'image (satellite Landsat). Source: H.G. Jones, INRS-Eau; communication personnelle.

FIGURE 38
FIN DU DÉGEL AU LAC SAINT-JEAN.



La zone du lac où se déversent les trois grosses rivières (Péribonca, Mistassini et Chamouchouane) est libérée de la glace bien avant les parties centrales et de l'exutoire. La Grande Décharge par contre est libre de glace; agrandissement d'image (satellite Landsat). Source: H.G. Jones, INRS-Eau; communication personnelle.

Il en va de même pour les études de gel et de dégel des lacs*. Comme on peut le constater aux figures 35 à 38 inclusivement, les satellites peuvent nous apporter des renseignements intéressants sur les phénomènes évolutifs. Toutefois, ces renseignements étant statiques par rapport aux phénomènes, des données supplémentaires seraient nécessaires pour une étude complète.

Ainsi par exemple, il serait intéressant de pouvoir suivre l'évolution des zones de dégel à la sortie des rivières dans la couche de glace qui recouvre le lac. Cela permettrait de connaître par la forme des cônes, la direction des courants des affluents sans l'effet du vent.

Comme dans le cas précédent, l'utilisation de l'avion semble être encore ici la meilleure solution. Des senseurs d'infrarouge thermique peuvent être utilisés en plus des senseurs d'ondes visibles, ce qui est un grand avantage lors d'études de ce genre car les différences de température peuvent apporter des détails n'apparaissant pas sur des photographies ordinaires comme par exemple un début de fonte de la glace en surface.

Notons toutefois que si des images des satellites Landsat sont utilisées, il est possible de détecter cet état de chose en comparant les images des bandes 4 et 7. Sur l'image prise dans la bande 4, la glace apparaîtra blanche alors qu'elle apparaîtra noire sur celle prise dans la bande 7 (Barnes, Bowley, Chang et Willand; 1974).

Dans le cas d'études visant l'identification par télédétection des différents types de glace (épaisseur, âge, etc.), le moyen le plus efficace actuellement est sans contredit l'utilisation à basse altitude (avion) de senseurs actifs. Généralement,

* Quoique la fréquence de prise du satellite NOAA soit adéquate, sa résolution au sol semble très faible pour ce genre d'étude.

les longueurs d'ondes employées se situent dans les micro-ondes, celles-ci permettant une bonne pénétration de la glace. Les bandes les plus régulièrement utilisées sont les bandes X (longueur d'onde de 2,25 cm), C (longueur d'onde de 5,30 cm) et L (longueur d'onde de 25,00 cm), cette dernière permettant une pénétration encore plus profonde.

Ainsi, avec ce genre d'appareils, Parashar, Moore et Biggs (1974) ont identifié les glaces de 0 à 360 cm et plus. Ils les ont également classées selon leur âge.

De même, Rose et Vickers (1972) ont réussi à évaluer l'épaisseur de la glace en utilisant un radar à ondes courtes à partir d'un hélicoptère.

Il est à prévoir que ce genre d'étude prendra de l'ampleur au cours des prochaines années car il permet d'obtenir rapidement de nombreuses et importantes données sur la glace et son évolution.

CHAPITRE III

APPLICATION AU NORD QUEBECOIS

L'étude des lacs au Québec a pratiquement toujours été axée, sauf depuis quelques années, sur les lacs situés près de la plaine du Saint-Laurent. Cela est facilement compréhensible car les lacs du sud du Québec étaient beaucoup plus accessibles vu leur proximité des zones habitées. De plus, plusieurs de ces lacs avaient subi une dégradation de leur qualité à cause des activités humaines et commençaient à devenir problématiques. Il est normal par conséquent que l'on se soit intéressé à eux en premier lieu.

Toutefois, principalement à cause du développement hydro-électrique, on a commencé à s'intéresser aux lacs du nord et aussi, il va sans dire, aux réservoirs créés par ces développements. Comme les systèmes lacustres nordiques sont généralement grands et encore relativement peu connus, la télédétection nous apparaît comme un outil qui pourrait être très utile pour les études limnologiques dans ces régions.

Toutefois, les lacs du nord québécois ont un caractère particulier qu'il est important de connaître avant de débiter toute étude limnologique par télédétection. En effet, à cause du climat, de la géologie, du couvert forestier et de la faible occupation humaine, ces lacs ont en majorité une eau très claire*. En effet, les

* Cette remarque vise les systèmes lacustres situés au nord du 52ième parallèle (approximativement). Au sud de cette zone, les conditions ne sont plus exactement les mêmes et, par conséquent, la physico-chimie de l'eau est différente. Il est important de mentionner ici que les grands systèmes lacustres et les grands réservoirs hydro-électrique (actuels et à venir) sont situés en majorité au nord de la zone dont il a été question auparavant.

solides dissous et les solides en suspension y sont en concentration très faible. La température des eaux se maintient toujours à un niveau relativement bas et, comme les éléments nutritifs sont en concentration très faible, la production y est par le fait même faible.

En dernier lieu, mentionnons que ces lacs, étant donné le relief, sont souvent grands mais peu profonds. On peut y trouver une partie très profonde mais il est très fréquent de rencontrer des berges longues et peu profondes.

