Environnement A Environmenta 2 Canada

La mesure directe des paramètres optiques au service de l'estimation des indicateurs de la qualité de l'eau des lacs

R.P. Bukata, J.E. Bruton et J.H. Jeromes





ÉTUDE Nº 140, SÉRIE SCIENTIFIQUE.

DIRECTION GÉNÉRALE DES EAUX INTÉRIEURES INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHES SUR LES EAUX CENTRE CANADIEN DES EAUX INTÉRIEURES BURLINGTON (ONTARIO) 1985

(Available in English on request)

2042317e



Environnement Canada Environment Canada La mesure directe des paramètres optiques au service de l'estimation des indicateurs de la qualité de l'eau des lacs

R.P. Bukata, J.E. Bruton et J.H. Jerome



ÉTUDE Nº 140, SÉRIE SCIENTIFIQUE

DIRECTION GÉNÉRALE DES EAUX INTÉRIEURES INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHES SUR LES EAUX CENTRE CANADIEN DES EAUX INTÉRIEURES BURLINGTON (ONTARIO) 1985

(Available in English on request)

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1985 Cat. No. En 36–502/140F ISBN 0–662–93419–9

•

.

٠

.

é

.

# Table des matières

	Page
RÉSUMÉ	viii
ABSTRACT	ix
SOMMAIRE	x
THÉORIE À INTRODUCTION	1
LES SECTIONS EFFICACES OPTIQUES DU LAC ONTARIO	4
SPECTRES DU FACTEUR DE RÉFLEXION DE L'ÉCLAIREMENT ÉNERGÉTIQUE DE LA SURFACE SOUS JACENTE	5
FACTEUR DE RÉFLEXION DE L'ÉCLAIREMENT ÉNERGÉTIQUE DE LA SURFACE SOUS JACENTE À UNE SEULE LONGUEUR D'ONDE	16
RELATIONS ENTRE LES PARAMÈTRES OPTIQUES ET LES PARAMÈTRES DE LA QUALITÉ DE L'EAU	23
LA TECHNIQUE D'OPTIMISATION À PLUSIEURS VARIABLES	24
L'APPLICATION DU MODÈLE DE LA QUALITÉ DE L'EAU À L'ESTIMATION DES TENEURS EN CHLOROPHYLLE, EN MINÉRAL EN SUSPENSION ET EN CARBONE ORGANIQUE EN SOLUTION DANS LE LAC ONTARIO	.26
DIFFICULTÉS PROPRES AUX PRÉVISIONS DE LA CHLOROPHYLLE	32
RÉFÉRENCES	34
ANNEXE. Glossaire	35

## Tableau

1

ı,

1

1

1.	. Spectres des sections efficaces d'absorption et de rétrodiffusion à quinze						
	points utilisés avec les équations 6 et 7 du présent rapport	8					

iii

## Illustrations

1	I			

Page

é

4

.

Figure	1.	Organigramme des opérations retenues dans le développement de la méthodologie de l'étude optique de la qualité de l'eau de la surface	
		sous-jacente	4
Figure	2.	Les sections efficaces d'absorption calculées pour la chlorophylle a	
		non corrigée pour la présence de phéophytine pour la teneur totale en	
		minéraux en suspension (MS) et pour du carbone organique en solution	
		(DOC)	5
Figure	З.	Les sections efficaces de diffusion calculées pour la chlorophylle a	
		non corrigée pour la présence de phéophytine, et pour la teneur	
		totale en MS	5
Figure	4.	Spectres des facteurs de réflexion de l'éclairement énergétique de	
		la surface sous-jacente pour diverses teneurs en chlorophylle a dans	
		une masse d'eau dont la teneur en MS et la teneur en DOC sont fixées	_
	_	à zéro	9
Figure	5.	Spectres des facteurs de réflexion de l'éclairement énergétique de la	
		surface sous-jacente pour diverses teneurs en chlorophylle a dans une	
		masse d'eau dont la teneur en DOC est fixée à zéro et dont la	•
	~	teneur totale en MS est fixée à 0.10 g m <sup>-2</sup>	9
• Figure	6.	Spectres des facteurs de réflexion de l'éclairement énergétique de la	
		surface sous-jacente pour diverses teneurs en chlorophylle a dans une	
		masse d'eau dont la teneur en DUC est fixee à zero et la teneur	0
	-	totale en MS est fixee a U.20 g m <sup>-</sup>	9
Figure	1.	Spectres des facteurs de renexion de l'éclairement energetique de	
		la surface sous-jacente pour diverses tenedis en cinorophyne a dans die	
		an MS set fixée à 0.50 n m <sup>-3</sup>	10
Figure	8	Spectres des facteurs de réflexion de l'éclairement énergétique de la	-
riguio	0.	surface sous-jacente pour diverses teneurs en chlorophylle a dans une	
		masse d'eau dont la teneur en DOC est fixée à zéro et la teneur	
		totale en MS est fixée à 1.00 $\sigma$ m <sup>-3</sup>	10
Figure	9.	Spectres des facteurs de réflexion de l'éclairement énergétique de la	
		surface sous-jacente pour diverses teneurs en chlorophylle a dans une	
		masse d'eau dont la teneur en DOC est fixée à zéro et la teneur	
		totale en MS est fixée à 2.0 g m <sup>-3</sup>	10
Figure	10.	Spectres des facteurs de réflexion de l'éclairement énergétique de la	
0		surface sous-jacente pour diverses teneurs en chlorophylle a dans une	
		masse d'eau dont la teneur en DOC est fixée à zéro et la teneur	
		totale en MS est fixée à $^{1}$ 5.00 g m $^{-3}$	11
Figure	11.	Spectres des facteurs de réflexion de l'éclairement énergétique de la	
		surface sous-jacente pour diverses teneurs en chlorophylle a dans une	
		masse d'eau dont la teneur en DOC est fixée à zéro et la teneur totale	
		en MS est fixée à 10.0 g m <sup>-3</sup>	11
Figure	12.	Spectres des facteurs de réflexion de l'éclairement énergétique de la	
		surface sous-jacente pour diverses teneurs en chlorophylle a dans une	
		masse d'eau dont la teneur en DOC est fixée à zéro et la teneur	
		totale en MS est fixée à 2.0 g m <sup>-3</sup>	11
Figure	13.	Spectres des facteurs de réflexion de l'éclairement énergétique de la	
		surface sous-jacente pour diverses teneurs en MS dans une masse d'eau	
		renfermant une petite teneur fixe en chlorophylle a et une teneur nulle	
		en DOC	12

.

.

# Illustrations (suite)

.

i

+

1

ī

.

ī

1

	• •	Page
Figure 14,	Spectres des facteurs de réflexion de l'éclairement énergétique de la surface sous-jacente pour diverses teneurs en MS dans une masse d'eau renfermant une grande teneur fixe en chlorophylle <i>a</i> et une teneur nulle	10
Figure 15.	Spectres des facteurs de réflexion de l'éclairement énergétique de la surface sous-jacente pour diverses teneurs en DOC dans une masse d'eau dont la teneur en MS est fixée à 0.05 g m <sup>-3</sup> et la teneur en chlorophylle a set fixée à 1.00 mg m <sup>-3</sup> .	12
Figure 16.	Spectres des facteurs de réflexion de l'éclairement énergétique de la surface sous-jacente pour diverses teneurs en DOC dans une masse d'eau contenant une grande teneur fixe en chlorophylle $a$ (10.0 mg m <sup>-3</sup> ) et une petite teneur fixe en MS (0.05 g m <sup>-3</sup> )	13
Figure 17.	Spectres des facteurs de réflexion de l'éclairement énergétique de la surface sous-jacente pour diverses teneurs en DOC dans une masse d'eau contenant une petite teneur fixe en chlorophylle $a$ (0.05 mg m <sup>-3</sup> ) et une grande teneur fixe en MS (10.0 g m <sup>-3</sup> )	12
Figure 18.	Spectres des facteurs de réflexion de l'éclairement énergétique de la surface sous-jacente pour diverses teneurs en chlorophylle a d'une masse d'eau dans laquelle la teneur en DOC est fixée à 2.0 g carbone m <sup>-3</sup>	10
Figure 19.	et la teneur totale en MS est fixée à zero Spectres des facteurs de réflexion de l'éclairement énergétique de la surface sous-jacente pour diverses teneurs en MS d'une masse d'eau dans laquelle la teneur en DOC est fixée à 2.0 g carbone m <sup>-3</sup> et la	14
Figure 20.	teneur en chlorophylle a est fixée à 0.05 mg m <sup>-3</sup> Spectres des facteurs de réflexion de l'éclairement énergétique de la surface sous-jacente pour diverses teneurs en MS d'une masse d'eau dans laquelle la teneur en DOC est fixée à 2.0 g carbone m <sup>-3</sup>	14
Figure 21.	et la teneur en chlorophylle a est fixée à 10.0 mg m <sup>-2</sup> Spectres des facteurs de réflexion de l'éclairement énergétique de la surface sous-jacente pour diverses teneurs en chlorophylle a et en MS d'une masse d'eau dans laquelle la teneur en DOC est fixée	14
Figure 22.	à 2.0 g carbone m <sup>-3</sup> Spectres des facteurs de réflexion de l'éclairement énergétique de la surface sous-jacente pour diverses teneurs en chlorophylle <i>a</i> et en MS d'une masse d'eau dans laquelle la teneur en DOC est fixée à 10.0 g.	15
Figure 23.	carbone m <sup>-3</sup> Relations entre les facteurs de réflexion à 450 nm (bleu) et une teneur en chlorophylle <i>a</i> d'une masse d'eau dans laquelle la teneur en DOC est fixée à 2.0 g carbone m <sup>-3</sup> et la teneur en MS varie entre	15
Figure 24.	zéro et 20 g m <sup>-3</sup>	18
Figure 25.	zéro et 20 g m <sup>-3</sup>	18
Figure 26.	entre zéro et 10 g m <sup>-3</sup>	19
	m <sup>-3</sup>	19
		۷

# Illustrations (suite)

Figure 27.	Relations entre les facteurs de réflexion à 450 nm (bleu) et la teneur en MS d'une masse d'eau dans laquelle la teneur en DOC varie	
	entre zéro et 5 g carbone m <sup>-3</sup> et la teneur en chlorophylle a	
	varie entre 0.05 et 20.0 mg m <sup>-3</sup>	20
Figure 28.	Relations entre les facteurs de réflexion à 570 nm (vert) et la	
	teneur en MS pour plusieurs teneurs discrètes en chlorophylle a	
	d'une masse d'eau dans laquelle la teneur en DOC est fixée	
	à 2.0 g carbone m <sup>-3</sup>	20
Figure 29.	Relations entre les facteurs de réflexion à 570 nm (vert) et la	
	teneur en MS d'une masse d'eau dans laquelle la teneur en DOC	
	varie entre zéro et 5 a carbone m <sup>-3</sup> et la teneur en chloronhylle a	
	varie entre 0.05 et 20.0 mg m $^{-3}$	21
Eigure 30	Relations entre les facteurs de réflexion à 650 nm (rouge) et la	21
i igule 50.	toneur en MS pour plusieurs toneurs discrètes en oblerophylie a	
	d'une messe d'equi dens leguelle le teneur en DOC est fixée à	
	a une masse a eau dans laquene la tenedi en DOC est fixee a	01
<b>F</b> : 24	2.0 g carbone m	21
Figure 31.	nelations entre les lacteurs de renexion à 050 mm (rouge) et la tened	
	en IVIS o une masse o eau dans laquene la teneur en DOC varie entre $\frac{74}{10}$ et la teneur en bloc varie entre 0.05 et	
	200 et 5 g carbone millet la teneur en chiorophylie a varie entre 0.05 et	
<b>F</b> : 00		22
Figure 32.	Relations entre les facteurs de reflexion à 650 nm (rouge) et la teneur	
	en MS d'une masse d'eau dans laquelle la teneur en DOC varie	
	entre zéro et 5 g carbone m <sup>3</sup> et la teneur en chlorophylle a	
	varie entre 0.05 et 5.0 mg m <sup>-2</sup>	22
Figure 33.	Comparaison entre les teneurs en MS prévues et les teneurs mesurées	
	directement	27
Figure 34.	Comparaison entre les teneurs en DOC prévues et celles mesurées	
	directement	27
Figure 35.	Comparaison entre les teneurs en chlorophylle a prévues et celles	
	mesurées directement.	27
Figure 36.	Comparaison entre les spectres des facteurs de réflexion de «meilleur	
	ajustement» calculés et ceux mesurés directement pour une station	
	de la péninsule du Niagara de la partie occidentale du lac Ontario	28
Figure 37.	Comparaison entre le spectre de la figure 36 mesuré directement	
	et deux spectres calculés	28
Figure 38.	Exemples types des spectres des facteurs de réflexion mesurés	
	directement à des stations près des berges et au milieu du lac	
	Ontario durant toute la campagne sur le terrain	29
Figure 39.	Variation de la fraction diffuse de l'éclairement énergétique des-	
-	cendant au-dessus de l'eau en fonction de la longueur d'onde	
	durant toute la campagne sur le terrain	29
Figure 40.	Comparaison des sections efficaces d'absorption de la chlorophylle a	
	pour deux ensembles de données sur la qualité de l'eau et de	
	données optiques.	30
Figure 41.	Comparaison entre les spectres des facteurs de réflexion de «meilleur	
	ajustement» calculés et ceux mesurés directement pour la station	
	de la péninsule du Niagara, celle de la figure 36	30
Figure 42	Comparaison entre les teneurs en MS prévues et les teneurs	
	mesurées directement.	31
Figure 43.	Comparaison entre les teneurs en DOC prévues et les teneurs	
	mesurées directement.	31
		<b>.</b>

Page

## Illustrations (suite)

I

## Figure 44. Comparaison entre les teneurs en chlorophylle a prévues et celles mesurées directement. 31 Figure 45. Comparaison entre les teneurs mensuelles prévues de la chlorophylle a et les teneurs mesurées directement. 31 Figure 46. Intercomparaison d'un certain nombre de tentatives indépendantes de détermination des sections efficaces d'absorption de la chlorophylle a.... 33

Page

### Résumé

Le rapport porte sur l'évaluation des mesures directes de paramètres optiques comme moyens d'estimer les indicateurs (concentrations de chlorophylle a, de minéraux en suspension et de carbone organique dissous) de la qualité des eaux lacustres. Les analyses et les discussions présentées se fondent sur les résultats d'une étude par voie optique de la qualité des eaux d'un lac complexe (lac Ontario) et portent donc sur le pire cas possible, une masse d'eau telle que le lac Ontario présentant, on le comprendra, une épreuve très sévère d'une telle modélisation optique.

Le rapport n'est pas destiné à servir de cours abrégé sur l'optique lacustre, même si on présente rapidement la théorie mathématique nécessaire, ainsi qu'un vocabulaire des termes techniques utilisés. Les relations fondamentales entre les propriétés optiques mesurées et les indicateurs de qualité de l'eau sont les propriétés spécifiques d'absorption et de dispersion (selon les sections) des divers éléments du milieu aquatique en fonction des longueurs d'ondes observées. On discute longuement, non seulement des techniques utilisées pour estimer ces sections optiques, mais aussi les anomalies présentées par les eaux du lac Ontario (et les eaux sur une échelle plus générale) ainsi que les restrictions que ces anomalies imposent sur la prévision de la qualité de l'eau.

La méthode optique d'estimation de la qualité de l'eau peut être exposée le plus simplement possible comme suit :on obtient, dans la gamme du visible (400 à 700 nm) et par mesure directe, le spectre de la réflectance de l'irradiation sous la surface (réflectance volumique). Les relations données aux diverses longueurs d'ondes par les sections optiques des eaux chargées de chlorophylle, de minéraux en suspension et de carbone organique dissous servent ensuite, avec l'apport des méthodes appropriées d'optimisation, à estimer la concentration de ces paramètres qui produiront le spectre le plus fidèle au spectre observé.

Pour montrer l'effet de la variation des concentrations sur le spectre observé, le rapport donne de nombreux exemples des spectres optiques calculés pour des masses d'eau dont la qualité diffère de façon tranchée.

