

## Particules organiques et rapport C/N des sédiments des lacs du Jura<sup>1</sup>

J. Verneaux<sup>2</sup>

A. Vidonne<sup>2</sup>

F. Remy<sup>2</sup>

A. Guyard<sup>2</sup>

Mots clés : Sédiments lacustres, matière organique, rapport C/N, fonctionnement.

Les résultats présentés sont issus de l'analyse de 283 échantillons sédimentaires prélevés à 7 profondeurs différentes (- 5 à - 35 m) dans 10 lacs de la Franche-Comté jurassienne.

La nature des particules constitutives des sédiments lacustres est examinée dans une première partie consacrée à l'analyse microparticulaire comparée du seston et des sédiments récents ainsi qu'à un bilan des valeurs du rapport C/N des apports organiques aux cuvettes lacustres.

La recherche est ensuite centrée sur la dynamique de la transformation de la matière organique. En se fondant sur le phénomène général de l'affinement des particules dans l'espace et dans le temps, les variations de la teneur en matière organique et du rapport C/N sont analysées en fonction de la taille des particules et de la hauteur d'eau.

Des interprétations relatives au mode du fonctionnement des systèmes lacustres sont effectuées mais la complexité de l'information contenue dans une valeur globale du rapport C/N conduit à proposer une analyse des formes de la matière organique.

### Organic materials and the C/N ratio in lake sediments of the French Jura

Keywords : Lake sediments, organic material, C/N ratio, dynamic.

In the first part, sediment composition is examined, using a comparative particle analysis of sestonic and benthic materials. C/N ratios of various organic materials are also indexed.

Then, the research centres on the dynamics of the organic matter degradation which is studied from 283 samples of recent sediments, taken with a square corer, at seven depths (- 5 to - 35 m) in ten lakes of the French Jura.

Variations of organic matter and the C/N ratio, in relation to particle size and water depth, are analysed.

Then, a survey of the different lakes facilitates an explanation of the functioning of lake systems in relation to a trophic-dynamic classification of lakes.

However, the complexity of the information included in the C/N ratio suggests that another analyses of the different forms of the organic matter are necessary.

## 1. Introduction

Dans une précédente publication (Verneaux et al. 1987) présentant les caractéristiques générales des lacs de la Franche-Comté jurassienne ainsi que celles de leurs sédiments, nous avons souligné

l'absence de relation générale entre la teneur en matière organique (MO) et les valeurs globales du rapport C/N.

Partant du fait que la transformation de la matière organique accompagne la fragmentation des particules, sont examinées successivement :

— la composition particulière des sédiments (analyse micromorphométrique) en relation avec la nature et la composition des apports.

— les variations de la teneur en MO et du rapport C/N en fonction de la taille des particules ( $\emptyset$ ) et de la profondeur d'échantillonnage (Z).

1. Recherches faisant partie d'un programme soutenu par la Direction à la Recherche, le Conseil Régional de Franche-Comté et l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse.

2. Centre d'Étude des Eaux Continentales, Institut des Sciences et Techniques de l'Environnement, Université de Franche-Comté, Place Leclerc, 25030 Besançon Cedex.

Ces analyses ont été effectuées afin de mettre en évidence les tendances générales de l'évolution de la matière et de proposer des éléments interprétatifs des teneurs en MO et du rapport C/N des sédiments lacustres.

Les 283 échantillons, issus de 10 lacs et de 7 profondeurs différentes (de - 5 à - 35 m), sont considérés comme faisant partie d'un système général unique. En l'absence d'un protocole normalisé d'échantillonnage, permettant l'analyse comparée des systèmes, les mentions relatives aux lacs ne sont données qu'à titre indicatif.

## 2. Techniques et méthodes utilisées

### 2.1. Échantillonnage

— Chaque échantillon sédimentaire de 2 dm<sup>3</sup> est constitué de 4 prélèvements effectués au moyen du carottier à paroi transparente coulissante proposé par Rofes & Savary (1981).

Les échantillons concernent la strate superficielle (0, - 5 cm) du sédiment, couche de bioturbation favorable aux échanges entre le substrat et l'eau (Jones & Bowser 1978, Lindeström 1979, Berner 1980).

Les remaniements affectant cette strate, joints à la fluidité et à l'inégalité de la surface de nombreux sédiments, conduisent à ne pas tenter de sélectionner des couches plus minces.

Les 283 échantillons constitués de 1132 prélèvements, sont issus de 10 lacs et ont été prélevés tous les 5 mètres entre - 5 et - 10 m.

— Les échantillons de seston se rapportent à la colonne d'eau située à la verticale du point le plus profond de chaque lac. 5 litres d'eau ont été prélevés tous les mètres, par pompage, puis filtrés à 10  $\mu$ m.

L'échantillon de chaque lac est constitué par l'addition des comptages effectués sur les différents filtrats.

— Aucune relation chronologique n'étant recherchée entre seston et sédiment, les sédiments ont été prélevés avant la circulation printanière (mars-avril) et le seston en période de production phytoplanktonique optimale (juillet-août).

Le tableau I présente les principales caractéristiques des lacs étudiés ainsi que la répartition des échantillons sédimentaires.

### 2.2. Traitements des analyses

Le sédiment est séparé, par tamisage en voie humide couplé à l'utilisation d'ultrasons à partir de 50  $\mu$ m, en 4 fonctions granulométriques : < 25, 25-50, 50-150 et > 150  $\mu$ m.