Il est important de remarquer ici que les particularités limnologiques de ces lacs touchent directement les principaux paramètres qui nous servent pour l'étude par télédétection des phénomènes limnologiques. Nous tâcherons donc de voir si l'étude des phénomènes limnologiques, telle que décrite (d'une façon théorique) dans les chapitres précédents, est réalisable de façon pratique à partir des grands systèmes lacustres du nord québécois.

III.1 Les paramètres turbidité et couleur de l'eau

La turbidité, comme nous l'avons vu, est causée par les solides en suspension dans l'eau tandis que la couleur de l'eau (couleur vraie*) est attribuable aux solides dissous et aux composés organiques dissous (par exemple les acides humiques) dans l'eau.

* La couleur apparente peut être influencée légèrement par les solides en suspension car, contrairement à la couleur vraie, il n'y a pas de centrifugation avant l'analyse de l'échantillon.

Nous avons réuni ces deux paramètres dans cette section car, au niveau de la télédétection, ils s'influencent. En effet, lorsque l'indice de couleur est élevé (solides dissous en forte concentration), les solides en suspension deviennent plus difficilement identifiables. Ainsi, Bennett et Sydor (1974) ont pu identifier sur le lac Supérieur, à partir de données fournies par les satellites Landsat et de données de contrôle prises sur le terrain, des concentrations de solides en suspension s'échelonnant de 1 à 14 mg/l pour une eau moyennement colorée (zone de l'embouchure de la rivière Saint-Louis; solides dissous de 30 à 50 mg/l environ) mais n'ont pu identifier des concentrations de solides en suspension inférieures à 8 mg/l dans une eau très colorée (zone de la baie Duluth; solides dissous de 120 à 200 mg/l environ)*.

Le phénomène peut s'expliquer par le fait que lorsque l'eau est très colorée, il en résulte une absorption beaucoup plus rapide des ondes pénétrant dans l'eau. La réflexion diffuse est également absorbée plus fortement à l'intérieur de la masse d'eau de sorte que les ondes venant de la masse d'eau proviennent d'une profondeur beaucoup plus faible que dans le cas d'une eau claire, ce qui entraîne une diminution de la réflectance (voir tableau 4 et figure 6).

Les eaux du nord québécois (au nord du 52ième parallèle) sont généralement faiblement colorées. En effet, selon le tableau 5, une nette différence existe entre ces eaux et celles de rivières situées plus au sud. On peut donc en déduire qu'il serait facilement possible d'utiliser les sédiments en suspension comme repères pour suivre la manifestation des phénomènes limno-physiques. Toutefois, ceux-

* Les deux zones étudiées avaient à peu près les mêmes concentrations de solides en suspension, soit de 1 à 15 mg/l pour la zone de l'embouchure de la rivière Saint-Louis et de 5 à 20 mg/l (avec une moyenne de 10 mg/l) pour la zone de la baie de Duluth. Notons également que Bennett et Sydor ont obtenu de meilleurs résultats en eau claire avec la bande 5 alors qu'en eau colorée, la bande 6 s'avérait la plus intéressante.

TABLEAU 5: Indices de couleur des eaux de quelques rivières et lacs du Québec

Région	Nombre de données	Couleur moyenne (unités Hazen)
Nord du 52ième parallèle		
Rivière Arnaud	7	7
Rivière aux Feuilles	9	3
Rivière aux MÈlèzes	7	2
Rivière Caniapiscau	8	5
Rivière à la Baleine	5	5
Grande Rivière de la Baleine	7	8
Lac à l'Eau Claire	1	0
Lac Dauriat	32	2
Lac Knob	24	2
Lac Houston	17	5
Lac Malcolm	6	2
Lac Osprey	6	2
Rivière La Grande	22	23 (1)
Hauteur du 52ième parallèle		
Rivière Opinaca	2	22
Rivière Eastmain	5	14
Sud du 52ième parallèle		
Rivière Rupert	11	25 (2)
Rivière Broadback	11	56 (2)
Rivière Nottaway	9	69 (2)
Rivière Bell	4	77 (2)
Rivière Harricana	57	48
Rivière Mégiscane	7	38
Rivière Waswanipi	5	33
Rivière Péribonca	11	30
Rivière Mistassini	12	29
Rivière Mistassibi	6	40
Rivière Chamouchouane	59	30
Rivière Ouasiemsca	5	53
Lac Saint-Jean	< 100	45 (3)

Note: Couleur apparente (unités Hazen) sauf lorsque précisé.

Sources: Gouvernement du Québec

Ministère des Richesses naturelles
Direction générale des Eaux
Service des Relevés, 1975
(échantillonnage 1968-1970)

- Sauf: (1) SEBJ, Communication personnelle
 (échantillonnage 1977-1978; unité:
 couleur vraie)
- (2) Evolution physico-chimique des eaux de la Radissonie:
 Secteur Nottaway - Broadback - Rupert
 (1977-1978)
 Gouvernement du Québec
 Ministère des Richesses naturelles
 Service Qualité des Eaux, juin 1979
- (3) Bassin hydrographique du Saguenay - Lac Saint-Jean
 Etude de la qualité du milieu aquatique du lac Saint-
 Jean et de la rivière Saguenay
 Annexe 1
 Gouvernement du Québec (SPEQ) et INRS-Eau, 1978
 (échantillonnage 1977; unité: Pt/Co)

ci semblent généralement en concentration très faible (Jones, communication personnelle et tableau 6*) de sorte qu'il y a de bonnes chances que la réflectance soit très faible et qu'il ne soit pas possible d'observer quoi que ce soit. Il est probable cependant, qu'en certaines occasions comme lors des crues, que les sédiments en suspension soient en concentration assez forte pour permettre l'étude des phénomènes limno-physiques.