La mesure à une seule longueur d'onde est à toutes fins utiles rejetée comme moyen d'estimer les indicateurs de qualité d'une eau complexe. Le recours au spectre entier semble toutefois beaucoup plus prometteur. Les anomalies des sections optiques limitent beaucoup les possibilités de la prédiction, mais notre travail a permis d'estimer de façon acceptable les concentrations de minéraux en suspension et de carbone organique dissous dans le lac Ontario. Ce résultat s'avère de bon augure pour l'application d'une telle méthode de prédiction à des eaux continentales optiquement moins complexes. Quant aux possibilités de prédiction fiable des concentrations de la chlorophylle, elles continuent de nous échapper.

La construction et l'utilisation du modèle présenté ne peuvent en aucun cas être considérées comme définitives, étant le portrait fidèle du niveau actuel des connaissances et des techniques de la discipline. Toutefois, des travaux semblables se poursuivent dans de nombreuses autres institutions de recherche qui, dans le monde, s'intéressent aux paramètres optiques.

### Abstract

Т

This report contains an evaluation of direct measurements of optical parameters as a means of estimating water quality indicators (concentrations of chlorophyll *a*, suspended minerals, and dissolved organic carbon) that define natural lake waters. The analyses and discussions presented are based on the results of a coordinated optical/ water quality study of a complex inland lake (Lake Ontario), and consequently represent a possible "worst case" approach to the problem, since a body of water such as Lake Ontario would understandably present a severe test of such optical modelling.

The report is not intended as a short course in lake optics, although the necessary mathematical theory is briefly presented, as is a glossary of the technical terminology used in the text. The key linkages between measured optical properties and water quality indicators are the specific absorption and scattering properties (cross sections) of the various aquatic components as a function of observed wavelengths. Considerable discussion is presented concerning not only the techniques used to estimate such optical cross sections but also the departures from constancy of such cross sections for Lake Ontario waters (and waters on a more global scale) and the restrictions that such departures from constancy impose upon water quality prediction.

In its most simple form, the method of using optical parameters to estimate water quality considered in this report may be stated as follows: a direct measurement of the subsurface irradiance reflectance (volume reflectance) spectrum is obtained in the 400- to 700-nm (visible) range. Values of the wavelength dependencies of the optical cross sections of chlorophyll, suspended minerals, and dissolved organic carbon are then utilized in conjunction with appropriate optimization methodology to estimate the concentrations of chlorophyll, suspended minerals, and dissolved organic carbon that will generate a subsurface irradiance reflectance spectrum that most closely simulates the directly measured spectrum.

To illustrate the impact on the observed subsurface irradiance reflectance spectrum of varying the concentrations of the three principal organic and inorganic components, the report includes numerous examples of calculated optical spectra for water masses of distinctly dissimilar water quality.

The use of a volume reflectance measurement at a single wavelength as a means of estimating water quality indicators for multi-component waters is all but eliminated by this report. Employing the entire volume reflectance spectrum to estimate water quality indicators, however, appears to be considerably more promising. Despite the severe limitations on predictive capabilities resulting from the inconstancies of the optical cross sections, this work has realized acceptable success in estimating suspended mineral and dissolved organic carbon concentrations in Lake Ontario. This augures well for the use of such predictive methodology in optically less complex inland waters. Reliable predictive capabilities for chlorophyll concentrations continue to be much more elusive.

The model development and application presented here can by no means be regarded as definitive, representing as it does the current level of understanding and state of the art of such aquatic studies. Comparable work, however, is continuing at numerous optically oriented research institutions around the world.

## Sommaire

Bien souvent, la couleur de l'eau est considérée comme un indice de qualité. La couleur, qui est souvent chiffrée par mesure de la transparence à l'aide du disque de Secchi, constitue la base des mesures faites par avion et par satellite qui ont été proposées pour évaluer la qualité de l'eau.

Ce rapport examine les propriétés fondamentales de diffusion et d'absorption de l'eau, en fonction de trois indicateurs qui servent souvent à évaluer la qualité, soit la teneur en chlorophylle a, en substances minérales en suspension et en carbone organique en solution, et les relie à la réflexion de l'éclairement énergétique par la surface sousjacente (réflectance volumique). La dépendance de chacun des indicateurs à l'égard de la longueur d'onde est examinée, et est calculée leur influence réciproque sur la réflectance volumique totale.

Selon la théorie, aucune longueur d'onde ou bande de longueurs d'onde n'est, à elle seule, suffisamment sensible pour évaluer la qualité de l'eau à partir de la réflectance volumique. Si on envisage l'analyse globale de tout le spectre visible, il peut être possible de déterminer avec un facteur de deux la teneur en substances minérales en suspension et la teneur en carbone organique en solution. Dans les eaux lacustres, la détermination de la teneur en chlorophylle a peut être extrêmement difficile et en présence de teneurs élevées en substances minérales en suspension et/ou en carbone organique en solution, il n'est pas possible de mesuer avec précision la teneur en chlorophylle a.

On a comparé expérimentalement des mesures des teneurs en chlorophylle *a*, en substances minérales en suspension et en carbone organique en solution à des mesures de la réflectance volumique faites en même temps dans le lac Ontario en vue de valider le modèle théorique. En général, les résultats concordaient bien, à l'exception de la teneur en chlorophylle *a* qui était généralement inférieure à celle calculée à partir du modèle. Des ajustements empiriques ont permis d'améliorer la concordance, mais ont indiqué que les relations ne sont peut-être pas constantes. Ce problème découle, du moins en partie, des méthodes utilisées pour déterminer la teneur en chlorophylle *a* et de la relation entre la chlorophylle *a* et la biomasse phytoplanctonique.

Le rapport examine en profondeur la théorie de base des mesures optiques et le potentiel de cette dernière comme outil de déduction de la qualité de l'eau à partir de mesures de cette propriété importante qui est la réflectance volumique. Cette théorie peut être appliquée aux observations faites par avion ou par satellite.

## La mesure directe des paramètres optiques au service de l'estimation des indicateurs de la qualité de l'eau des lacs

R.P. Bukata, J.E. Bruton et J.H. Jerome

#### **THÉORIE À INTRODUCTION**

C'est la coexistence du mécanisme de diffusion et de celui d'absorption qui régit la propagation du rayonnement incident dans une masse d'eau naturelle. La nature et l'ampleur des mécanismes de diffusion et d'absorption dépendent, à leur tour, de la nature et de la teneur en matériaux organiques et inorganiques en suspension et en solution se trouvant dans la colonne d'eau, de même que de la nature et de la répartition de la luminance énergétique du rayonnement incident. Comme la composition des matériaux organiques et inorganiques des masses d'eau varie à la fois dans l'espace et dans le temps, il est logique de déduire que les interactions observées entre ces masses et le champ de rayonnement incident varient suivant la composition. C'est pourquoi les études des propriétés optiques des masses d'eau doivent composer avec deux grandes catégories de propriétés optiques, soit les propriétés inhérentes et les propriétés apparentes. Les premières sont celles qui sont entièrement indépendantes de la répartition spatiale du rayonnement incident, alors que les secondes sont celles qui dépendent de cette répartition spatiale.

Parmi les propriétés apparentes d'une masse d'eau, mentionnons :

- (a) Le facteur de réflexion de l'éclairement énergétique (facteur de réflexion en volume), R
- (b) Le coefficient d'atténuation de l'éclairement énergétique, K.

Parmi les propriétés optiques inhérentes d'une masse d'eau mentionnons :

- (a) Le coefficient d'atténuation total, c
- (b) Le coefficient d'absorption, a
- (c) L'albédo de diffusion,  $\omega_0$
- (d) Le coefficient de diffusion, b

- (e) La probabilité de prodiffusion, F
- (f) La probabilité de rétrodiffusion, B
- (g) La fonction de diffusion en volume,  $\beta(\Theta)$ .

On a réuni à l'annexe un glossaire donnant une définition - technique des termes rencontrés dans ce rapport.

Comme le spectre des fréquences électromagnétiques s'étend des valeurs les plus faibles aux valeurs les plus élevées, et comme la qualité de l'eau est une expression très subjective faisant intervenir une grande variété de substances et de sous-substances organiques et inorganiques, il est impossible dans l'état actuel de nos connaissances de rédiger un document qui traiterait de tous les aspects du rapport entre les mécanismes optiques et la qualité de l'eau. C'est la raison pour laquelle on s'est limité, dans ce travail, aux seules longueurs d'onde visibles du spectre électromagnétique (400 à 700 nm) et à la qualité d'une masse d'eau définie au moyen de ses teneurs en chlorophylle *a*, en minéral en suspension et en carbone organique en solution.

Mathématiquement, les propriétés optiques inhérentes b et B sont définies en fonction des intégrations appropriées de la fonction de diffusion en volume  $\beta(\Theta)$ . La mesure directe des propriétés optiques inhérentes des eaux naturelles requiert donc l'utilisation d'instruments de mesure élaborés permettant de déterminer la totalité de la fonction de diffusion en volume  $\beta(\Theta)$ , afin d'isoler le coefficient de diffusion, b, et le coefficient d'absorption, a, du coefficient d'atténuation totale c (c = a + b). Par ailleurs, il est beaucoup plus facile d'effectuer des mesures sur place des propriétés optiques apparentes de la colonne d'eau. Le coefficient d'atténuation totale, c, s'obtient directement par transmissométrie, et les propriétés apparentes, R et K, sont déduites directement de mesures spectrométriques ascendantes et descendantes. D'où la préférence accordée dans le vaste domaine de l'optique des océans et des lacs à la détermination des relations générales entre les propriétés optiques inhérentes et apparentes au

moyen de l'élaboration de modèles fondés sur des simulations valables des équations de transfert par rayonnement. Deux modèles de ce genre ont déjà été proposés : le premier par Gordon et coll. (1975), qui fait appel à une simulation de Monte Carlo, et l'autre par Di Toro (1978), qui exploite une combinaison d'approximations exponentielles et d'approximations de diffusion quasi uniques. Même si à l'Institut national de recherches sur les eaux, on a déjà utilisé ces deux simulations de transfert par rayonnement, la suite du présent rapport ne porte que sur la simulation de Gordon et coll. (1975).

Gordon et coll. (1975), déduisent à la suite de l'ajustement d'une courbe par la méthode de Monte Carlo les équations suivantes :

$$\omega_{\mathbf{o}} \mathsf{F} = \sum_{n=0}^{N} \mathsf{k}'(\tau) \left[ \frac{\mathsf{K}(\tau)}{\mathsf{c}(\tau)\mathsf{D}_{\mathsf{d}}(\tau)} \right]^{\mathsf{n}} \tag{1}$$

et

$$\frac{\omega_{0}B}{1-\omega_{0}}F^{=}\sum_{n=0}^{N}r'_{n}(\tau)[R(\tau)]^{n}$$
(2)

où

 $\omega_0 = \frac{b}{c} \equiv albédo de diffusion$ 

 $F \equiv \text{probabilité de prodiffusion}$ 

- $B \equiv \text{probabilité de rétrodiffusion} = 1-F$
- $K(\tau) \equiv$  coefficient d'atténuation de l'éclairement énergétique à la profondeur  $\tau$ pour l'éclairement énergétique descendant
- $R(\tau) \equiv$  facteur de réflexion de l'éclairement énergétique (facteur de réflexion en volume) à la profondeur  $\tau$  pour l'éclairement énergétique descendant
- $\mathsf{D}_{\mathsf{d}}(\tau) \equiv \operatorname{fonction} \operatorname{de} \operatorname{répartition} \operatorname{a} \operatorname{la profondeur}$ au de l'éclairement énergétique descendant
  - $c(\tau) \equiv$  coefficient d'atténuation totale à la profondeur d'eau
- $k'_{n}(\tau)$  et  $r'_{n}(\tau)$  sont les ensembles de coefficients appropriés au développement des équations 1 et 2.

Gordon et coll. (1975) ont déterminé deux ensembles de valeurs pour les coefficients  $r'_n(\tau)$  à un convenant aux angles d'incidence solaire  $\lesssim 20^\circ$  et l'autre pour les angles d'incidence solaire  $\lesssim 30^\circ$ , angles mesurés dans la colonne d'eau. L'ensemble des coefficients  $k'_n(\tau)$  est indépendant de l'angle solaire.

Grâce aux équations 1 et 2 on peut déterminer les propriétés optiques inhérentes  $\omega_0$ , a, b, F et B à partir des propriétés optiques apparentes  $K(\tau)$ ,  $R(\tau)$  et de la propriété optique inhérente  $c(\tau)$  (mesurées directement dans le lac). Pour plus de simplicité, on a omis le fait que les équations 1 et 2 dépendent de façon implicite de la longueur d'onde.

Les propriétés inhérentes sont en soi reliées (c = a + b), et manifestent des propriétés additives qui dépendent de la présence de centres de diffusion et d'absorption dans la colonne d'eau :

$$a(\lambda) = \sum_{i=1}^{n} x_{i} a_{i}(\lambda)$$
  

$$b(\lambda) = \sum_{i=1}^{n} x_{i} b_{i}(\lambda)$$
(Bb)(\lambda) = 
$$\sum_{i=1}^{n} x_{i}(Bb)_{i}(\lambda)$$
(3)

- où (Bb)( $\lambda$ ) = coefficient de rétrodiffusion à la longueur d'onde  $\lambda$ , le produit de B et b
  - x<sub>i</sub>≡ concentration de la ith composante de la masse d'eau considérée
  - $a_i(\lambda) \equiv$  absorption à la longueur d'onde  $\lambda$ d'une concentration unitaire de la composante i.
  - $b_i(\lambda) \equiv$  diffusion à la longueur d'onde  $\lambda$  d'une concentration unitaire de la composante i
  - $(Bb)_i(\lambda) \equiv \text{ rétrodiffusion à la longueur d'onde } \lambda \\ \text{d'une concentration unitaire de la } \\ \text{composante i.}$

Du fait que les paramètres  $a_i(\lambda)$ ,  $b_i(\lambda)$  et  $(Bb)_i(\lambda)$ décrivent le comportement optique, exprimé au moyen de l'absorption et de la diffusion, de la colonne d'eau par concentration unitaire de la matière constitutive, on les désignéra dans la suite du texte par l'expression sections efficaces optiques de la masse d'eau. Comme on le voit, la détermination de ces sections efficaces optiques permet d'établir les liens entre les paramètres optiques inhérents d'une masse d'eau et les paramètres de la qualité de cette eau. Évidemment, le modèle optique définitif doit prendre en considération les sections efficaces de toutes les substances et sous-substances des composantes aquatiques présentes dans les masses d'eau naturelles, de même que les éventuels rapports de temps, de forme et de tailles de chacun. Comme on s'en doute bien, un tel modèle est irréalisable. Dans le présent travail, on retient l'hypothèse qu'à tout instant une masse d'eau naturelle peut être définie comme une combinaison homogène d'eau pure, d'un seul produit organique en suspension (nommément la teneur en chlorophylle a corrigée pour la présence de phéophytine), une seule substance inorganique en suspension (représentée par la teneur en minéraux en suspension, MS), une substance organique en solution (représentée par carbone organique en solution DOC) et une substance organique non vivante NLO, établies de la facon suivante :

$$\frac{\text{NLO}}{78} = \frac{\text{SO}}{78} - \frac{\text{Chl}_{\text{cor}}}{\text{Chl}_{\text{unc}}} \cdot \frac{\text{POC}}{24}$$
(4)

où

SO = valeur mesurée de la teneur totale de la substance organique en suspension

- Chl<sub>unc</sub> = valeur mesurée de la chlorophylle a non corrigée pour la présence de phéophytine
- Chi<sub>cor</sub> = valeur mesurée de chlorophylle a corrigée pour la présence de phéophytine
  - POC = valeur mesurée de la teneur en carbone organique particulière.

On a décidé de normaliser les unités de l'équation 4 sur la foi de l'hypothèse (Burns, 1980) que la composante organique moyenne peut être représentée par la formule moléculaire  $C_2 H_6 O_3$  (et par conséquent par un poids moléculaire de 78 unités atomiques). Toutefois l'équation 4 ne tient pas compte de la contribution par la population de zooplancton vivant.

Dans le modèle optique précédent à cinq composantes (MS, Chl a, DOC, NLO, eau pure), on peut écrire le système d'équations 3 ainsi

$$a(\lambda) = a_{W}(\lambda) + xa_{Chl}(\lambda) + ya_{MS}(\lambda) + za_{DOC}(\lambda)$$
$$+ u a_{NLO}(\lambda)$$
$$b(\lambda) = b_{W}(\lambda) + x b_{Chl}(\lambda) + y b_{MS}(\lambda)$$
(5)

+ u b NLO(
$$\lambda$$
)  
(Bb) ( $\lambda$ ) = (Bb)<sub>W</sub>( $\lambda$ ) + x(Bb)ChI( $\lambda$ )

où les indices w, Chl, MS, DOC et NLO dénotent, respectivement, l'eau pure, la substance organique, la substance inorganique, la substance organique en solution et la substance organique non vivante de la colonne d'eau. En outre, x, y, z et u dénotent les teneurs en chlorophylle *a* (corrigées pour la présence de phéophytine), en minéraux en suspension, en carbone organique en solution et en substance organique non vivante. Finalement, les composantes de a ( $a_{Chl}$ ,  $a_{MS}$ ,  $a_{DOC}$ ,  $a_{NLO}$ ),  $b(b_{Chl}$ ,  $b_{MS}$ ,  $b_{NLO}$ ), et Bb[(Bb)<sub>Chl</sub>, (Bb)<sub>MS</sub>, (Bb)<sub>NLO</sub>] correspondent aux sections efficaces optiques.

Il a fallu pour établir les valeurs des sections efficaces. mener un programme coordonné en spectro-optique dans la partie continentale du lac Ontario. Ce programme était en fait une coentreprise regroupant l'INRE (Institut national de recherches sur les eaux), le CCP (Centre canadien de télédétection) et Moniteq Ltd. dans le cadre de laquelle ont eu lieu une télédétection aéroportée et une étude atmosphérique, en plus de l'étude optique théorique in situ exposée dans ce rapport. Les détails logistiques de cette expérience en plusieurs étapes réalisée au lac Ontario ont déjà été exposés ailleurs (Jain et coll., [1980]; Zwick et coll., [1980]; Bukata et coll., [1981a,b]). Aussi, nous contenterons-nous de mentionner que le prélèvement des échantillons d'eau (qui ont fait l'objet d'analyses en laboratoire afin d'établir les paramètres de la qualité de l'eau) a été effectué concurremment avec les déterminations in situ, dans les premiers dix mètres d'eau, des profils de transmission (au moyen d'un transmissomètre multispectral XMS Martek modifié), des profils d'éclairement énergétique spectraux et des facteurs de réflexion en volume spectraux (à l'aide d'un spectromètre balayage Techtum QSM 2500). On trouvera dans Bukata et coll. (1981a) un exposé détaillé des déterminations numériques des sections efficaces optiques. Toutefois, la figure 1 montre un schéma fonctionnel qui donne un aperçu des étapes de base. Les données du transmissomètre in situ et du spectromètre ont servi à établir la propriété optique inhérente,  $c(\lambda, \tau)$ , et les propriétés optiques apparentes,  $K(\lambda,\tau)$  et  $R(\lambda,\tau)$ . Le modèle de Gordon et coll. (1975) (équations 1 et 2) a été exploité (Bukata et coll., [1979]) comme instrument de détermination des propriétés optiques inhérentes a, b,  $\omega_0$ , F et B. L'application de techniques de régression multiple aux valeurs trouvées a, b et (Bb) et l'utilisation des paramètres mesurés pour la qualité de l'eau (système d'équations 5) ont permis de trouver les sections efficaces optiques voulues pour le modèle à cinq composantes.



Figure 1. Organigramme des opérations retenues dans le développement de la méthodologie de l'étude optique de la qualité de l'eau de la surface sous-jacente.

On s'est aperçu toutefois, au moins pour le lac Ontario, qu'il y avait une légère perte de généralité lorsqu'on utilisait un modèle optique à quatre composantes, c'est-àdire lorsqu'on négligeait la contribution de la substance NLO. Ceci est en partie attribuable au fait que cette composante a rarement une importance dominante dans le comportement optique du lac Ontario (la teneur chiffrée en NLO [en grammes par mètre cube] dépasse rarement 10 % de la teneur chiffrée en chlorophylle *a* [en milligrammes par mètre cube]). Par ailleurs le fait d'utiliser un modèle à quatre composantes nous a forcés à utiliser une teneur Chl a<sub>unc</sub> (c'est-à-dire une teneur en chlorophylle *a* non corrigée par la présence de phéophytine). Dans la suite du présent rapport, nous parlerons d'un modèle optique à quatre composantes (eau pure, chlorophylle a avec phéophytine, minéraux en suspension et carbone organique en solution). Dans ce modèle, le système d'équations 5 devient :

$$a(\lambda) = a_{W}(\lambda) + xa_{CHI}(\lambda) + \lambda a_{WS}(\lambda) + za_{DOC}(\lambda)$$

$$a(\lambda) = b_{W}(\lambda) + xa_{CHI}(\lambda) + \lambda a_{WS}(\lambda) + za_{DOC}(\lambda)$$
(6)

 $(Bb)(\lambda) = (Bb)_W(\lambda) + x(Bb)_{Chl}(\lambda) + y(Bb)_{MS}(\lambda)$ 

où l'indice Chl dénote à présent Chl  $a_{\mbox{unc}}$  et x, la teneur Chl  $a_{\mbox{unc}}$ 

#### LES SECTIONS EFFICACES OPTIQUES DU LAC ONTARIO

Les figures 2 et 3 donnent, en fonction d'une longueur d'onde visible, les sections efficaces du modèle optique à quatre composantes (eau pure, MS, Chl aunc, DOC). Plus précisément, la figure 2 donne les valeurs de  $a_j(\lambda)$  et la figure 3, les valeurs de  $b_i(\lambda)$  pour les eaux du lac Ontario. Par ailleurs, les valeurs a $_W(\lambda)$  et b $_W(\lambda)$  sont tirées du travail de Hulburt (1945). À partir des valeurs connues des sections efficaces optiques, on a pu déterminer un spectre des facteurs de réflexion en volume  $R_{y}(\lambda)$  pour les masses d'eau contenant des quantités différentes de chlorophylle a (non corrigée pour la présence de phéophytine), d'un minéral en suspension, d'un carbone organique en solution, en recourant au modèle de simulation Monte Carlo de Gordon et coll. (1975). En principe, toutefois, ces spectres de réflexion mesurés in situ peuvent être comparés à un répertoire de spectres des facteurs de réflexion en volume existant pour des masses d'eau contenant des teneurs connues en une seule composante. Ce genre d'intercomparaison est toutefois soumis aux impératifs que voici :

- (a) Les eaux naturelles considérées doivent être décrites de façon appropriée par un modèle optique à quatre composantes. De toute évidence, plus une masse d'eau devient complexe du point de vue optique (c'est-à-dire plus il y a de composantes qui modifient de façon importante le comportement optique), moins le modèle considéré sera fiable pour déterminer les indicateurs de la qualité de l'eau du lac.
- (b) On doit connaître les sections efficaces optiques. En outre, on doit avoir de bons indices pour supposer qu'elles sont relativement invariantes ou, à tout le moins, négligemment variables durant l'intervalle de mesure. De telles conditions sont remplies à certains endroits et durant certaines périodes, et ne le sont pas à d'autres endroits et



Figure 2. Les sections efficaces d'absorption calculées pour la chlorophylle *a* non corrigée pour la présence de phéophytine (Chl *a*<sub>unc</sub>), pour la teneur totale en minéraux en suspension (MS) et pour du carbone organique en solution (DOC). Sont également illustrés les coefficients d'absorption de l'eau pure.

en d'autres temps. Par exemple, les sections efficaces optiques déterminées dans la partie occidentale du lac Ontario se sont révélées, dans une très large mesure, valides pour la grandeur du lac (Bukata et coll., [1981c]) au cours de la majeure partie de la saison d'études sur le terrain. Toutefois, un travail inédit semble indiquer qu'il y aurait lieu de déterminer un nouvel ensemble de sections efficaces optiques pour les eaux du lac Ontario pour les mois d'automne (sans doute en raison d'un changement des organismes à chlorophylle du biote indigène).

- (c) On considère que la masse d'eau est homogène. Le modèle en question ne tient pas compte des effets possibles de stratification.
- (d) D'aucune manière, le modèle ne tient compte des impuretés chimiques. De petites concentrations de tels produits chimiques (comparativement aux teneurs en Chl, MS et DOC) produisent des effets d'absorption et de diffusion négligeables, de sorte que leur détection est impossible dans l'état actuel des techniques optiques in situ.



Figure 3. Les sections efficaces de diffusion calculées pour la chlorophylle *a* non corrigée pour la présence de phéophytine (Chl *a*<sub>unc</sub>), pour la teneur totale en (MS). Sont également illustrés les coefficients de diffusion de l'eau pure.

#### SPECTRES DU FACTEUR DE RÉFLEXION DE L'ÉCLAIREMENT ÉNERGÉTIQUE DE LA SURFACE SOUS-JACENTE

Gordon et coll. (1975) nous apprennent que le rapport de réflexion de l'éclairement énergétique (appelé également facteur de réflexion en volume),  $R(0,\lambda)$ , juste sous la couche de la surface libre est donné par

$$R(0,\lambda) = \sum_{n=0}^{N} r_{n}(0) \left[ \frac{Bb(\lambda)}{a(\lambda) + Bb(\lambda)} \right]^{n}$$
(7)

où toutes les variables ont les mêmes définitions que précédemment. Dans le présent travail, les  $r_n(0)$  sont les coefficients du développement correspondant à celui d'angles d'incidence solaire <20°, angles mesurés dans la colonne d'eau. De plus, N est supposé être égal à 3. En exploitant les propriétés additives de  $a(\lambda)$  et Bb $(\lambda)$  manifestées par le système d'équations 6 de la représentation à quatre composantes de la masse d'eau, et en recourant aux sections efficaces optiques illustrées aux figures 2 et 3, on voit immédiatement qu'on peut tracer des spectres point par point des facteurs de réflexion de l'éclairement énergétique de la surface sous-jacente pour des valeurs choisies de x, y et z, c'est-à-dire pour différents types de masses d'eau ayant des teneurs variables en chlorophylle a (non corrigées pour la présence de phéophytine), en minéral en suspension et en carbone organique en solution.

La figure 4 nous a fait voir une famille de spectres des facteurs de réflexion (commençant à 410 nm et augmentant par tranche de 20 nm jusqu'à 690 nm), calculés de la façon précitée pour différentes teneurs en chlorophylle a dans une masse d'eau où la teneur du minéral en suspension et la teneur du carbone organique en solution sont nulles (c'est-à-dire les spectres d'un modèle de masse d'eau à deux composantes, chlorophylle et eau pure). Comme on le voit bien, les masses d'eau ayant une faible concentration de chlorophylle a manifestent un facteur de réflexion en volume important dans la région bleue du spectre, et un facteur de réflexion en volume minimal dans la partie rouge. L'augmentation de la teneur en chlorophylle dans l'eau (évidemment dans une masse d'eau formée seulement d'eau pure et de chlorophylle) tend à diminuer le facteur de réflexion en volume des longueurs d'onde du bleu tout en augmentant, à un rythme plus rapide, le facteur de réflexion en volume des longueurs d'onde du rouge. Pour les teneurs en chlorophylle plus grandes que ~1 à 2 mg m<sup>-3</sup>, les spectres des facteurs de réflexion de l'éclairement énergétique sont caractérisés par un minimum dans le bleu bien défini et un maximum dans le vert. Une remarque importante s'impose relativement au rôle central joué par la longueur d'onde 505 nm. Comme on le voit bien pour une eau pure ne contenant que de la chlorophylle, le facteur de réflexion en volume est indépendant à 505 nm de la teneur en chlorophylle, c'est-à-dire  $\frac{\partial R(0.505)}{\partial Chl} = 0$ . En

intégrant l'équation 7 par rapport à la teneur en chlorophylle, on peut montrer que le facteur de réflexion en volume est indépendant de la teneur en chlorophylle pour

cette valeur de  $\lambda$  pour laquelle  $\frac{Bb_{Chl}}{a_{Chl}} = \frac{Bb_{w}}{a_{w}}$ , c'est-à-dire

pour cette valeur de  $\lambda$  qui rend le rapport de la rétrodiffusion à l'absorption de la chlorophylle égal au rapport de la rétrodiffusion à l'absorption de l'eau pure. Il s'établit ainsi un équilibre entre les propriétés optiques de chacune des deux composantes de l'eau.

L'introduction d'une petite concentration fixe de minéraux en suspension  $(0.10 \text{ g m}^{-3})$  dans la masse d'eau (qui devient ainsi un module à trois composantes) donne lieu à la famille de spectres des facteurs de réflexion de l'éclairement énergétique à la surface sous-jacente montrée à la figure 5. Dans une masse d'eau de ce genre (0.10 g)

m<sup>-3</sup> MS, zéro DOC), le rythme de diminution du facteur de réflexion en volume dans la région du bleu, causé par l'addition de chlorophylle est presque le même que le rythme d'élévation des facteurs de réflexion en volume dans la région du rouge. La longueur d'onde centrale où  $\partial R(0,\lambda)$ 

 $\frac{\partial R(0,\lambda)}{\partial Chl} = 0$  représente maintenant ~570 nm. Pour une

masse d'eau à trois composantes (eau pure, chlorophylle et minéraux en suspension), le facteur de réflexion en volume est indépendant de la teneur en chlorophylle à

 $la \, longueur d'onde où \frac{B^{b}Chl}{a^{b}Chl} = \frac{B^{b}w + B^{b}MS}{a^{w} + a^{b}MS} \frac{C_{MS}}{MS}$ 

Il s'établit donc un équilibre entre les propriétés optiques de la chlorophylle et les propriétés optiques combinées des deux autres composantes de l'eau.

Les figures 6 à 12 représentent, tout comme les figures précédentes, des familles de spectres des facteurs de réflexion de l'éclairement énergétique à la surface sousjacente pour différentes teneurs en chlorophylle, pour une teneur nulle en DOC et des teneurs fixes en minéral en suspension de 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 10.0 et 20.0 g m<sup>-3</sup>, respectivement. Remarquez que la longueur d'onde centrale

où  $\frac{\partial R(0,\lambda)}{\partial Chl} = 0$  dépasse rapidement 690 nm à mesure que

croît la teneur du minéral en suspension.

Les figures 4 à 12 mettent bien en évidence les importantes répercussions sur le spectre des facteurs de réflexion de l'augmentation des teneurs en minéral en suspension dans un lac renfermant de la chlorophylle, alors que la figure 13 fait voir l'évolution de ces spectres par suite d'une augmentation systématique de la teneur en minéral en suspension dans un lac n'ayant aucun carbone organique et une petite quantité fixe de chlorophylle. Par ailleurs, la figure 14 nous fait voir l'effet de cette même variation dans un lac n'ayant aucun carbone organique mais une quantité importante et fixe de chlorophylle. Comme il est logique de s'y attendre, les fortes teneurs de minéraux en suspension (mettons supérieures à  $\sim 0.5$  g m<sup>-3</sup>) diminuent de manière draconienne la sensibilité spectrale des facteurs de réflexion en volume par rapport aux changements de la teneur en chlorophylle.