Les eaux situées plus au sud par contre démontrent des unités de turbidité plus élevées (voir tableau 6), donc des concentrations de solides en suspension plus fortes. Ainsi, les rivières Nottaway, Broadback et Rupert affichent des unités de turbidité s'échelonnant en moyenne entre 1 et 11 unités Jackson. De même, le lac Saint-Jean a des valeurs de turbidité de 3 à 4 unités Jackson environ.

Les solides en suspension devraient donc devenir plus facilement identifiables et par conséquent plus utiles pour les études limno-physiques. Toutefois, il est important de remarquer que la couleur de ces eaux augmente beaucoup (voir tableau 5)**. Il est donc possible que cette augmentation de la couleur des eaux vienne masquer les solides en suspension, c'est-à-dire en diminuer la réflectance et provoquer non pas une impossibilité totale de perception des phénomènes mais plutôt une perte des détails.

* Les données de turbidité étant faibles, on peut en déduire que les solides en suspension sont en concentration faible. Les données concernant les solides en suspension n'étaient pas disponibles.

** Cette augmentation de couleur semble due principalement au changement de couvert forestier. En effet, selon l'Atlas canadien Larousse, la forêt boréale de conifères s'arrête aux environs du 52ième parallèle. Ce changement est probablement dû au climat, car la géologie, elle, ne change pas.

TABLEAU 6: Turbidité rencontrée dans les eaux de certains plans d'eau du Québec

Plan d'eau	Nombre de données	Turbidité moyenne (unités Jackson)	
Rivière La Grande	22	2	(1)
Rivière Rupert	48	1	(2)
Rivière Broadback	50	5	(2)
Rivière Nottaway	35	11	(2)
Rivière Bell	18	8	(2)
Lac Saint-Jean	< 100	4	(3)

- Sources: (1) SEBJ, Communication personnelle
(échantillonnage 1977-1978;
unité: couleur vraie)
- (2) Evolution physico-chimique des eaux de la Radissonie:
Secteur Nottaway - Broadback - Rupert
(1977-1978)
Gouvernement du Québec
Ministère des Richesses naturelles
Service Qualité des Eaux, juin 1979
- (3) Bassin hydrographique du Saguenay - Lac Saint-Jean
Etude de la qualité du milieu aquatique du lac Saint-
Jean et de la Rivière Saguenay
Annexe 1
Gouvernement du Québec (SPEQ) et INRS-Eau, 1978
(échantillonnage 1977; unité: Pt/Co)

Pour terminer, mentionnons que, selon la couleur des eaux retrouvée dans cette zone (tableau 5) et selon les pourcentages d'absorption retrouvés pour des eaux ayant approximativement la même couleur (tableau 4), les longueurs d'onde situées entre 600 et 700 nanomètres devraient donner les meilleurs résultats. Pour des eaux plus colorées, les longueurs d'onde situées entre 700 et 800 nanomètres devraient être plus efficaces.

III.2 Le paramètre température

La température de l'eau est probablement le paramètre le plus intéressant pour l'étude des phénomènes limno-physiques sur les lacs du nord québécois. En effet, les senseurs à infrarouge permettent d'obtenir les lectures de température au degré près (Harper, 1976) de sorte qu'il est possible d'obtenir des couvertures très précises des températures de surface des lacs et ce, quelle que soit la qualité de l'eau, ce qui, comme nous l'avons vu au deuxième chapitre, devient très utile pour l'étude des phénomènes limno-physiques.

Toutefois, l'étude de certains phénomènes peut devenir plus difficile à cause de la longueur très courte de la saison de travail. En effet, le dégel se manifeste beaucoup plus tardivement au nord qu'au sud si bien qu'à la fin mai, les températures de surface des lacs sont encore très basses. Ainsi, les lacs Béréziuk, Coutaceau et Toto (tous au-delà du 53ième parallèle) avaient des températures de surface respectivement de 3,2 et 4⁰ c le 22 mai 1978 (SEBJ, communication personnelle). A la fin juillet, la température de surface de ces trois lacs était d'environ 16⁰ c et à la fin septembre, elle était redescendue à environ 8⁰ c.

Le problème qui peut se poser lorsque l'eau est par exemple à 3 ou 4⁰c est le suivant: supposons que sous l'effet du vent, l'eau en profondeur remonte à la surface. Il sera difficile de bien visualiser le phénomène par l'étude des températures de surface car l'écart entre la température de l'eau la plus froide et celle de l'eau la plus chaude ne sera que de quelques degrés*. Il s'ensuivra donc une perte de détails.