À la lumière de ces résultats, il est évident qu'une large gamme de spectres des facteurs de réflexion peut être pronostiquée pour un modèle à trois composantes (eau pure, chlorophylle, minéraux en suspension) d'une masse d'eau. L'ajout d'une quatrième composante (DOC) au modèle du lac modifiera dans de grandes proportions le spectre des facteurs de réflexion observé juste sous l'inter-

face air-eau, particulièrement dans la partie inférieure des longueurs d'onde du visible (figure 2). La figure 15 nous fait voir directement l'effet de cette modification sur la famille des spectres des facteurs de réflexion en volume (pour des teneurs en DOC variables), dans le cas d'une masse d'eau contenant une faible teneur fixe en minéral en suspension de 0.05 g m<sup>-3</sup> et une teneur fixe en chlorophylle a de 1.00 mg m<sup>-3</sup>. Il est évident que pour les eaux relativement claires (caractérisées par de petites teneurs en minéral en suspension et des teneurs en chlorophylle petites ou moyennes), l'ajout systématique de carbone organique en solution donne lieu à une diminution rapide des facteurs de réflexion de l'éclairement énergétique dans la surface sous-jacente, aux longueurs d'onde inférieures à ~ 600 nm (c'est-à-dire dans les régions bleue et verte du spectre visible), et une diminution beaucoup plus faible par rapport à la diminution précédente de ces facteurs de réflexion correspondant aux longueurs d'onde supérieures à ~ 600 nm (c'est-à-dire dans la région rouge du spectre visible).

Par ailleurs, la figure 16 montre la répercussion du DOC d'une masse d'eau ayant une grande teneur en Chl a (10.0 mg m<sup>-3</sup>) et une petite teneur fixe en minéraux en suspension (0.05 g m<sup>-3</sup>). Pour sa part, la figure 17 nous fait voir la répercussion du DOC d'une masse d'eau ayant une petite teneur fixe en Chl a (0.05 mg m<sup>-3</sup>) et une grande teneur fixe en minéraux en suspension (10.0 g m<sup>-3</sup>). Pour les masses d'eau décrites aux figures 16 et 17, on remarque immédiatement que

- La masse d'eau contenant de fortes teneurs en minéraux en suspension connaît des spectres des facteurs de réflexion en volume qui sont dix fois supérieurs à ceux de la masse d'eau contenant de fortes teneurs en chlorophylle.
- (b) L'effet du DOC est plus remarquable dans les masses renfermant de fortes teneurs en chlorophylle et une faible teneur en minéraux en suspension que dans celles contenant une faible teneur en chlorophylle et une forte teneur en minéral en suspension.
- (c) Pour toutes les masses d'eau, l'effet maximal du DOC est enregistré dans le domaine des faibles longueurs d'onde (bleu) du spectre visible, tandis que l'effet minimal de la même substance est enregistré dans le domaine des hautes longueurs d'onde (rouge) du spectre visible.

Même si à l'échelle de l'aquasystème intérieur le carbone organique en solution varie dans l'espace et dans le temps, on a observé (Bukata et coll., 1981a) qu'une teneur type pas déraisonnable pour le carbone organique en solution dans les Grands lacs est d'environ  $\sim 2.0$  g carbone m<sup>-3</sup>.

Les figures 18 et 19 font voir les changements qu'il est possible de prévoir dans les spectres des facteurs de réflexion de l'éclairement énergétique de la surface sousjacente par suite de modifications, respectivement, des teneurs en chlorophylle et en minéral en suspension dans un lac caractérisé par une teneur fixe en DOC de 2.0 g carbone m<sup>-3</sup>. Plus précisément, la figure 18 nous fait voir une famille de spectres des facteurs de réflexion en volume qui résulte de la variation de la teneur en chlorophylle d'une masse d'eau ne renfermant aucun minéral en suspension, et la figure 19 présente une famille de spectres des facteurs de réflexion en volume résultant de la variation de la teneur en minéraux en suspension dans une masse d'eau ne contenant pratiquement aucune chlorophylle (une teneur fixe très faible de 0.05 mg m<sup>-3</sup>).

Certaines similitudes entre les figures 18 et 19 sautent aux yeux. Ainsi, l'augmentation de la teneur en minéraux en suspension ou en chlorophylle d'une masse d'eau renfermant 2.0 g carbone  $m^{-3}$  de DOC se traduit par une augmentation plus rapide du facteur de réflexion en volume dans l'extrémité rouge du spectre que dans l'extrémité bleue, de sorte que la forme de base du spectre de la chlorophylle en l'absence de minéraux en suspension se rapproche très fortement de la forme de base du spectre de minéraux en suspension en l'absence de chlorophylle. On voit donc immédiatement que les fortes teneurs en minéraux en suspension donnent lieu à des facteurs de réflexion en volume dix fois supérieurs à ceux résultant de fortes teneurs en chlorophylle. Également, de petites teneurs en minéraux en suspension donnent lieu à des facteurs de réflexion en volume dix fois plus grands que ceux résultant des petites teneurs en chlorophylle. En revanche, les figures 18 et 19 nous apprennent que pour les masses d'eau naturelles renfermant 2.0 g carbone m<sup>-3</sup> de DOC, les facteurs de réflexion en volume sont comparables dans le cas des masses d'eau renfermant de fortes teneurs en chlorophylle (sans minéraux en suspension) et celui des masses d'eau renfermant des teneurs en minéraux en suspension relativement petites (sans chlorophylle).

On peut voir à la figure 20 la modification que subissent les spectres observés des facteurs de réflexion de l'éclairement énergétique de la surface sous-jacente lorsqu'on augmente la teneur en minéral en suspension dans un lac renfermant une teneur fixe en DOC de 2.0 g carbone m<sup>-3</sup>, et une forte teneur fixe en chlorophylle *a* de 10.0 mg m<sup>-3</sup>.

Pour sa part la figure 21 cherche à illustrer les effets interactifs sur les spectres des facteurs de réflexion en volume qui découlent de la variation à la fois de la chlorophylle et des teneurs en minéraux en suspension dans un lac renfermant 2.0 g carbone  $m^{-3}$  de DOC. Par ailleurs, la figure 22 illustre la même chose mais pour un lac renfermant 10.0 g carbone  $m^{-3}$  de DOC.

On voit donc immédiatement que les spectres des facteurs de réflexion donnés en exemple dans la présente section servent à illustrer la répercussion qu'auront les variations des paramètres de la qualité de l'eau (chlorophylle, minéraux en suspension, du carbone organique en solution) sur les mesures in situ des spectres optiques de ce genre, et servent, de ce fait, à souligner les précautions qu'il faut prendre dans la déconvolution des groupements optiques complexes quand les spectres des facteurs de réflexion en volume sont utilisés pour estimer les paramètres de la qualité de l'eau.

Au surplus, comme on s'en doute bien, les spectres donnés en exemple ici sont incomplets et ne prétendent en aucune manière couvrir la grande diversité de spectres possibles pour des lacs aussi complexes que le lac Ontario. D'où la décision ici d'utiliser des spectres de sections efficaces d'absorption et de rétrodiffusion à 15 points (allant de 410 à 690 nm par tranche de 20 nm), dont les valeurs numériques sont données au tableau 1. Le lecteur qui le désire peut utiliser directement les chiffres du tableau 1 et les introduire dans les équations 6 et 7 afin d'obtenir pour la masse d'eau voulue le facteur de réflexion en volume prévu pour l'éclairement énergétique de la surface sous-jacente.

Spectres des sections efficaces d'absorption et de rétrodiffusion à 15 points utilisés en rapport avec les équations 6 et 7 du présent Tableau 1. rapport

Longueur d'onde			-	a		(Bb)	(Bb)	(Bb)
(nm)	aw	<sup>a</sup> Chl	a Chl	<sup>a</sup> MS	<sup>a</sup> DOC	<u>w</u>	Chl	<u>MS</u>
410	0.038 00	0.037 80	0.024 28	0.133 50	0.145 00	0.002 29	0.001 36	0.052 40
430	0.026 00	0.040 50	0.021 88	0.135 10	0.121 00	0.001 86	0.001 25	0.049 92
450	0.017.00	0.041 00	0.019 38	0.130 90	0,100 00	0.001 52	0.001 19	0.048 16
470	0.017.00	0.040 20	0.018 17	0.116 80	0.082 90	0.001 28	0.001 16	0.047 60
490	0.021.00	0.035 50	0.015 86	0,103 40	0.068 80	0.001 08	0.001 17	0.047 36
510	0.026.00	0.030 40	0.013 41	0.092 20	0.057 00	0.000 91	0.001 20	0.047 12
530	0.030.00	0.023 60	0.008 55	0.083 40	0.048 00	0,000 77	0,001 25	0.046 80
550	0.037.00	0.019.00	0.005 84	0.073 70	0.040 10	0.000 66	0.001 28	0.046 88
570	0.057.00	0.017 30	0.005 50	0.063 80	0.033 30	0.000 58	0.001 27	0.046 96
500	0 112 00	0.015.00	0.002 96	0.061 10	0.027 90	0.000 50	0.001 24	0.046 16
570	0.236.00	0.012 50	0.005 18	0.067 40	0.023 40	0,000 44	0.001 25	0.044 08
420	0.230 00	0.012.00	0.018 14	0.076 60	0.019 50	0.000 38	0.001 22	0.041 60
450	0,274 00	0.016.00	0.022.31	0.083 50	0.016 20	0.000 33	0,001 16	0.039 20
650	0.303 00	0.010 00	0.022 91	0.087 30	0.015.20	0.000 30	0.001 09	0.036 80
670	0.370.00	0.020 00	0.027 21	0.092 70	0.010 50	0.000 26	0.000 99	0.034 08
690	0.463 00	0.013 00	0.01710	0.07270	0.010 00	0,000 20		

 $a^1$  Chl = La section efficace d'absorption de la chlorophylle représentée par la courbe B de la figure 46.  $a^2$  Chl = La section efficace d'absorption de la chlorophylle représentée par la courbe C de la figure 46.



Figure 4. Spectres des facteurs de réflexion de l'éclairement énergétique de la surface sous-jacente pour diverses teneurs en chlorophylle *a* dans une masse d'eau dont la teneur en MS et la teneur en DOC sont fixées à zéro.



. Spectres des facteurs de réflexion de l'éclairement énergétique de la surface sous-jacente pour diverses teneurs en chlorophylle *a* dans une masse d'eau dont la teneur en DOC est fixée à zéro et la teneur totale en MS est fixée à 0.20 g m<sup>-3</sup>.







Spectres des facteurs de réflexion de l'éclairement énergétique de la surface sous-jacente pour diverses teneurs en chlorophylle a dans une masse d'eau dont la teneur en DOC est fixée à zéro et la teneur totale en MS est fixée à 2.0 g m<sup>-3</sup>.



Figure 10. Spectres des facteurs de réflexion de l'éclairement énergétique de la surface sous-jacente pour diverses teneurs en chlorophylle *a* dans une masse d'eau dont la teneur en DOC est fixée à zéro et la teneur totale en MS est fixée à  $5.00 \text{ g m}^{-3}$ .

Figure 11. Spectres des facteurs de réflexion de l'éclairement énergétique de la surface sous-jacente pour diverses teneurs en chlorophylle *a* dans une masse d'eau dont la teneur en DOC est fixée à zéro et la teneur totale en MS est fixée à  $10.0 \text{ g m}^{-3}$ .

Figure 12. Spectres des facteurs de réflexion de l'éclairement énergétique de la surface sous-jacente pour diverses teneurs en chlorophylle *a* dans une masse d'eau dont la teneur en DOC est fixée à zéro et la teneur totale en MS est fixée à 20.0 g m<sup>-3</sup>.



Figure 13. Spectres des facteurs de réflexion de l'éclairement énergétique de la surface sous-jacente pour diverses teneurs en MS dans une masse d'eau renfermant une petite teneur fixe en chlorophylle *a* et une teneur nulle en DOC.

Figure 14. Spectres des facteurs de réflexion de l'éclairement énergétique de la surface sous-jacente pour diverses teneurs en MS dans une masse d'eau renfermant une grande teneur fixe en chlorophylle *a* et une teneur nulle en DOC.







Figure 17. Spectres des facteurs de réflexion de l'éclairement énergétique de la surface sous-jacente pour diverses teneurs en DOC dans une masse d'eau contenant une petite teneur fixe en chlorophylle a (0.05 mg m<sup>-3</sup>) et une grande teneur fixe en MS (10.0 g m<sup>-3</sup>).



- Figure 18. Spectres des facteurs de réflexion de l'éclairement énergétique de la surface sous-jacente pour diverses teneurs en chlorophylle *a* d'une masse d'eau dans laquelle la teneur en DOC est fixée à 2.0 g carbone m<sup>-3</sup> et la teneur totale en MS est fixée à zéro.
- Figure 19. Spectres des facteurs de réflexion de l'éclairement énergétique de la surface sous-jacente pour diverses teneurs en MS d'une masse d'eau dans laquelle la teneur en DOC est fixée à 2.0 g carbone m<sup>-3</sup> et la teneur en chlorophylle *a* est fixée à 0.05 mg m<sup>-3</sup>.
- Figure 20. Spectres des facteurs de réflexion de l'éclairement énergétique de la surface sous-jacente pour diverses teneurs en MS d'une masse d'eau dans laquelle la teneur en DOC est fixée à 2.0 g carbone m<sup>-3</sup> et la teneur en chlorophylle *a* est fixée à 10.0 mg m<sup>-3</sup>.





Figure 22. Spectres des facteurs de réflexion de l'éclairement énergétique de la surface sous-jacente pour diverses teneurs en chlorophylle a et en MS d'une masse d'eau dans laquelle la teneur en DOC est fixée à 10.0 g carbone m<sup>-3</sup>.

#### FACTEUR DE RÉFLEXION DE L'ÉCLAIREMENT ÉNERGÉTIQUE DE LA SURFACE SOUS-JACENTE À UNE SEULE LONGUEUR D'ONDE

Jusqu'à présent, on a tenu compte dans ce rapport des spectres des facteurs de réflexion (410 à 690 nm), et on a supposé qu'il était techniquement possible d'établir ces spectres *in situ*. Toutefois, la plupart des recherches optiques sont effectuées avec des appareils de mesure monobandes de l'éclairement énergétique. Dans la présente section, on évalue la possibilité d'appliquer ces appareils monobandes à l'estimation des paramètres de la qualité de l'eau en utilisant le facteur de réflexion en volume mesuré à une seule longueur d'onde. Étant donné qu'il est commode de séparer le spectre visible en une composante bleue, une composante verte et une composante rouge, on retient comme base dans les analyses à venir trois longueurs d'onde, une pour chaque composante, bleue (450 nm), verte (570 nm) et rouge (650 nm).

Les courbes des sections efficaces d'absorption en fonction de la longueur d'onde, données à la figure 2, montrent sans équivoque l'influence plus prononcée du carbone organique en solution sur le facteur de réflexion de l'éclairement énergétique dans la région bleue du spectre visible, et son influence moins prononcée dans la région rouge de ce spectre. Par conséquent, il est possible d'obtenir une certaine approximation d'une masse d'eau naturelle, dans les longueurs d'onde du rouge, au moyen d'un modèle à trois composantes (eau pure, chlorophylle et minéraux en suspension). Ceci nous permet donc de prévoir que les estimations des teneurs en chlorophylle ou en minéraux en suspension, découlant, le cas échéant, d'une mesure du facteur de réflexion à une seule longueur d'onde seront probablement plus justes si la longueur d'onde choisie est dans la partie rouge du spectre. L'analyse suivante démontre qu'une telle prévision est en fait valable.

La figure 23 illustre la famille des courbes reliant les facteurs de réflexion de l'éclairement énergétique à 450 nm (bleue) et les teneurs en chlorophylle d'une masse d'eau dans laquelle la concentration en DOC est constante à 2.0 g carbone m<sup>-3</sup> (une moyenne pas déraisonnable pour les grandes masses d'eau naturelles) et la teneur en minéraux en suspension varie de 0 à 20 g m<sup>-3</sup>. On déduit facilement de cette figure que ces facteurs de réflexion à 450 nm (bleue) réagissent très faiblement à un changement de la chlorophylle. Des courbes analogues entre le facteur de réflexion de l'éclairement énergétique dans le bleu et les teneurs en chlorophylle peuvent être tracées pour d'autres à teneurs en DOC, ce qui met bien en évidence l'inutilité de chercher à estimer les teneurs en chlorophylle à partir du seul facteur de réflexion de l'éclairement à 450 nm. Dans le même ordre d'idées, la figure 24 montre ce qui arrive lorsque le facteur de réflexion à 570 nm (vert) est utilisé pour estimer la teneur en chlorophylle à partir d'une mesure faite à une seule longueur d'onde. Comme on le voit, même si le facteur de réflexion dans le vert semble varier modérément dans le cas d'une masse d'eau ne renfermant aucun minéral en suspension, cette variation s'amenuise rapidement dès qu'il y a dans l'eau une trace de minéral en suspension (inférieure à 0.10 g m<sup>-3</sup>).

L'observation de la figure 25, analogue aux figures 23 et 24, élimine de même la mesure du facteur de réflexion à 650 nm (rouge) comme moyen d'estimer les teneurs en chlorophylle, malgré le fait que la variation de ce rapport pour les masses d'eau très pure (c'est-à-dire sans teneur de minéraux en suspension) est légèrement plus grande dans le rouge que dans le vert. On peut donc déduire des figures 23 à 25 qu'il est impossible d'estimer des teneurs en chlorophylle fiables à partir de mesures des facteurs de réflexion de l'éclairement énergétique (facteur de réflexion en volume) faites à une seule longueur d'onde.

À la figure 26 on peut voir la famille des courbes mettant en rapport les facteurs de réflexion à 450 nm (bleu) et les teneurs en minéraux en suspension pour une masse d'eau dont la teneur en DOC est constante à 2.0 g carbone m<sup>-3</sup> et la teneur en chlorophylle varie de 0.05 mg  $m^{-3}$  à 20.0 mg m<sup>-3</sup>. Cette figure semble montrer qu'il y a une variation assez intéressante du facteur de réflexion dans le bleu lorsque change la teneur en minéraux en suspension (qu'il faut rapprocher de la variation presque nulle de ce facteur de réflexion lorsque varie la teneur en chlorophylle, voir figure 24). Cependant, comme on l'a mentionné précédemment, les répercussions maximales du DOC s'observent dans la région bleue du spectre. C'est ce qu'on peut voir à la figure 27 sur laquelle on a reporté l'intervalle observable des facteurs de réflexion de l'éclairement énergétique à 450 nm (bleu) en fonction de la teneur en minéraux en suspension pour une masse d'eau dont les teneurs en DOC varient de 0 à 5 g carbone  $m^{-3}$  et les teneurs en chlorophylle *a*, de 0.05 à 20.0 mg m<sup>-3</sup>. La variation du facteur de réflexion en volume dans le bleu par suite du changement de la teneur en minéraux en suspension se révèlerait rapidement beaucoup moins intéressante qu'on ne l'avait pensé au début.

La sensibilité du facteur de réflexion à 570 nm (vert) par rapport aux changements de la teneur en minéraux en suspension pour une masse d'eau ayant une teneur fixe en DOC de 2.0 g carbone m<sup>-3</sup> est illustrée à la figure 28 pour diverses valeurs de la teneur en chlorophylle. La présence de chlorophylle joue un rôle manifestement plus important sur le facteur de réflexion pour les longueurs d'onde dans le vert, lorsque les teneurs en minéral en suspension sont

I

faibles, que celui qu'elle joue pour les longueurs d'onde dans le bleu. Toutefois, le facteur de réflexion en volume varie moins dans le vert que dans le bleu lorsque changent les teneurs en DOC. La figure 29, analogue à la figure 27, montre comment varie la plage observable des facteurs de réflexion à 570 nm (vert) en fonction de la teneur en minéraux en suspension pour une masse d'eau dans laquelle la teneur en DOC varie de 0 à 5 g carbone m<sup>-3</sup> et les teneurs en chlorophylle, entre 0.05 et 20.0 mg m<sup>-3</sup>. Même si la réponse du facteur de réflexion à 570 nm aux changements de la teneur en minéraux en suspension n'autorise pas une estimation fiable de la teneur en minéraux en suspension à partir d'un facteur de réflexion mesuré à une seule longueur d'onde de la région verte du spectre, cette réponse constitue quand même une nette amélioration par rapport à celle observée à la figure 27 (facteur de réflexion en volume dans le bleu).

Les variations du facteur de réflexion à 650 nm (rouge) lorsque change la teneur en minéraux en suspension dans une masse d'eau contenant une teneur fixe en DOC de 2.0 g carbone m<sup>-3</sup> sont montrées à la figure 30 pour différentes teneurs en chlorophylle. Le rôle très important joué par la chlorophylle sur le facteur de réflexion en volume dans le rouge, qu'on observe dans des masses d'eau contenant peu de minéraux en suspension, est la caractéristique la plus remarquable de la figure 30. En considérant seulement la répercussion minimale des teneurs en DOC sur les facteurs en volume observables dans la région rouge du spectre on peut tracer la courbe de sensibilité de la figure 31. Semblable aux figures 27 et 29, la figure 31 nous fait voir la variation des plages observables des facteurs de réflexion à 650 nm en fonction de la teneur en minéraux en suspension pour une masse d'eau dont la teneur en DOC varie entre 0 et 5 g carbone m<sup>-3</sup> et la teneur en chlorophylle varie entre 0.05 et 20.0 mg m<sup>-3</sup>. On s'aperçoit donc qu'il est possible d'affirmer que le facteur de réflexion à 650 nm manifeste une variation raisonnable en fonction de la teneur en minéraux en suspension, surtout lorsque celle-ci est plus grande que ~ 0.10 g m<sup>-3</sup>, et conséquemment, il semble y avoir possibilité, à partir de la mesure du facteur de réflexion en volume dans le rouge, d'estimer les teneurs en minéraux en suspension dans la plupart des eaux lacustres naturelles.

La nature asymptotique de la figure 31 ne fait pas de doute. Comme nous l'apprend l'équation 7, R(0,650) approche de façon asymptotique de la valeur approximative  $\frac{1}{3} \cdot \frac{Bb(650)}{a(650) + Bb(650)}$  ce qui a pour effet de rendre assez imprécise toute détermination des teneurs en minéraux en suspension au-delà de ~40 g m<sup>-3</sup>. Toutefois, dans l'intervalle général 0.10 g m<sup>-3</sup> <C<sub>MS</sub> <40 g m<sup>-3</sup>, une seule mesure du facteur à 650 nm peut fournir une estimation raisonnable de la teneur en minéraux en suspension malgré l'activité optique concurrente découlant simultanément de la présence de chlorophylle et d'une substance organique en solution dans la masse d'eau.

La sensibilité du facteur de réflexion à 650 nm par rapport à la teneur en minéraux est plus marquée si les mesures optiques *in situ* faites à une seule longueur d'onde ont lieu dans des eaux naturelles dans lesquelles l'activité biologique n'est pas excessive (comme dans l'eau de mer, les lacs et les rivières oligotrophes et mésotrophes). C'est d'ailleurs ce que montre la figure 32 où l'on peut voir la variation des plages observables des facteurs de réflexion à 650 nm en fonction de la teneur en minéraux en suspension pour une masse d'eau dans laquelle la teneur en chlorophylle ne varie que de  $0.05 \leq C_{Chl} \leq 5.0$  mg m<sup>-3</sup>. On voit immédiatement que la sensibilité est plus marquée.

On peut donc dire, en résumé, que les groupements optiques complexes des masses d'eau intérieures constituent des obstacles presque insurmontables à l'utilisation des mesures des facteurs de réflexion à une seule longueur l'onde comme paramètres de déduction des indicateurs de la qualité de l'eau. Il est tout à fait irréalisable de chercher à obtenir des estimations valables de la teneur en chlorophylle à partir de mesures à une seule longueur d'onde, quelle que soit la longueur d'onde utilisée. Également, les régions bleue et verte du spectre visible sont des domaines de longueurs d'onde ne convenant aucunement à la recherche d'une estimation des teneurs en minéral en suspension en raison principalement de l'interférence due à la substance organique en solution. En dépit des contraintes sévères qu'impose l'interférence optique des teneurs en chlorophylle (notamment lorsque les teneurs en minéraux en suspension sont faibles), il est possible d'appliquer les mesures de l'éclairement énergétique dans la région rouge du spectre à l'estimation des teneurs faibles à moyennes en minéraux en suspension.

En conclusion, même si les mesures directes du facteur de réflexion peuvent servir à la déduction des indicateurs de la qualité de l'eau, il est évident qu'il faut tenir compte de la totalité du spectre des facteurs de réflexion de l'éclairement énergétique de la surface sous-jacente.



Figure 23. Relations entre les facteurs de réflexion à 450 nm (bleu) et une teneur en chlorophylle *a* d'une masse d'eau dans laquelle la teneur en DOC est fixée à 2.0 g carbone m<sup>-3</sup> et la teneur en MS varie entre zéro et 20 g m<sup>-3</sup>.



Figure 24. Relations entre les facteurs de réflexion à 570 nm (vert) et une teneur en chlorophylle *a* d'une masse d'eau dans laquelle la teneur en DOC est fixée à 2.0 g carbone m<sup>-3</sup> et la teneur en MS varie entre zéro et 20 g m<sup>-3</sup>.

.



Figure 25. Relations entre les facteurs de réflexion à 650 nm (rouge) et une teneur en chlorophylle *a* d'une masse d'eau dans laquelle la teneur en DOC est fixée à 2.0 g carbone m<sup>-3</sup> et la teneur en MS varie entre zéro et 10 g m<sup>-3</sup>.



Figure 26. Relations entre les facteurs de réflexion à 450 nm (bleu) et la teneur en MS pour plusieurs teneurs discrètes en chlorophylle a d'une masse d'eau dans laquelle la teneur en DOC est fixée à 2.0 g carbone m<sup>-3</sup>.







Figure 28. Relations entre les facteurs de réflexion à 570 nm (vert) et la teneur en MS pour plusieurs teneurs discrètes en chlorophylle *a* d'une masse d'eau dans laquelle la teneur en DOC est fixée à 2.0 g carbone m<sup>-3</sup>.

,



Figure 29. Relations entre les facteurs de réflexion à 570 nm (vert) et la teneur en MS d'une masse d'eau dans laquelle la teneur en DOC varie entre zéro et 5 g carbone m<sup>-3</sup> et la teneur en chlorophylle *a* varie entre 0.05 et 20.0 mg m<sup>-3</sup>.



Figure 30. Relations entre les facteurs de réflexion à 650 nm (rouge) et la teneur en MS pour plusieurs teneurs discrètes en chlorophylle a d'une masse d'eau dans laquelle la teneur en DOC est fixée à 2.0 g carbone m<sup>-3</sup>.



Figure 31. Relations entre les facteurs de réflexion à 650 nm (rouge) et la teneur en MS d'une masse d'eau dans laquelle la teneur en DOC varie entre zéro et 5 g carbone  $m^{-3}$  et la teneur en chlorophylle *a* varie entre 0.05 et 20.0 mg  $m^{-3}$ .



Figure 32. Relations entre les facteurs de réflexion à 650 nm (rouge) et la teneur en MS d'une masse d'eau dans laquelle la teneur en DOC varie entre zéro et 5 g carbone m<sup>-3</sup> et la teneur en chlorophylle *a* varie entre 0.05 et 5.0 mg m<sup>-3</sup>.

#### RELATIONS ENTRE LES PARAMÈTRES OPTIQUES ET LES PARAMÈTRES DE LA QUALITÉ DE L'EAU

On se propose ici de définir au moyen d'expressions mathématiques les relations entre le facteur de réflexion en volume et les paramètres de la qualité de l'eau. Autrement dit, on veut analyser le changement des spectres des facteurs de réflexion en volume observé lorsqu'on varie simultanément les teneurs en chlorophylle, en minéraux en suspension et en carbone organique en solution. Les équations résultantes devraient témoigner des difficultés rencontrées dans la recherche des relations mathématiques établissant les paramètres de la qualité de l'eau à partir de la mesure directe du spectre des facteurs de réflexion en volume (de l'éclairement énergétique de la surface sousjacente) de même que de la nécessité de recourir à une technique d'optimisation à plusieurs variables pour extraire de ces spectres optiques les informations sur la qualité de l'eau. Le lecteur peut, sans rien perdre de la compréhension du présent document, choisir de sauter le traitement donné ici et passer à la section suivante.

Imaginons une masse d'eau homogène contenant en plus de l'eau, de la chlorophylle, des minéraux en suspension et un carbone organique en solution. Les teneurs de ces quatre éléments sont respectivement  $C_w, C_{Chl}, C_{MS}$ et  $C_{DOC}$ . Le facteur de réflexion en volume à la longueur d'onde  $\lambda$ ,  $R(\lambda)$ , est une fonction de ces teneurs et des sections efficaces optiques, à savoir,

$$R(\lambda) = f(C_{w}^{a}_{w}, C_{Chl}^{a}_{Chl}, C_{MS}^{a}_{MS}, C_{DOC}^{a}_{DOC},$$
(8)
$$C_{w}(Bb)_{w}, C_{Chl}(Bb)_{Chl}, C_{MS}(Bb)_{MS})$$

où on a choisi, pour simplifier la notation, de ne pas inscrire la dépendance des sections efficaces optiques à l'égard de la longueur d'onde.

Le taux de changement du facteur de réflexion en volume par rapport à la longueur d'onde  $\frac{dR(\lambda)}{d\lambda}$  (c'est-àdire la pente à la longueur d'onde  $\lambda$  du spectre des facteurs de réflexion en volume mesuré), est défini ainsi :

$$\frac{\mathrm{dR}(\lambda)}{\mathrm{d\lambda}} = \frac{\partial R}{\partial a_{\mathrm{W}}} \cdot \frac{\partial a_{\mathrm{W}}}{\partial \lambda} + C_{\mathrm{ChI}} \frac{\partial R}{\partial a_{\mathrm{ChI}}} \cdot \frac{\partial a_{\mathrm{ChI}}}{\partial \lambda}$$
$$+ C_{\mathrm{MS}} \frac{\partial R}{\partial a_{\mathrm{MS}}} \cdot \frac{\partial a_{\mathrm{MS}}}{\partial \lambda} + C_{\mathrm{DOC}} \frac{\partial R}{\partial a_{\mathrm{DOC}}} \cdot \frac{\partial a_{\mathrm{DOC}}}{\partial \lambda}$$
$$+ \frac{\partial R}{\partial (\mathrm{Bb})_{\mathrm{W}}} \cdot \frac{\partial (\mathrm{Bb})_{\mathrm{W}}}{\partial \lambda} + C_{\mathrm{ChI}} \frac{\partial R}{\partial (\mathrm{Bb})_{\mathrm{ChI}}} \cdot \frac{\partial (\mathrm{Bb})_{\mathrm{ChI}}}{\partial \lambda}$$

$$+ C_{MS} \frac{\partial R}{\partial (Bb)_{MS}} \cdot \frac{\partial (Bb)_{MS}}{\partial \lambda}$$
(9)

où C<sub>W</sub> a été fixé à 1, et où les dérivées partielles des sections efficaces optiques (qui sont fonction de  $\lambda$ ) sont définies par la forme des courbes illustrées aux figures 2 et 3 (à l'exception de la figure 3 dans laquelle chaque point doit être multiplié par son B( $\lambda$ ) correspondant).