Par contre, si l'eau des lacs a eu le temps de se réchauffer, il sera possible de profiter d'écarts de température plus grands (à la condition que le lac étudié soit assez profond pour que la masse d'eau ne soit pas à une température homogène) et par conséquent de mieux visualiser le phénomène en question.

Il est donc important de prévoir, pour l'étude de ce type de phénomène, des échantillons aériens de préférence en juillet et en août.

III.3 Le paramètre chlorophylle

L'utilisation du paramètre chlorophylle comme marqueur pour l'étude des phénomènes limno-physiques dépend de la concentration rencontrée dans le milieu. Selon Arvesen, Weaver et Millard (1971), il semble possible (en survol par avion) d'évaluer d'une façon assez précise les concentrations de chlorophylle à partir de 0,03 µg/l jusqu'au-delà de 10 µg/l. Toutefois, la plus grande précision semble survenir lorsque les concentrations sont au-delà de 5 µg/l; de même, lorsqu'elles sont en dessous de 0,6 µg/l, les résultats semblent beaucoup moins précis.

* Il est évident que si la température de l'eau en surface est de 2⁰c, la température la plus chaude que l'on rencontrera en profondeur sera de 4⁰c (voir chapitre 2).

Dans la région du nord québécois, les concentrations de chlorophylle "a" se situent en général autour de 1,0 - 1,5 $\mu\text{g}/\text{l}$ en été (fin juin - début septembre, région La Grande) avec certains pics pouvant atteindre 3 $\mu\text{g}/\text{l}$ environ (SEBJ, communication personnelle). Pour fins de comparaison, le lac Saint-Jean révèle des concentrations s'échelonnant pour la même période de 0,5 - 0,7 $\mu\text{g}/\text{l}$ à 1,5 - 2,0 $\mu\text{g}/\text{l}$ avec des pics en certains endroits de 5 $\mu\text{g}/\text{l}$ (Bisson, Couture et Visser, 1978).

Le paramètre chlorophylle semble donc devoir être un paramètre intéressant à utiliser pour l'étude des phénomènes limno-physiques des lacs du nord québécois. Il est important de mentionner toutefois que lorsque les concentrations seront en-deçà de 0,6 $\mu\text{g}/\text{l}$, il pourra y avoir, comme pour certains autres paramètres, perte des détails du phénomène observé à cause des limites de la technique.

III.4 Le paramètre superficie

Comme nous l'avons vu dans le chapitre II, la superficie des lacs ou plus précisément les berges longues, à pente très douce et par conséquent peu profondes peuvent être très utiles pour l'étude de certains phénomènes, notamment les seiches.

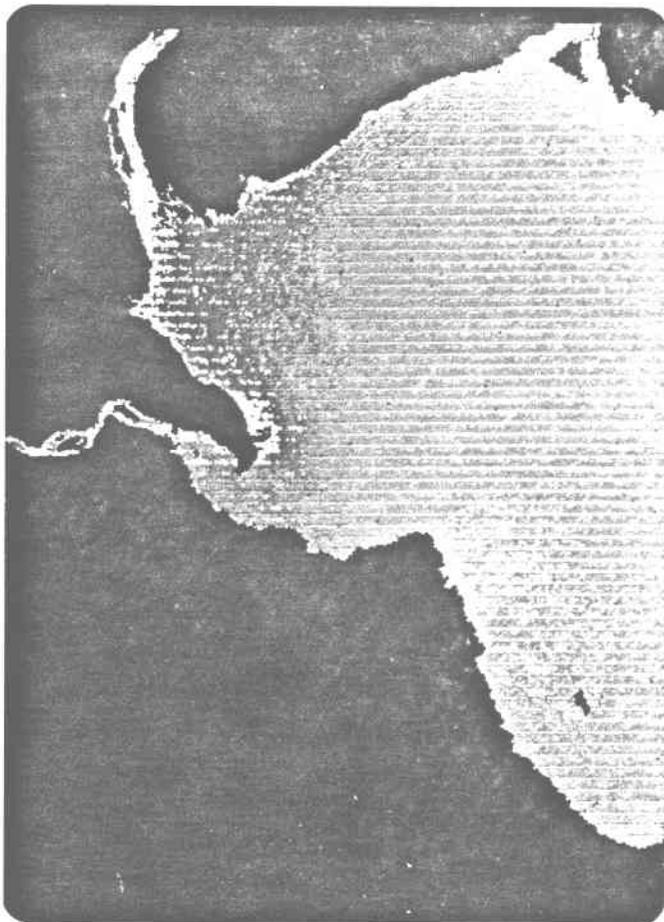
Etant donné le relief relativement plat du nord québécois, les berges des lacs (les lacs de grande superficie surtout) se prêteraient bien à l'étude de ces phénomènes limno-physiques.

Il y a toutefois une manifestation qu'il est important de mentionner, soit ce que nous avons appelé le "phénomène de fond". Celui-ci peut survenir lorsque l'eau est très claire (grande transparence) et que la profondeur est faible. Il peut arriver à ce moment que la réflectance enregistrée par le récepteur ne provienne pas de l'eau mais plutôt des sédiments. En effet, étant donné sa transparence et sa faible profondeur, l'eau n'absorbe à peu près rien. Il s'ensuit

donc que, si le lac étudié n'est pas très connu, il y a risque de mauvaise interprétation des résultats.