L'équation 7 nous apprend que le facteur de réflexion en volume  $R(\lambda)$  est donné par :

$$R(\lambda) = \sum_{n=0}^{3} r_n \left[ \frac{(Bb)(\lambda)}{a(\lambda) + (Bb)(\lambda)} \right]^n$$
$$= \sum_{n=0}^{3} r_n \left[ \frac{u(\lambda)}{v(\lambda)} \right]^n$$
(10)

où  $u(\lambda) = (Bb)_w + C_{Chl}(Bb)_{Chl} + C_{MS}(Bb)_{MS}$ 

$$a_{\rm W}(\lambda) = a_{\rm W} + C_{\rm Chl}a_{\rm Chl} + C_{\rm MS}a_{\rm MS} + C_{\rm DOC}a_{\rm DOC}$$
  
+ (Bb)<sub>W</sub> + C\_{\rm Chl}(Bb)\_{\rm Chl} + C\_{\rm MS}(Bb)\_{\rm MS}

En prenant la dérivée partielle de l'équation 10 par rapport à chacune des sections efficaces optiques, il vient :

$$\frac{\partial R}{\partial a_{W}} = -\frac{Nu}{v^{2}}$$

$$\frac{\partial R}{\partial a_{Ch1}} = -\frac{NC_{Ch1}u}{v^{2}}$$

$$\frac{\partial R}{\partial a_{MS}} = -\frac{NC_{MS}u}{v^{2}}$$

$$\frac{\partial R}{\partial a_{DOC}} = -\frac{NC_{DOC}u}{v^{2}}$$

$$\frac{\partial R}{\partial (Bb)_{W}} = -\frac{N(v-u)}{v^{2}}$$

$$\frac{\partial R}{\partial (Bb)_{Ch1}} = -\frac{NC_{Ch1}(v-u)}{v^{2}}$$

$$\frac{\partial R}{\partial (Bb)_{MS}} = -\frac{NC_{MS}(v-u)}{v^{2}}$$

et  $r_1$ ,  $r_2$  et  $r_3$  sont les coefficients du développement donné par l'équation 7.

En substituant le système d'équations 11 dans l'équation 9, on trouve :

$$\frac{dR(\lambda)}{d\lambda} = -\frac{Nu}{v^2} \left[ \frac{\partial a_W}{\partial \lambda} + C_{Chl}^2 \frac{\partial a_{Chl}}{\partial \lambda} + C_{MS}^2 \frac{\partial a_{MS}}{\partial \lambda} + C_{DOC}^2 \frac{\partial a_{DOC}}{\partial \lambda} \right]$$
(12)  
$$+ \frac{N(v-u)}{v^2} \left[ \frac{\partial (Bb)_W}{\partial \lambda} + C_{Chl}^2 \frac{\partial (Bb)_{Chl}}{\partial \lambda} + C_{MS}^2 \frac{\partial (Bb)_{MS}}{\partial \lambda} \right]$$

où u, v et N sont des fonctions de  $\rm C_{Chi}, \rm C_{MS}$  et  $\rm C_{DOC}$  déjà définis.

L'équation 12 met donc en rapport la pente d'un spectre des facteurs de réflexion de l'éclairement énergétique dans la surface sous-jacente, mesuré directement à la longueur  $\lambda$ , et les teneurs en chlorophylle, en minéraux en suspension et en carbone organique en solution qui sont à l'origine du spectre observé. Chercher, à l'aide de l'équation 12, à estimer les teneurs  $C_{ChI}$ ,  $C_{MS}$  et  $C_{DOC}$  teneurs qui décrivent la masse d'eau à partir de trois équations simultanées (pour trois valeurs discrètes de  $\lambda$  par exemple) est une tâche semée d'embûches. Du fait que les sections efficaces optiques dépendent de la longueur d'onde, il tombe sous le sens qu'on doit non seulement faire un choix judicieux des longueurs d'onde  $(\lambda)$ , mais également déterminer très précisément les pentes. Au surplus, il est dR(λ) \_\_\_\_; dλ obligatoire d'avoir des valeurs très précises de d'ailleurs le problème se complique du fait que ces pentes peuvent être très petites en plus d'être soit positives ou négatives. Les valeurs de N, v et u sont elles-mêmes des fonctions de C<sub>Chl</sub>, C<sub>MS</sub> et C<sub>DOC</sub> (c'est-à-dire des paramètres que l'on cherche). Toutefois, ce dernier problème peut

être surmonté, tout au moins en principe. Puisque  $u(\lambda) = (Bb)(\lambda)$  et  $v(\lambda) = a(\lambda) + (Bb)(\lambda)$ , on peut obtenir les valeurs nécessaires de u, v et N grâce à une détermination des propriétés inhérentes en volume (Bb)( $\lambda$ ) (coefficient de rétrodiffusion totale) et  $a(\lambda)$  (coefficient d'absorption totale) selon la méthode décrite dans les premières sections de ce rapport.

L'équation 12 nous permet donc, en principe, de définir trois équations (correspondant à trois longueurs d'onde bien choisies) que l'on peut résoudre simultanément pour trouver les indicateurs de la qualité de l'eau  $C_{ChI}$ ,  $C_{MS}$  et  $C_{DOC}$ . Toutefois, le fardeau qu'impose la détermination précise de petites pentes pour les spectres

des paramètres optiques mesurés et disponibles a pour effet de diminuer la fiabilité et la reproductibilité de ces calculs mathématiques. Le besoin de déterminer  $a(\lambda)$  et (Bb)( $\lambda$ ) lors de chaque mesure *in situ* du spectre de l'éclairement énergétique de la surface sous-jacente rend encore plus déplaisante l'utilisation de l'équation 12. L'idéal est de rechercher une méthode de déduction des indicateurs de la qualité de l'eau à partir du spectre des facteurs de réflexion en volume pour une seule longueur d'onde. L'objet de la section suivante est précisément de décrire une telle méthode.

#### LA TECHNIQUE D'OPTIMISATION À PLUSIEURS VARIABLES

Voici le problème fondamental à résoudre :Soit un spectre mesuré  $R(0,\lambda)$  défini mathématiquement par l'équation 7 (c'est-à-dire que  $R(0,\lambda)$  est une fonction développée en série de  $a(\lambda)$  et  $Bb(\lambda)$ , eux-mêmes des fonctions des sections efficaces optiques et des teneurs en chlorophylle, en minéraux en suspension et en DOC), trouver les teneurs en chlorophylle, en minéraux en suspension et en DOC qui donnent le spectre se rapprochant le plus du spectre mesuré.

Évidemment, une technique d'optimisation à plusieurs variables permettant d'obtenir «le meilleur ajustement» des teneurs en chlorophylle, en minéraux en suspension et en carbone organique en solution devrait convenir aussi bien à la résolution du problème inverse, c'est-à-dire à la déduction, à partir des spectres mesurés et des teneurs correspondantes en chlorophylle, en minéraux en suspension et en carbone organique en solution qui provoquent ces spectres, des valeurs des sections efficaces d'absorption et de diffusion (en fonction de  $\lambda$ ) qui donnent le spectre des facteurs de réflexion se rapprochant le plus de celui mesuré.

On décrit en détail ici la technique d'optimisation à plusieurs variables à laquelle on a recours à la Section d'optique environnementale de l'Institut national de recherches sur les eaux pour (a) chercher à déduire les indicateurs de la qualité de l'eau à partir des mesures *in situ* des spectres des facteurs de réflexion de l'éclairement énergétique de la surface sous-jacente dans la gamme de 400 à 700 nm et (b) chercher à déterminer les sections efficaces optiques à partir de mesures *in situ* des facteurs de réflexion et des mesures *in situ* des facteurs de réflexion et des mesures de la qualité de l'eau relevées en même temps.

Dans la section précédente, on a fait état de quelquesunes des difficultés mathématiques que soulève la recherche d'une solution analytique de l'équation 7. Toutefois, il existe des techniques numériques qui permettent d'éviter ces difficultés. Réécrivons l'équation 7 sous forme vectorielle, ce qui donne :

$$R(0,\underline{a}(\lambda),\underline{Bb}(\lambda),\underline{C}) = \sum_{n=0}^{3} r_{n}(0) [1 + (\underline{a}(\lambda) \cdot \underline{C})/(\underline{Bb}(\lambda) \cdot \underline{C})]^{-n}$$
(13)

où

 $\underline{\mathbf{a}}(\lambda) = (\mathbf{a}_{W}(\lambda), \mathbf{a}_{ChI}(\lambda), \mathbf{a}_{MS}(\lambda), \mathbf{a}_{DOC}(\lambda))$   $\underline{\mathbf{Bb}}(\lambda) = (\mathbf{Bb}_{W}(\lambda), \mathbf{Bb}_{ChI}(\lambda), \mathbf{Bb}_{MS}(\lambda), 0)$   $\underline{\mathbf{C}} = (\mathbf{1}, \mathbf{C}_{ChI}, \mathbf{C}_{MS}, \mathbf{C}_{DOC})$ 

À partir d'un spectre mesuré  $\{S_i\}$  formé d'un ensemble de facteurs de réflexion de l'éclairement énergétique pour des valeurs discrètes de  $\lambda$  (par exemple le spectre à 15 points parcourant l'intervalle de 410 à 690 nm par pas de 20 nm), il est donc possible d'écrire ainsi les écarts résiduels pondérés entre les facteurs de réflexion en volume mesuré et les facteurs théoriques  $R(0, \underline{a_i}, \underline{Bb_i}, \underline{C})$ 

$$g_{i}(\underline{C}) = [S_{i} - R(0_{a}a_{i}, \underline{B}b_{i}, \underline{C})]/R(0_{a}a_{i}, \underline{B}b_{i}, \underline{C})$$
(14)

Dans cette équation on a supposé que les fonctions vectorielles d'absorption et de rétrodiffusion <u>a</u> et <u>Bb</u> sont connues pour la masse d'eau homogène considérée, et que l'on désire trouver (pour les longueurs d'onde correspondant à {  $S_i$ } la solution aux moindres carrés multidimensionnelle en minimisant par rapport à <u>C</u> la fonction

$$f(\underline{C}) = \sum_{i} g_{i}^{2} (\underline{C})$$
(15)

La valeur du vecteur teneur <u>C</u> qui rend  $f(\underline{C})$  minimale sera donc définie comme celle ayant les teneurs des paramètres de la masse d'eau qui donnent lieu au spectre des facteurs de réflexion mesuré  $\{S_i\}$ .

Le sous-programme ZXSSQ (l'un des programmes de la bibliothèque internationale des mathématiques et des statistiques [IMSL, 1980]) correspond à un algorithme aux différences, finies de Levenberg-Marquardt qui convient à des applications d'optimisation non linéaires à plusieurs variables par les moindres carrés (Levenberg, 1944; Marquardt, 1963). À partir d'une valeur initiale appropriée Co, cet algorithme détermine systématiquement un minimum local de f(C). Il se peut toutefois que cette valeur f(C) ne soit pas la plus petite possible dans la fourchette de validité de C. C'est la raison pour laquelle on choisit plusieurs points de départ {Coi} et qu'on détermine le minimum correspondant au moyen de l'algorithme  $\{f_i(\underline{C})\}$ . Le vecteur C correspondant au plus petit de ces minimums f<sub>1</sub>(C) est donc choisi comme la solution appropriée. Il n'y a aucune certitude qu'un point de départ particulier, supposons  $\underline{C}_{oj}$ , permettra à l'algorithme de trouver un minimum pour f(<u>C</u>), puisqu'il pourrait y avoir divergence. En outre, il se pourra qu'un vecteur <u>C</u> qui est valable mathématiquement n'ait aucune signification physique (par exemple teneurs négatives). Pour pallier ces difficultés, on a mis en oeuvre des suggestions proposées dans les notes du programme IMSL afin de borner le vecteur <u>C</u> de la façon suivante

$$C_{iMIN} \leq C_i \leq C_{iMAX}$$
 pour i = 2,3,4

où l'indice i dénote la ith composante de la masse d'eau (par exemple  $C_2 = C_{Chl}$ ,  $C_3 = C_{MS}$  et  $C_4 = C_{DOC}$ ), et où une transformation de l'espace borné <u>C</u> en un espace non borné <u>W</u> (- $\infty < W_i < +\infty$ ) est réalisée à l'aide de la relation de fonction d'erreur que voici

$$C_{i} = C_{iMIN} + C_{iMAX} - C_{iMIN} (1 + erf(W_{i}))/2$$
(16)

L'algorithme de Levenberg-Marquardt peut être utilisé de la même manière pour déduire les sections efficaces des paramètres à partir de mesures des facteurs de réflexion en volume et des teneurs. Pour ce faire, réécrivons ainsi l'équation 7

$$R(0,\underline{C}(\underline{u}),\underline{X}) = \sum_{n=0}^{3} r_{n}(0)[1 + (\underline{C}(\underline{u})\cdot\underline{X})/(\underline{C}'(\underline{u})\cdot\underline{X})]^{-n}$$
où
(17)

$$\underline{X} = (a_{w}, a_{Chl}, a_{MS}, a_{DOC}, B_{W}, B_{Chl}, B_{MS}, 0)$$

$$\underline{C}(\underline{u}) = (1, C_{Chl}(\underline{u}), C_{MS}(\underline{u}), C_{DOC}(\underline{u}), 0, 0, 0, 0)$$

$$\underline{C}'(\underline{u}) = (0, 0, 0, 0, 1, C_{Chl}(\underline{u}), C_{MS}(\underline{u}), C_{DOC}(\underline{u}))$$

Dans le cas présent, <u>u</u>est le vecteur définissant la position géographique du vecteur teneur <u>C(u)</u> et <u>C'(u)</u> est simplement une rotation du vecteur <u>C(u)</u> dans l'espace multidimensionnel.

Soit un ensemble de facteurs de réflexion en volume  $\{S_j\}$  pour la longueur d'onde  $\lambda_i$  et les teneurs correspondantes  $\{\underline{C}_j\}$  à un nombre j de stations, pour lesquelles on suppose que les sections efficaces sont invariables; on peut donc écrire les écarts résiduels pondérés  $g_i(\underline{X})$  ainsi :

$$g_{i}(\underline{X}) = [S_{i} - R(0, \underline{C}_{i}, \underline{X})]/R(0, \underline{C}_{i}, \underline{X})$$
(18)

la solution aux moindres carrés est donc à nouveau déterminée en minimisant par rapport à  $\underline{X}$  la fonction

$$f(\underline{X}) = \sum_{j} g_{j}^{2} (\underline{X})$$
(19)

25

Comme précédemment, on impose les bornes appropriées à  $\underline{X}$ 

$$X_{iMIN} \le X_i \le i_{MAX}$$
 pour i = 1,2...7

(par ex.  $X_1 = a_w$ ,  $X_2 = a_{Ch1}$ ,  $X_7 = Bb_{MS}$ )

et l'algorithme agit dans l'espace  $\underline{W}$  conformément à la transformation par la fonction d'erreur

$$X_{i} = X_{iMIN} + (X_{iMAX} - X_{iMIN})(1 + erf (W_{i}))/2$$
(20)

La solution aux moindres carrés résultante pour  $\underline{X}$  n'est évidemment applicable qu'à la longueur d'onde particulière à laquelle correspondent les  $\{S_j\}$ , de sorte que la même procédure doit être répétée pour chaque longueur d'onde pour laquelle on veut connaître  $\underline{X}$ . De cette façon, il est possible de déterminer tout le spectre des sections efficaces  $X(\lambda)$ .

Malgré le fait qu'on utilise dans chaque cas une procédure Levenberg-Marquardt analogue, la détermination de  $\underline{X}$  est fondamentalement plus complexe que celle de C, puisque la dimension de l'espace X est égale à deux fois la dimension de l'espace C. Un spectre des facteurs de réflexion en volume de 15 points relevés à une seule station suffit à déduire les trois composantes variables de C de cette station. En revanche, il faut beaucoup plus de données que celles provenant de 15 stations pour déduire les sept composantes variables de X tout en empêchant que diverge l'algorithme. En l'absence d'un nombre suffisant de stations, on diminue les dimensions de X en fournissant des sections efficaces fixes pour certaines composantes de X (par exemple on peut utiliser les spectres des sections efficaces d'absorption et de rétrodiffusion de l'eau pure pour au et Bb<sub>w</sub>).

Une difficulté supplémentaire peut surgir dans les déterminations du spectre des valeurs efficaces  $\underline{X}(\lambda)$  lorsque, à certaines longueurs d'onde, les sections efficaces d'absorption ou de rétrodiffusion d'une composante diminuent à un point tel que leur contribution aux facteurs de réflexion en volume est du même ordre de grandeur que les imprécisions des valeurs mesurées. L'algorithme de Levenberg-Marquardt est alors bien incapable de départager la section efficace de ce composant et on aura plutôt recours aux bornes imposées  $X_{iMIN}$  ou  $X_{iMAX}$ . Pour cette raison, les sections efficaces trouvées pour les autres composantes sont peu fiables pour ces longueurs d'onde. Ces lacunes dans le spectre de  $\underline{X}(\lambda)$  peuvent être comblées par interpolation ou extrapolation à partir des sections calculées et exactes du spectre  $\underline{X}(\lambda)$ .

On voit donc ainsi que le vecteur teneur <u>C</u> peut être bel et bien déduit à partir du spectre des facteurs de réflexion en volume mesuré, tout comme peut être déduit le spectre des sections efficaces  $X(\lambda)$  à partir des facteurs de réflexion en volume et des teneurs.

#### L'APPLICATION DU MODÈLE DE LA QUALITÉ DE L'EAU À L'ESTIMATION DES TENEURS EN CHLORO-PHYLLE, EN MINÉRAL EN SUSPENSION ET EN CARBONE ORGANIQUE EN SOLUTION DANS LE LAC ONTARIO

Au cours de la campagne sur le terrain de 1979, on a prélevé dans la partie occidentale du lac Ontario un ensemble de données indépendantes sur les paramètres de la qualité de l'eau et mesuré des spectres des facteurs de réflexion de l'éclairement énergétique de la surface sousjacente. À l'aide des spectres optiques mesurés directement, des sections efficaces optiques (pour le modèle à quatre composantes), illustrées aux figures 2 et 3, et de la technique d'optimisation à plusieurs variables de Levenberg-Marquardt analysée dans la section précédente, on a prévu les teneurs en minéraux en suspension, en carbone organique en solution et en chlorophylle a (non corrigées pour la présence de phéophytine), puis comparé ces valeurs prévues aux valeurs, trouvées lors d'analyses en laboratoire, des échantillons d'eau prélevés au même moment où on mesurait les spectres optiques.

La figure 33 compare les teneurs prévues en minéral en suspension aux valeurs mesurées directement. Le cône de prévisibilité, défini par les lignes tiretées, représente la prévisibilité avec un facteur de deux par rapport à la ligne de prévision exacte, c'est-à-dire une incertitude sur la prévisibilité de  $\pm \log 2$ .

Les figures 34 et 35 font voir la même chose mais cette fois-ci respectivement pour la teneur en carbone organique en solution et la teneur en chlorophylle.

On apprend à partir des figures 33 à 35 ce qui suit

- (a) Le modèle de la qualité de l'eau à quatre composantes et les sections efficaces optiques des figures 2 et 3 constituent des outils de prévision excellents pour ce qui est des teneurs en minéraux en suspension et un outil de prévision possiblement acceptable pour les teneurs en carbone organique en solution.
- (b) Par contre, ce modèle et ses sections efficaces sont pour ainsi dire incapables de prévoir de façon valable les teneurs en chlorophylie a.



Figure 33. Comparaison entre les teneurs en MS prévues et les teneurs mesurées directement (en faisant usage des sections efficaces des figures 2 et 3).



Figure 34. Comparaison entre les teneurs en DOC prévues et celles mesurées directement (en faisant usage des sections efficaces des figures 2 et 3).

On peut voir sans équivoque sur la figure 35 (caractérisée par une sous-prévision étonnante de la teneur en chlorophylle a) que les teneurs nulles en chlorophylle a

۱



Figure 35. Comparaison entre les teneurs en chlorophylle à prévues et des teneurs mesurées directement (en faisant usage des sections efficaces des figures 2 et 3).

non seulement ne correspondent pas à la prévision du processus d'optimisation de Levenberg-Marquardt mais, en plus, n'interfèrent aucunement dans la prévision de valeurs valables des teneurs en minéraux en suspension et en carbone organique en solution. Cette constatation suggère trois possibilités importantes : (i) les spectres des facteurs de réflexion mesurés directement dans le lac Ontario peuvent être simulés de façon satisfaisante (en général) en variant seulement les teneurs en minéraux en suspension et en carbone organique en solution; (ii) (en réalité une variante de (i)), les sections efficaces optiques de la chlorophylle a jouent un rôle moins important dans la détermination des propriétés optiques des lacs intérieurs (notamment lorsque les teneurs en chlorophylle sont petites) que les propriétés optiques du minéral en suspension et du carbone organique en solution; et (iii) les sections efficaces optiques de la chlorophylle (tirées des figures 2 et 3 et déterminées pour le lac Ontario à partir du premier ensemble de données) ne conviennent pas au second ensemble de données. En fait, les trois possibilités précitées sont toutes dans un certain sens exactes comme on le démontre ci-après.

La suggestion (i) est concrétisée sur la figure 36 où l'on voit le spectre calculé du «meilleur ajustement» (points reliés) et le spectre expérimental (points non reliés) pour une station type de la partie occidentale du lac Ontario assez près de la berge (dans la péninsule du Niagara).



Figure 36. Comparaison entre les spectres des facteurs de réflexion de «meilleur ajustement» calculés et ceux mesurés directement pour une station de la péninsule du Niagara de la partie occidentale du lac Ontario (en faisant usage des sections efficaces des figures 2 et 3).

Les paramètres de la qualité de l'eau prévus (calculés) qui donnent lieu au spectre du «meilleur ajustement» sont énumérés de concert avec les valeurs mesurées de ces paramètres à la station, de sorte que l'on voit immédiatement que les analyses de Levenberg-Marquardt donnent des teneurs raisonnables en minéraux en suspension et en DOC tout en prévoyant une teneur en chlorophylie a nulle.

Dans cet exemple particulier, la présence de chlorophylle dans la masse d'eau diminue l'aptitude du modèle de la qualité de l'eau à simuler le spectre des facteurs de réflexion mesuré expérimentalement à la station. C'est ce que nous apprend la figure 37 où deux spectres optiques calculés (ceux des sections efficaces des figures 2 et 3) sont comparés au spectre réel mesuré. La ligne pleine décrit le spectre prévu pour une masse d'eau ayant des teneurs en chlorophylle a, en minéraux en suspension et en carbone organique en solution voisines de celles mesurées réellement à la station (on a choisi pour Chl a 5.0 mg par mètre cube; pour MS 5.0 g par mètre cube; et pour DOC 2.0 g carbone par mètre cube). Par ailleurs, la ligne tiretée correspond au spectre prévu d'une masse d'eau dont les teneurs en chlorophylle a, en minéraux en suspension et en carbone organique en solution sont voisines des teneurs prévues par la technique d'optimisation de Levenberg-Marquardt (on a





retenu pour Chl *a* zéro; pour MS 5.0 g par mètre cube; et pour DOC 3.0 g carbone par mètre cube). Une amélioration nette de l'ajustement de la courbe se produit sur le champ dès qu'on enlève la chlorophylle de la masse d'eau.

La forme générale du spectre mesuré directement (c'est-à-dire celle manifestant un pic dans le domaine des longueurs d'onde du vert), que l'on peut voir à la figure 36, est apparue presque toutes les fois que l'on a fait des mesures dans le lac Ontario durant la campagne sur le terrain; et cela aussi bien pour les stations près des berges que pour les stations passablement au large. C'est justement ce que révèle la figure 38 dans laquelle sont illustrés des spectres mesurés directement aussi bien pour des stations près de la berge que pour des stations au milieu du lac, stations visitées durant les mois de mai, juillet et septembre. Il se peut que les grandeurs réelles des facteurs de réflexion de l'éclairement énergétique observées varient (en raison de la variabilité spatio-temporelle des paramètres de la qualité de l'eau en fonction des stations), mais on reconnaît immédiatement dans chaque spectre le pic très marqué correspondant aux longueurs d'onde moyennes. On apprécie sans problème la valeur de la suggestion importante (ii) en examinant les figures 37 et 38 par rapport aux figures 18 et 19.

ł

7



Figure 38. Exemples types des spectres des facteurs de réflexion mesurés directement à des stations près des berges et au milieu du lac Ontario durant toute la campagne sur le terrain.

Comme nous l'apprennent les figures 18 et 19, l'addition soit d'un minéral en suspension ou de chlorophylle a à une masse d'eau renfermant environ ~2.0 g carbone par mètre cube donne lieu à un maximum identifiable dans la région des longueurs d'onde moyennes du spectre visible. Au surplus, à l'examen de ces figures il apparaît que les teneurs relatives en chlorophylle a et en minéral en suspension, que l'on trouve normalement dans les lacs intérieurs, font en sorte que le rôle joué par les teneurs en minéral en suspension est plus important que le rôle joué par les teneurs en chlorophylle dans la production du maximum dans le «vert» du spectre mesuré des facteurs de réflexion en volume.

La valeur de la suggestion (iii) est analysée en ayant recours à la méthode d'optimisation de Levenberg-Marquardt afin d'obtenir un nouvel ensemble de sections efficaces optiques pour la chlorophylle a (non corrigées pour la présence de phéophytine). Les données optiques et de la qualité de l'eau prélevées aux emplacements d'essai de la partie occidentale du lac Ontario, durant mai et juillet 1979, ont servi à une telle étude. Pour déterminer les nouvelles valeurs de a<sub>Chl</sub> et b<sub>Chl</sub> dans tout le domaine du spectre visible, on a retenu les sections efficaces des miné-

raux en suspension et du carbone organique en solution des figures 2 et 3 et on a utilisé la technique d'optimisation. Toutefois, pour le deuxième ensemble de données, il existait délà des informations supplémentaires sur la composition du ravonnement incident au-dessus de la surface, et on a décidé d'en faire usage. Parce que les coefficients  $r_n(0)$ de l'équation 7 sont fonction de la répartition du rayonnement incident (Gordon et coll., 1975) (conséquence directe du fait que le facteur de réflexion en volume est l'une des propriétés apparentes de la masse d'eau) le facteur de réflexion mesuré est influencé à la fois par l'angle zénithal du soleil (heure du jour) et la fraction diffuse de l'éclairement énergétique ascendant. Ceci reste vrai quels que soient les changements de la teneur en substances en suspension et en solution de la masse d'eau (reportez-vous aussi à l'analyse de Jerome et coll., 1982).

La figure 39 (adaptation du tableau B.3.2 de Moniteq Ltd. [1981]) fait voir la fraction de l'éclairement descendant au-dessus de l'eau, qui est diffusée pour chaque mois durant la période de prélèvement de l'ensemble des données indépendantes. Cette dernière figure sert ensuite à construire un ensemble approprié de coefficients  $r_n(0)$  correspondant à chaque fraction, que l'on introduit dans l'équation 7 avant de lancer l'analyse inverse de Levenberg-Marquardt.



Figure 39. Variation de la fraction diffuse de l'éclairement énergétique descendant au-dessus de l'eau en fonction de la longueur d'onde durant toute la campagne sur le terrain.

Les résultats de l'analyse de Levenberg-Marquardt donnent des valeurs  $b_{Chl}$  qui sont révélées essentiellement conformes aux valeurs  $b_{Chl}$  obtenues antérieurement. Par contre, les valeurs  $a_{Chl}$  s'écartent sensiblement des valeurs a  $_{Chl}$  obtenues antérieurement comme nous le fait voir la figure 40. Ces deux ensembles de données sont très voisins dans le domaine des hautes longueurs d'onde du spectre (rouge), tandis que les valeurs  $a_{Chl}$  tirées du deuxième ensemble des données (c'est-à-dire de la méthode d'optimisation) pour  $\lambda < \sim 600$  nm sont presque toutes deux fois plus faibles que les valeurs  $a_{Chl}$  obtenues d'après le premier ensemble des données (méthode de la régression multiple).

À nouveau, à partir des valeurs optimisées de Levenberg-Marquardt pour  $a_{Chl}$  (pour  $b_{Chl}$  et pour toutes les autres sections efficaces des figures 2 et 3) et des spectres mesurés directement, et en ayant recours à la technique d'optimisation (tout en tenant compte du fait que les  $r_n(0)$  sont fonction de la répartition du rayonnement incident), on a estimé les indicateurs de la qualité de l'eau



Figure 40. Comparaison des sections efficaces d'absorption de la chlorophylle *a* pour deux ensembles de données sur la qualité de l'eau et de données optiques.

qui produisent les simulations «les mieux ajustées» aux spectres des facteurs de réflexion en volume observés.

La figure 41 (que l'on peut comparer directement à la figure 36) permet de rapprocher le spectre mesuré directement (points non reliés) et le spectre calculé du «meilleur ajustement» (points reliés) qui découle de l'utilisation des valeurs modifiées de a<sub>Chl</sub>. Il appert que la technique d'optimisation, utilisée concurremment avec des valeurs acceptables de prévision pour les teneurs en minéraux en suspension et en carbone organique en solution de la station, prévoit une valeur acceptable de la teneur en chlorophylle.

Les figures 42, 43 et 44 nous donnent une illustration de l'écart entre les concentrations prévues et les concentrations mesurées, respectivement, des minéraux en suspension, du carbone organique en solution et de la chlorophylle a. Ces, figures peuvent être rapprochées des figures 33 à 35, la seule différence entre ces deux ensembles de résultats étant que les figures 42 à 44 ont été construites en tenant compte du fait que les  $r_n(0)$  sont fonction de la répartition de la luminance énergétique incidente et en utilisant la courbe pointillée (figure 40) qui figure la dépendance spectrale de  $a_{Chl}$ .



Figure 41. Comparaison entre les spectres des facteurs de réflexion de «meilleur ajustement» calculés et ceux mesurés directement pour la station de la péninsule du Niagara, celle de la figure 36 (en faisant usage des sections efficaces d'absorption modifiées de la chlorophylle a).



Figure 42. Comparaison entre les teneurs en MS prévues et les teneurs mesurées directement (en faisant usage des sections efficaces d'absorption modifiées de la chlorophylle *a*, celles de la figure 40).



Figure 43. Comparaison entre les teneurs en DOC prévues et les teneurs mesurées directement (en faisant usage des sections efficaces d'absorption modifiées de la chlorophylle *a*, celles de la figure 40).



Figure 44. Comparaison entre les teneurs en chlorophylle *a* prévues et celles mesurées directement (en faisant usage des sections efficaces d'absorption modifiées de la chlorophylle *a*, celles de la figure 40).



Figure 45. Comparaison entre les teneurs mensuelles prévues de la chlorophylle *a* et les teneurs mesurées directement (en faisant usage des sections efficaces d'absorption modifiées de la chlorophylle *a*, celles de la figure 40).

L'étude des figures 42 à 44 nous permet de constater ce qui suit :

- (a) Que les qualités de prévision du modèle optique à quatre composantes pour les teneurs en minéraux en suspension et en carbone organique en solution, bien que changées dans une certaine mesure par l'utilisation de sections efficaces d'absorption de la chlorophylle a modifiées, ne semblent pas être touchées de façon significative (dans le sens statistique du terme).
- (b) Que l'utilisation de ces sections efficaces modifiées semble améliorer d'une façon très nette le pouvoir de prévision du modèle pour ce qui est des teneurs en chlorophylle a. La majeure partie des teneurs en chlorophylle a prévues de façon erronée (figure 44) ont été observées durant le mois de septembre. C'est ce qui apparaît plus clairement à la figure 45 qui ventile l'information de la figure 44 suivant les mois de mai, juillet et septembre au cours desquels on a fait des mesures des facteurs en réflexion en volume.

#### DIFFICULTÉS PROPRES AUX PRÉVISIONS DE LA CHLOROPHYLLE

Les principes physiques sur lesquels sont fondés les modèles optiques à plusieurs composantes sont valables dans les limites des contraintes imposées et des connaissances actuelles du milieu aquatique. Les propriétés d'absorption et de diffusion des substances en suspension et en solution des masses d'eau intérieures régissent, en même temps que les propriétés de l'éclairement énergétique incidentes au-dessus de la surface, les spectres des facteurs de réflexion de l'éclairement énergétique de la surface sous-jacente que l'on mesure expérimentalement. Les indicateurs de la qualité de l'eau (substances organiques et inorganiques des masses d'eau naturelles) font office, partout dans la colonne d'eau, de centres d'absorption et de diffusion. De cela, il découle logiquement que, dans les limites des ambiguïtés éventuelles, les spectres simulés, dus à des teneurs connues des indicateurs de la qualité de l'eau, peuvent être comparés mathématiquement aux spectres mesurés dans le but d'estimer les teneurs in situ qui donnent lieu aux spectres observés.