La figure 39 illustre bien ce phénomène. Il s'agit d'une image produite par ordinateur à partir de données recueillies par le satellite Landsat II (bande 4). On remarque à la sortie de la rivière Mistassini la teinte bleutée des eaux près du rivage comparativement à la teinte orangée des eaux du large. Cette image pourrait laisser croire que les eaux du rivage sont d'une qualité tout à fait différente de celles du lac. Or, il n'en est rien. La différence provient tout simplement du fait que dans un cas, la réflectance provient de la masse d'eau (teinte orangée) et dans l'autre cas, des sédiments (teinte bleutée) car dans cette partie du lac, la profondeur est d'environ 1 à 2 pieds et l'eau y est très claire (visite personnelle, été 1976).

FIGURE 39
PHÉNOMÈNE DE FOND À L'EMBOUCHURE DE LA RIVIÈRE MISTASSINI
DANS LE LAC SAINT-JEAN.



L'eau de la zone bleutée n'est pas de qualité (solides en suspension) différente de celle du lac; la différence de teinte est due aux sédiments au fond du lac (eau peu profonde mais claire); traitement d'une image (satellite Landsat) par "équidensitométrie". Source H.G. Jones, INRS-Eau; communication personnelle.

CHAPITRE IV

LES DONNEES DE CONTROLE

Comme on peut le constater à la lecture des chapitres précédents, l'étude des phénomènes limno-physiques par télédétection demande une interprétation de plusieurs types de données, souvent très différentes les unes des autres et à partir desquelles il peut devenir difficile de bien cerner la réalité.

Rappelons entre autres ici le cas de la photo 13 où il est possible de visualiser le phénomène de stratification horizontale sans toutefois pouvoir l'approfondir.

Mentionnons également le cas des eaux du nord du Québec (chapitre III) qui, à cause de leur composition chimique particulière, pourraient causer certains problèmes de réflectance.

Dans le but de vouloir diminuer le plus possible les chances d'erreur d'interprétation, il devient essentiel que les études de phénomènes limno-physiques soient accompagnées de données de contrôle prises sur le terrain d'étude. Cela permet de valider les renseignements obtenus par télédétection et de tirer de meilleurs résultats de l'étude.

Dans la majorité des cas et cela, surtout à cause du côté évolutif des phénomènes étudiés, le chercheur doit faire en sorte que les données de contrôle soient prises simultanément à celles prises

par télédétection sans quoi les interprétations réalisées pourraient ne pas être conformes à la réalité.

Dans le même ordre d'idées, mentionnons que les résultats d'études limnologiques telles l'étude de la qualité physico-chimique des eaux d'un lac ou encore l'étude de sa productivité primaire peuvent être influencés par les phénomènes limno-physiques.

En effet, comme nous l'avons vu, les phénomènes comme par exemple la barre thermique ou la circulation de Langmuir peuvent influencer la distribution des micro-organismes à la surface d'un lac de sorte que, si un échantillonnage est réalisé sans en tenir compte, il y a risque que les résultats ne représentent pas la réalité.

Les phénomènes limno-physiques deviennent donc, à leur tour, des données de contrôle par rapport à ce type d'études, données de contrôle que les chercheurs devraient utiliser lors des échantillonnages.

CONCLUSION

L'étude des phénomènes limno-physiques par télédétection demande comme nous l'avons vu une connaissance de base de la télédétection et des phénomènes eux-mêmes ainsi qu'une connaissance du milieu dans lequel ils se produisent.

L'utilisateur doit, s'il veut s'assurer le meilleur rendement possible de cette technique, en connaître les principes de fonctionnement, les principaux appareils et le type de données fournies. Il doit de même connaître la façon dont se produisent les phénomènes, leur fréquence, la durée de la manifestation et les caractéristiques de l'eau et du milieu où ils se produisent de façon à ce qu'il puisse harmoniser technique et champs d'étude.

De ce fait, il est permis de croire que l'étude des phénomènes limno-physiques dans les lacs du nord québécois au moyen de la télédétection devrait être passablement difficile en certaines occasions car, étant donné les possibilités de la technique et les caractéristiques du territoire telles qu'exposées au chapitre III, il est fort possible qu'une bonne partie des phénomènes passe complètement inaperçue, particulièrement ceux qui seraient étudiés par l'entremise des paramètres turbidité et couleur. Il devient donc très important de bien connaître le milieu avant de débiter l'étude d'un phénomène et de recueillir des données de contrôle représentatives.

Il est à espérer en terminant que des senseurs encore plus précis soient bientôt disponibles de façon à ce que ce nouvel outil qu'est la télédétection puisse être utilisé dans ces vastes régions qui sont au début de leur phase de développement.