Cependant l'aspect essentiel d'une telle méthode de prévision est la connaissance précise des sections efficaces optiques (absorption et diffusion par unité de teneur) des substances constitutives de la masse d'eau considérée. Bien que l'on note un accroissement à l'échelle mondiale des travaux de recherche sur ce genre d'information, les résultats existants ne sont pas applicables, pour le moment, à toutes les situations. On voit bien qu'il existe un accord général sur la gamme observée de ces sections efficaces et sur le fait que ces sections ne sont pas seulement fonction de la géographie des sous-substances, mais également du temps. Un des principaux obstacles à une recherche optique de ce genre réside donc dans l'inaptitude inhérente à produire expérimentalement des valeurs équivalentes ou des valeurs extrapolées exactes pour les paramètres critiques. Nos propres travaux effectués sur le lac Ontario mettent bien en évidence cette inaptitude. Deux ensembles indépendants de données sur la qualité de l'eau et sur les valeurs optiques correspondantes ont été prélevées dans la partie occidentale du lac Ontario durant la campagne sur le terrain de 1979. Même s'il est vrai que des spectres de longueurs d'onde analogues pour les sections efficaces d'absorption et de diffusion du minéral en suspension et du carbone organique en solution et les spectres pour les sections efficaces de diffusion de la chlorophylle semblent convenir assez bien aux deux ensembles de données, les spectres des sections efficaces d'absorption de la chlorophylle de ces deux ensembles sont passablement dissemblables (voir figure 40). Compte tenu de ces contraintes sur les sections efficaces, le modèle optique à quatre composantes permet d'obtenir une prévision de l'indicateur de la qualité de l'eau précise à un facteur de deux. Une prévision de la qualité de l'eau de cette valeur est, comme on s'en doute bien, un point litigieux que nous ne traiterons pas plus avant.

L'imprécision observée (c'est-à-dire l'imprécison concernant la bonne valeur pour des substances particulières à un certain endroit ou à un certain moment à l'intérieur du cycle de croissance biologique) a été remarquée par plusieurs chercheurs. Tout dernièrement, Morel et Bricaud (1981) ont fait une analyse élégante de ces problèmes imputables à la variabilité des sections efficaces d'absorption de la chlorophylle *a* et fait la preuve que des écarts importants par rapport à une valeur constante existent non seulement pour différentes espèces particulières de cellules chlorophylliennes, mais également pour des cellules variables (en taille, en structure, en stabilité, etc.) d'une même espèce.

On peut voir à la figure 46 une représentation type des très grands écarts qui peuvent exister entre diverses déterminations de  $a_{Chl}$ ; on a reporté sur cette figure non seulement les résultats apparemment contradictoires du présent travail, mais également les résultats d'autres chercheurs. Plusieurs caractéristiques apparaissent immédiatement à partir du nombre limité de données de la figure 46 :



Figure 46. Intercomparaison d'un certain nombre de tentatives indépendantes de détermination des sections efficaces d'absorption de la chlorophylle *a*.

- (a) Il y a en général un bon accord pour ce qui a trait à la crête d'absorption dans la région du rouge du spectre visible (même si dans nos travaux antérieurs [Bukata et coll., 1981a] de même que dans les travaux d'autres chercheurs concernant les bandes du satellite NIMBUS-G, on n'a pas pu mettre en évidence une crête significative pour ces longueurs d'onde).
- (b) Des écarts très importants par rapport à une constante ont été observés dans l'extrémité bleue du spectre tout comme l'existence d'une crête d'absorption possible près de 450 nm. Remarquez que la courbe d'absorption résultant du premier ensemble de données du lac Ontario (courbe B) affiche une crête d'absorption distincte dans le bleu, alors que la même courbe provenant du deuxième ensemble (courbe C) en est dépourvue.
- (c) Les diverses courbes de la figure 46 possèdent des pentes montantes et descendantes variables. Ainsi qu'on l'a déjà analysé, des courbes variables de cette nature peuvent modifier dans des proportions draconiennes la forme des profils de l'éclairement énergétique de la surface sous-jacente mesurée expérimentalement.
- (d) La courbe C de la figure semble être une enveloppe qui borne inférieurement les données reportées sur le graphique. Cette observation n'est pas en fait une conclusion valable puisque plusieurs autres chercheurs (dont les données ne sont pas illustrées) ont obtenu des valeurs de a<sub>Chi</sub> plus petites que les données de la courbe C, alors que d'autres ont observé des valeurs de a<sub>Chi</sub> supérieures à celles de la courbe A'.

Les problèmes posés par la prévision de la chlorophylle a à partir des mesures optiques et de certaines méthodologies émergent immédiatement de l'examen de la figure 46. Malgré ces problèmes, les résultats de la présente enquête semblent assez encourageants. Le lac Ontario manifeste un haut degré de complexité optique, et bien qu'il soit représentatif des eaux complexes du point de vue optique, il n'est pas nécessairement représentatif de la plus grande partie des masses d'eau intérieures. Un modèle optique à quatre composantes (même entaché d'imprécision pour ce qui a trait aux propriétés d'absorption et de diffusion unitaires des composantes chlorophylliennes) s'est avéré utile comme outil de prévision, avec un facteur inférieur à deux, des teneurs simultanées de la chlorophylle, de minéraux en suspension et d'un carbone organique en solution pour le lac Ontario. On ne pêche certainement pas par excès d'optimisme en concluant que la précision de la prévision devrait être nettement plus marquée dans le cas d'eaux beaucoup moins complexes du point de vue optique,

#### RÉFÉRENCES

- Bukata, R:P., J.H. Jerome, J.E. Bruton, et S.C. Jain. 1979. Determination of inherent optical properties of Lake Ontario coastal waters. Appl. Opt. 18: 3926-3932.
- Bukata, R.P., J.H. Jerome, J.E. Bruton, S.C. Jain, et H.H. Zwick. 1981a. Optical water quality model of Lake Ontario. 1. Determination of the optical cross sections of organic and inorganic particulates in Lake Ontario. Appl. Opt. 20: 1696-1703.
- Bukata, R.P., J.E. Bruton, J.H. Jerome, S.C. Jain, et H.H. Zwick. 1981b. Optical water quality model of Lake Ontario. 2. Determination of chlorophyll *a* and suspended mineral concentrations of natural waters from submersible and low altitude optical sensors. Appl. Opt. 20: 1704-1714.
- Bukata, R.P., J.H. Jerome, et J.E. Bruton. 1981c. Validation of a five-component optical model for estimating chlorophyll a and suspended mineral concentrations in Lake Ontario. Appl. Opt. 20: 3472-3474.
- Burns, N.M. 1980. Centre canadien des eaux intérieures (communication privée).
- Di Toro, D.M. 1978. Optics of turbid estuarine waters: approximations and applications. Water Res. 12:1059-1068.
- Doerffer, V.R. 1979. The distribution of substances in the Elfe-Estuary determined by remote sensing. Arch. Hydrobiol. 43: 119-224.
- Gordon, H.R., O.B. Brown et M.M. Jacobs. 1975. Computed relationships between the inherent and apparent optical properties of a flat homogeneous ocean. Appl. Opt. 14: 417-427.
- Hulburt, E.O. 1945. Optics of distilled and natural water. J. Opt. Soc. Am. 35: 698-705.
- IMSL 1980. The IMSL Library Reference Manual, Edition 8 (révisée en juin 1980), International Mathematic and Statistical

Libraries, Inc., Houston.

- Jain, S.C., H.H. Zwick, W.D. McColl, R.P. Bukata et J.H. Jerome. 1980. Combined Coastal Zone Color Scanner (CZCS), aircraft, and *in situ* water quality remote sensing experiment in Lake Ontario. Proc. Soc. Photo-Op Instrum. Eng. 208: 178-188.
- Jerome, J.H., J.E. Bruton et R.P. Bukata. 1982. Influence of scattering phenomena on the solar zenith angle dependence of in-water irradiance levels. Appl. Opt. 21: 642-647.
- Kiefer, D.A., R.J. Olson et W.H. Wilson. 1979. Reflectance spectroscopy of marine phytoplankton. Part 1. Optical properties as related to age and growth rate. Limnol. Oceanogr. 24: 664-672.
- Levenberg, K. 1944. A method for the solution of certain nonlinear problems in least squares. Quant. Appl. Math. 2: 164-168.
- Marquardt, D.W. 1963. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. J. SIAM, 11(2).
- Moniteq Ltd. 1981. Water quality remote sensing report. Appendices. Numéro de contrat ASC 1950 23413-8-1345, Table B.3.2., p. 22.
- Morel, A. et A. Bricaud. 1981. Theoretical results concerning light absorption in a discrete medium, and application to specific absorption of phytoplankton. Deep-Sea Res. 11: 1375-1393.
- Morel, A. et L. Prieur. 1977. Analysis of variations in ocean color. Limnol. Oceanogr. 22: 709-722.
- Smith, R.C. et K.S. Baker. 1979. Optical classification of natural waters. Limnol. Oceanogr. 23: 260-267.
- Yentsch, C.S. 1960, The influence of phytoplankton pigments on the color of sea water. Deep-Sea Res. 7: 1-9.
- Zwick, H.H., S.C. Jain et R.P. Bukata. 1980, A satellite airborne and *in situ* water quality experiment in Lake Ontario. Compte rendu de l'atelier ISPRA sur l'expérience EURASEP du scanner couleur des océans, p. 181-198...

#### ANNEXE

#### GLOSSAIRE

Quantité d'énergie rayonnante, Q - La quantité d'énergie transmise par rayonnement.

Q en joules (J)

Flux énergétique,  $\Phi - La$  puissance de l'énergie de rayonnement.

$$\Phi = \frac{\Omega}{t}$$
 en watts (W)

Intensité énergétique, I — Le flux énergétique émis par une source ponctuelle par unité d'angle solide  $\partial \omega$ .

$$1 = \frac{\partial \Phi}{\partial \omega}$$
 en W sr<sup>-1</sup>

Luminance énergétique, L – Le flux énergétique par unité d'angle solide  $\partial \omega$  par unité d'air de la projection  $\partial A$ cos $\Theta$  est l'unité d'aire de la surface et  $\Theta$  l'angle entre le flux énergétique et la normale à cet élément de la surface.

$$L = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial A \cos \Theta} \ \partial \omega \ \text{en W m}^{-2} \ \text{sr}^{-1}$$

Éclairement énergétique, E — Le flux énergétique par  $\partial A$ .

 $E = -\frac{\partial \Phi}{\partial A}$  en W m<sup>-2</sup>

Éclairement énergétique descendant,

$$E_{d} = \int_{\Phi=0}^{2\pi} \int_{\Theta=0}^{\pi/2} L(\Theta, \Phi) \cos \Theta \, \partial \omega$$

Éclairement énergétique ascendant,

2

$$E_{u} = \int_{\Phi=0}^{2\pi} \int_{\Theta=\pi/2}^{\pi} L(\Theta, \Phi) \cos \Theta \, \partial \omega$$

où  $\Theta = 0$  indique la direction normale vers le bas.

Coefficient de diffusion, a — La fraction de l'énergie de rayonnement d'un faisceau collimaté absorbé par unité de distance  $\partial x$ .

$$a = \frac{-(\partial \Phi)abs}{\Phi \partial x}$$
 en m<sup>-1</sup>

Coefficient de diffusion, b — Fraction de l'énergie de rayonnement d'un faisceau collimaté diffusé par unité de distance  $\partial x$ .

$$b = \frac{-(\partial \Phi) \operatorname{scat}}{\Phi \partial x} \operatorname{en} m^{-1}$$

Coefficient d'affaiblissement total, c – Fraction de l'énergie de rayonnement retirée d'un faisceau par unité de distance  $\partial x$  due à la fois à l'absorption et à la diffusion.

$$c = - \left[ \frac{(\partial \Phi)_{abs} + (\partial \Phi)_{scat}}{\Phi \partial x} \right]$$
$$= a + b \qquad \text{en m}^{-1}$$

Albédo de diffusion,  $\omega_0$  – Le nombre d'interaction de diffusion exprimé sous forme d'une fraction du nombre total d'interactions.

$$\omega_0 = \frac{b}{c}$$

Fonction de diffusion en volume,  $\beta(\Theta) - L'$ intensité énergétique diffusée dans la direction  $\Theta$  par unité de volume de diffusion  $\partial V$  normalisée pour l'éclairement énergétique incident E. Les intégrations appropriées de  $\beta(\Theta)$  donnent des définitions mathématiques des coefficients de diffusion, de rétrodiffusion et de prodiffusion.

$$\beta(\Theta) = \frac{\partial I(\Theta)}{E \partial V} \text{ en m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$$

Probabilité de prodiffusion, F — Le rapport de la diffusion dans l'hémisphère avant (c'est-à-dire l'hémisphère devant l'interaction) à la diffusion totale dans toutes les directions.

$$F = \frac{\int_{\Phi=0}^{2\pi} \int_{\Theta=0}^{\pi/2} \beta(\Theta) \partial \omega}{\int_{\Phi=0}^{2\pi} \int_{\Theta=0}^{\pi} \beta(\Theta) \partial \omega}$$

Probabilité de rétrodiffusion, B - Le rapport de la diffusion dans l'hémisphère arrière (c'est-à-dire l'hémisphère derrière l'interaction) à la diffusion totale dans toutes les directions.

$$B = \frac{\int_{\Phi=0}^{2\pi} \int_{\Theta=\pi/2}^{\pi} \beta(\Theta) \partial \omega}{\int_{\Phi=0}^{2\pi} \int_{\Theta=0}^{\pi} \beta(\Theta) \partial \omega}$$

35

Coefficient de prodiffusion,

$$Fb = \int_{\Phi=0}^{2\pi} \int_{\Theta=0}^{\pi/2} \beta(\Theta) \partial \omega \quad en \, m^{-1}$$

Coefficient de rétrodiffusion,

Bb = 
$$\int_{\Phi=0}^{2\pi} \int_{\Theta=\pi/2}^{\pi} \beta(\Theta) \partial \omega$$
 en m<sup>-1</sup>

Coefficient de diffusion,

b = 
$$\int_{\Phi=0}^{2\pi} \int_{\Theta=0}^{\pi} \beta(\Theta) \partial \omega$$
 en m<sup>-1</sup>

où b = Fb + Bb.

Facteur de réflexion en volume (rapport de l'éclairement énergétique ou facteur de réflexion de l'éclairement énergétique ou facteur de réflexion diffuse), R – Le rapport de l'éclairement énergétique ascendant à l'éclairement descendant en un point quelconque.

$$R = \frac{E_u}{E_d}$$

Coefficient d'affaiblissement de l'éclairement énergétique, K — La dérivée du logarithme de la profondeur de l'éclairement énergétique descendant à la profondeur z.

$$K(z) = \frac{1}{E_d(z)} \left[ \frac{\partial E_d(z)}{\partial z} \right] en m^{-1}$$

Éclairement énergétique scalaire,  $E_0 - L'$ intégrale dans toutes les directions de la répartition de la luminance énergétique en un point.

$$E_0 = \int_{\Phi=0}^{2\pi} \int_{\Theta=0}^{\pi} L(\Theta, \Phi) \partial \omega \quad \text{en W m}^{-2}$$

Éclairement énergétique scalaire descendant, E<sub>0d</sub>

$$\mathsf{E}_{\mathsf{od}} = \int_{\Phi=0}^{2\pi} \int_{\Theta=0}^{\pi/2} \mathsf{L}(\Theta, \Phi) \partial \omega \quad \text{en W m}^{-2}$$

Fonction de répartition descendante,  $D_d$  – Le rapport de l'éclairement énergétique scalaire descendant à la profondeur z à l'éclairement énergétique descendant à cette même profondeur.

$$D_{d}(z) = \frac{E_{od}(z)}{E_{d}(z)}$$