BIBLIOGRAPHIE

1. Alföldi, T.T. (1974)
Remote sensing of turbidity phenomena in lake St-Clair
Report to the working group on abatement and control of pollution from dredging activities in the Great Lakes (Task Force # 8), Canada Centre for Remote Sensing, 28 pages.
2. Apel, J.R., Byrne, H.M., Proni, J.R., Charneil, R.L. (1975)
Observations of oceanic internal and surface waves from the Earth Resources Technology Satellite
Journal of Geophysical Research, Vol. 80, No: 6, Référence Centre canadien de télédétection No: 1009201, 17 pages.
3. Arvesen, J.C., Millard, J.P., Weaver, E.C. (1971)
Rapid assessment of water pollution by airborne measurement of chlorophyll
Ames Research Center, Nasa, Référence Centre canadien de télédétection No: 1001286, 7 pages.
4. Aubert, M., Breittmayer, J.Ph., N'Guyen, Tan (1975)
Télédétection par avion et satellite dans l'étude des pollutions marines
Revue Internationale Océanographique de la Méditerranée, Tomes XXXIX-XXXX, 20 pages.
5. Barnes, J.C., Bowley, C.T., Chang, D.T., Willand, J.H. (1974)
Application of satellite visible and infrared data to mapping sea ice
Advances Concepts and Techniques in the Study of Snow and Ice Resources, National Academy of Sciences, Washington, D.C., 10 pages.
6. Bennett, P., Sydor, M. (1974)
Use of Erts in measurements of water quality in lake Superior and the Duluth Superior Harbor
University of Minnesota, Duluth, Minnesota, Référence Centre canadien de télédétection No: 1005482, 8 pages.

7. Biggs, A.W., Moore, R.K., Parashar, S.K. (1974)
Use of radar techniques for sea ice mapping
Advanced Concepts and Techniques in the Study of Snow and Ice Resources, National Academy of Sciences, Washington, D.C. 10 pages.
8. Bisson, M., Couture, P., Visser, S.A. (1978)
Etude de la qualité du milieu aquatique du lac Saint-Jean et de la rivière Saguenay
Services de Protection de l'Environnement du Québec et Institut National de la Recherche Scientifique (INRS-Eau), Université du Québec, 163 pages.
9. Bisson, M., Couture, P., Visser, S.A. (1978)
Etude de la qualité du milieu aquatique du lac Saint-Jean et de la rivière Saguenay
Services de Protection de l'Environnement du Québec et Institut National de la Recherche Scientifique (INRS-Eau), Université du Québec, 64 pages.
10. Bobee, B., Cluis, D., Tessier, A., Robitaille, R., Paré, C. (1976)
Analyse des données de la qualité de l'eau 1974-1975 du réseau de la Baie de James
Université du Québec, Institut National de la Recherche Scientifique (INRS-Eau) et ministère des Richesses naturelles du Québec, 123 pages.
11. Brouillette, B., Saint-Yves, M., Reynaud-Dulaurier, G. (1971)
Atlas Larousse Canadien
Les Editions françaises Inc., 128 pages.
12. Bruton, J.E., Bukata, R.P., Haras, W.S. (1975)
The application of Erts-1 digital data to water transport phenomena in the Point Pelee - Rondeau area
Association internationale de limnologie théorique et appliquée, Vol. 19, Stuttgart, Allemagne, 11 pages.
13. Bryan, M.L., Larson, R.W. (1975)
The study of fresh-water lake ice using multiplexed imaging radar
Journal of Glaciology, Vol. 14, No: 72, Référence Centre canadien de télédétection No: 1001859, 13 pages.

14. Campbell, K.J., Orange, A.S. (1974)
Continous sea and fresh water ice thickness profiling using an impulse radar system
Advanced Concepts and Techniques in the Study of Snow and Ice Resources, National Academy of Sciences, Washington, D.C., 11 pages.
15. Carter, R.
Plankton surveillance by remote sensing
Référence Centre canadien de télédétection No: 1001352, 14 pages.
16. Centre canadien de télédétection
Information Bulletin
Airborne operation, Energie, Mines et Ressources du Canada, 89 pages.
17. Centre canadien de télédétection (1979)
La télédétection au Canada
Ministère de l'Energie, des Mines et des Ressources du Canada.
18. Clough, D.J., McQuillan, A.K. (1973)
Benefits of remote sensing of sea ice
Centre canadien de télédétection, Energie, Mines et Ressources Canada, Référence Centre canadien de télédétection No: 1005295, 30 pages.
19. Csanady, G.T., Berretta, M., Bergs, A., Hale, A.M., Sullivan, P.J. (1964)
Hydrodynamic studies on Lake Huron at Baie du Dore
Summer 1964, Water Resources Institute, University of Waterloo and Great Lakes Institute, University of Toronto, 146 pages.
20. Faller, A.J. (1969)
The generation of Langmuir circulations by the eddy pressure of surface waves
Journal of Limnology and Oceanography, no: 14, 10 pages.
21. Forêt Conservation (1976)
Special sur la télédétection
Revue Forêt-Conservation, volume 42, no: 47, 39 pages.

22. Gedney, R.T., Heighway, J.E., Vickers, R.S. (1974)
Airborne profiling of ice thickness using a short pulse radar
Advanced Concepts and Techniques in the Study of Snow and Ice Resources, National Academy of Sciences, Washington, D.C., 10 pages.
23. Goddard Space Flight Center (1971)
Data Users Handbook
Nasa Earth Resources Technology Satellite.
24. Gordon, K.S., Miller, J.R., Kamykowski, D. (1976)
Air-borne water-colour measurements off the Nova Scotia coast
Canadian Journal of Remote Sensing, Volume 2, No: 1, Canadian Aeronautics and Space Institute, Ottawa, 6 pages.
25. Goulet, M., Paré, C. (1979)
Evolution physico-chimique des eaux de Radissonie: Secteur Nottaway-Broadback-Rupert (1977-1978)
Ministère des Richesses naturelles du Québec, 215 pages.
26. Graf & Moritimer (1979)
Hydro-dynamics of lakes
Ed. Asevier, Amsterdam, Oxford, New-York.
27. Graham, C.W., Lawrence, G.R. (1975)
Remote sensing applied to algal problems in lakes
Ministry of Natural Resources, Ontario Centre for Remote sensing, Toronto. Third Canadian Symposium on Remote sensing, Edmonton, Alberta, 8 pages.
28. Grisel, H., Bobee, B. (1974)
Analyse des données de qualité du réseau rivière Baie de James (1968-1973)
Ministère des Richesses naturelles du Québec.
29. Harper, D, (1976)
Eye in the sky
Introduction to remote sensing, Multiscience Publications Ltd, 164 pages.
30. Hart, J.L., Pritchard, J.A., Strong, A.E., Stumpf, H.G. (1974)
Extensive summer upwelling on lake Michigan during 1973 observed by NOAA-2 and ERTS-1 satellites
NOAA, Référence Centre canadien de télédétection No: 1005929, 10 pages.

31. Heitner, C., Jones, H.G. (1973)
Optical measurement of absorption and scattering properties of wood using the Kubelka-Munk equations
Pulp and Paper Research Institute of Canada, Pulp & Paper magazine of Canada, 74, No: 5, 7 pages.
32. Henein, J.C., Macdowall, J. (1974)
La télédétection des ressources terrestres
Tiré à part de la revue l'Ingénieur, No: 300, 60e année, 7 pages.
33. Henson, E.B., Lind, A.O., Potash, M. (1975)
Limnological utilization of Erts-1 satellite imagery
Association internationale de limnologie théorique et appliquée, Vol. 49, Stuttgart, Allemagne, 10 pages.
34. Hom, L.W.
Aerial detection of algal at Clear Lake and Lake Tahoe
Référence Centre canadien de télédétection No: 1001350, 15 pages.
35. Innes, R.B., Larrowe, B.T., Porcello, L.J., Rendleman, R.A.
Lake ice surveillance via airborne radar: some experimental results
University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, Référence Centre canadien de télédétection No: 1000873, 10 pages.
36. Jain, S.C., Miller, J.R. (1976)
Subsurface water parameters: optimization approach to their determination from remotely sensed water color data
Applied Optics, Vol. 15, No: 4, 5 pages.
37. Jerome, J., McNeil, W.R., Thomson, K.P.B. (1976)
The application of remote spectral measurements to water quality monitoring
Canadian Journal of Remote Sensing, Volume 2, No: 1, Canadian Aeronautics and Space Institute, Ottawa, 11 pages.
38. Jones G., Sochanska, W., Fortin, J.P., Langham, E.J. (1977)
Etude de la dynamique des eaux du lac Saint-Jean au Québec, à l'aide des satellites Landsat-1 et Landsat-2
Institut national de la recherche scientifique (INRS-EAU), Université du Québec et Pêche & Environnement Canada, 8 pages.
39. Langham, E.J., Rochon, G. (1975)
Sur la transformation des radiances en réflectances pour l'étude de la qualité de l'eau
Third Canadian Symposium on Remote Sensing, Edmonton, Alberta, 11 pages.

40. Langham, E.J., Rochon, G. (1975)
Téledétection par satellite dans l'évaluation de la qualité de l'eau
Association internationale de limnologie théorique et appliquée,
Vol. 19, Stuttgart, Allemagne, Référence Centre canadien de télé-
détection No: 1006844, 8 pages.
41. McGinnis, D.F., Wiesnet, D.R. (1973)
Hydrologic applications of the NOAA-2 very high resolution radio-
meter
Remote sensing and water resources management, American Water Resour-
ces Association, Référence Centre canadien de téledétection No:
1004054, 12 pages.
42. McHenry, J.R., Ritchie, J.C., Schifre, F.R. (1976)
Remote sensing of suspended sediments in surface waters
U.S. Department of Agriculture, Photogrammetric Engineering and
Remote Sensing, Vol. 42, No: 12, 7 pages.
43. McLeish, W. (1968)
On the mechanisms of wind-slick generation
Deep-Sea Research, Vol. 15, Pergamon Press (G.B.), 9 pages.
44. McNeil, W.R., Thomson, K.P.B.
Remote measurement of water colour and its application to water
quality surveillance
Référence Centre canadien de téledétection No: 1005485, 30 pages.
45. Mortimer, C.H. (1974)
Lake hydrodynamics
Association internationale de limnologie théorique et appliquée, Vol.
20, Stuttgart, Allemagne, Contribution No: 109, Center for Great
Lakes Studies, University of Wisconsin, Milwaukee, 74 pages.
46. Mealor, W.T., Pinson, J.W., Steele, M.L., Wertz, D.L. (1976)
Correlation between multispectral photography and near-surface turbi-
dities
University of Southern Mississippi, Hattiesburg, MS, Photogrammetric
Engineering and Remote Sensing, Vol. 42, No: 5, 7 pages.
47. Munday, J.C. Jr (1973)
Lake Ontario water mass delineation from Erts-1
University of Toronto, Référence Centre canadien de téledétection No:
1005054, 14 pages.

48. Munday, J.C. Jr (1974)
Water quality of lakes of Southern Ontario from Erts-1
University of Toronto, Second Canadian Symposium on Remote Sensing,
University of Guelph, Guelph, Ontario, 9 pages.
49. Piech, K.R., Walker, J.E. (1971)
Aerial color analyses of water quality
Journal of the Surveying and Mapping Division, Proceedings of the
American Society of Civil Engineers, 13 pages.
50. Pinel-Alloul, B. (1978)
Ecologie des eaux douces
Notes de cours, Université de Montréal.
51. Pluhowski, E.J.
Remote sensing of turbidity plumes in lake Ontario
Référence Centre canadien de télédétection No: 1003074, 10 pages.
52. Polcyn, F.C., Wezernak, C.T. (1974)
Eutrophication assessment using remote sensing techniques
Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, Michigan,
Référence Centre canadien de télédétection No: 1003667, 11 pages.
53. Raquet, C.A., Schertler, R.J., Svehla, R.A. (1974)
Application of thermal imagery to the development of a Great Lakes
ice information system
Advanced Concepts and Techniques in the Study of Snow and Ice Re-
sources, National Academy of Sciences, Washington, D.C., Référence
Centre canadien de télédétection No: 1003377, 10 pages.
54. Rebel, D.L., Wagner, T.W. (1975)
An Erts-1 investigation for lake Ontario and its basin (Final Report)
Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, Michigan,
96 pages.
55. Régie des eaux du Québec et Commission des ressources en eau de
l'Ontario (1971)
Bassin de la rivière Outaouais, contrôle de la qualité de l'eau de
la rivière Outaouais
Gouvernement du Québec et de l'Ontario, Volume 1, 126 pages.

56. Rochon, G. (1975)
Etude méthodologique de l'évolution et de la classification des lacs par satellite
Centre de recherches sur l'eau (Centreau), Université Laval, 90 pages.
57. Rogers, R.H., Smith, V.E. (1973)
Utilization of Erts-1 data to monitor and classify eutrophication of inland lakes
Interim Report for Period February 1973-July 1973, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, 118 pages.
58. Rose, G.G., Vickers, R.S. (1972)
High resolution measurements of snowpack stratigraphy using a Short Pulse Radar
8th International Symposium on remote sensing of environment, Vol. 1, University of Michigan.
59. Sakata, T., Shimoda, H., Suzuki, T., Tanaka, K. (1974)
Remote sensing investigation on lake Biwa
Référence Centre canadien de télédétection No: 1009248, 10 pages.
60. Service de la Cartographie (1976)
La télédétection au Québec, Numéro 1
Ministère des Terres et Forêts du Québec, 7 pages.
61. Service de la Cartographie (1976)
La télédétection au Québec, Numéro 2
Ministère des Terres et Forêts du Québec, 8 pages.
62. Service de la Cartographie (1977)
La télédétection au Québec, Numéro 3
Ministère des Terres et Forêts du Québec, 12 pages.
63. Service de la Cartographie (1978)
La télédétection au Québec, Numéro 9
Ministère des Terres et Forêts du Québec, 5 pages.
64. Service de la Cartographie (1978)
La télédétection au Québec, Numéro 12
Ministère des Terres et Forêts du Québec, 7 pages.
65. Service de la Cartographie (1979)
La télédétection au Québec, Numéro 14
Ministère des Terres et Forêts du Québec, 8 pages.

66. Service de la Cartographie (1980)
La télédétection au Québec, Numéro 17
Ministère des Terres et Forêts du Québec, 7 pages.
67. Strong, A.E. (1974)
Remote sensing of algal blooms by aircraft and satellite in Lake Erie and Utak Lake
Remote Sensing of Environment, 9 pages.
68. Svensson, H.
Break up of lake ice observed in ERTS-1 images from South-Western Sweden
Experiences of ERTS-1 imagery in geographical studies, Référence Centre canadien de télédétection No: 1008124, 8 pages.
69. Thoreson, B.D. (1975)
Remote sensing of water quality in Prairie Lakes
South Dakota State University, 46 pages.
70. Tomiyasu, K. (1974)
Remote sensing of the earth by microwaves
Proceedings of the IEEE, Vol. 62, No: 1, 7 pages.
71. Wetzel, R.G. (1975)
Limnology
W.B. Saunders Company, 743 pages.
72. Wezernak, C.T. (1973)
The use of remote sensing in limnological studies
Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, Michigan, Référence Centre Canadien de télédétection No: 1005032, 18 pages.
73. Whiting, J. (1973)
Evaluation and interpretation of ERTS imagery for Big Quill Lake
Saskatchewan Research Council, 31 pages.
74. Wiesnet, D.R. (1974)
The role of satellites in snow and ice measurements
Advanced Concepts and Techniques in the Study of Snow and Ice Resources, National Academy of Sciences, Washington, D.C., 10 pages.