Une partie du sédiment est décarbonatée à pH<sub>3</sub> à l'aide d'une solution d'acide chlorhydrique 3N ; elle est utilisée pour le fractionnement granulométrique et l'observation optique.

L'analyse micromorphométrique s'effectue sur le sédiment frais puis décarbonaté, examiné globalement ou par fraction granulométrique. Le sédiment est monté entre lame et lamelle après dilution au 1/20 dans l'eau glycinée. Les particules sont identifiées puis quantifiées de deux façons :

Tableau I. Caractéristiques générales des cuvettes et répartition des échantillons sédimentaires issus de 10 lacs de la Franche-Comté jurassienne.

Lacs	Abbaye	Bonlieu	Chaîlain	Clairvaux	Etival	Ilay	Maclu	Narlay	Rousses	St. Point		
alt. (m)	910	803	590	534	790	778	779	748	1059	850		
A (ha)	80	17	232	56	15	72	22	41	89	398		
ZM (m)	18	16	34	20	10	32	25	38	18	40		
										I		
n° échantillons par prof.	- 5	8	5	8	8	5	8	8	8	10	76	
	- 10	8	5	8	4	5	8	8	6	4	8	64
	- 15	8	5	6	4		8	6	4	4	8	53
	- 20			4	4		8	4	4		8	32
	- 25			4								
	- 30		8	4	4		8	28				
	- 35			4			6		4		5	20
$\Sigma$	24	15	34	20	10	46	30	34	16	54	283	

- dénombrées suivant 2 transects perpendiculaires sous trois gammes de grossissements (80-125, 125-500 et 500-1250)

- mesurées au planimètre à crayon magnétique, après projection de l'aire examinée ; les pourcentages sont alors relatifs à la surface particulière totale.

L'identification et le dénombrement des particules organiques sont facilités par la décarbonatation à la condition cependant de ne pas comptabiliser les très nombreux microcristaux siliceux qui constituent une matrice secondaire.

Les formations siliceuses d'origine biologique (frustules de Diatomées et phytolithes) sont aisément identifiables.

En l'absence d'un protocole standardisé satisfaisant, les causes de variabilité étant nombreuses, nous considérons les valeurs obtenues comme des indications essentiellement comparatives.

La matière organique (MO) est assimilée à la perte au feu (PF) obtenue après dessiccation du sédiment brut au four à moufle à 550 ° C.

Le carbone organique total est dosé par la méthode d'Anne ou par dosage infra-rouge du CO<sub>2</sub> formé après oxydation (COT, appareillage Dohrman).

L'Azote est déterminé soit par la méthode de Kjeldahl (NK) (AFNOR EP 118 E adaptée), soit sous forme gazeuse par catharométrie (NT, dosages CNRS), les écarts entre les valeurs obtenues par les deux méthodes étant toujours inférieurs à 10 %. Les valeurs retenues se rapportent à NK.

### 3. Résultats

#### 3.1. Composition particulaire

##### 3.1.1. Composition particulaire générale du seston<sup>1</sup>, et du sédiment superficiel brut (fig. 1)

Les carbonates constituent la matrice principale des sédiments des lacs étudiés qui se présentent

comme des mosaïques d'agrégats. Les particules sont enchâssées dans des nébuleuses de cristaux de carbonates de taille très variable pouvant s'organiser autour des fragments organiques pour constituer des gangues protectrices. Le même phénomène a été observé dans les sédiments marins par Ducafour (1982). Inversement, des particules organiques s'agglomèrent autour des cristaux de carbonates servant de pôles d'attraction.

Les particules peuvent être regroupées en un nombre restreint de catégories portées sur les graphiques suivants. Les cristaux calciques et siliceux, constituant la matrice des sédiments jurassiens, ne sont pas comptabilisés, ni les éléments allochtones, comme les grains de pollen, dont l'ensemble ne représente que 0,5 à 6 % des particules dénombrées ( $\bar{x} = 2 \%$ ).

Afin de permettre la comparaison des compositions microparticulaires du seston et du sédiment, les particules dénombrées sont réparties en 4 catégories :

- les microphytocolastes (MIC) qui comprennent également des microphytes entiers,
- les macrophytocolastes (MAC),
- les zooclastes (ZOC) qui représentent des éléments zooplanctoniques et des débris de macrofaune (arthropodes et mollusques benthiques),
- les agrégats organo-minéraux (AOM) qui regroupent un ensemble de particules organiques non identifiables plus ou moins transformées et associées avec des cristaux calciques et siliceux.

La figure 1 rend compte de la nature des particules constituant le seston et le sédiment superficiel.

Le matériel phytoplanctonique, dominant la composition du seston lacustre, ne se trouve que très faiblement représenté dans les sédiments superficiels et l'on observe qu'en moyenne, environ le quart des particules sestoniques est déjà constitué de matière organique transformée, généralement incluse dans des agrégats organo-minéraux. Dans le sédiment, les frustules de Diatomées dominent la catégorie des microphytes.

Cette observation souligne l'importance des phénomènes de dégradation affectant le matériel planctonique avant sédimentation au sein de la masse d'eau (Kimmel & Goldman 1977).

1. D'après des résultats fournis par C. Martin (travaux en cours, non publiés).

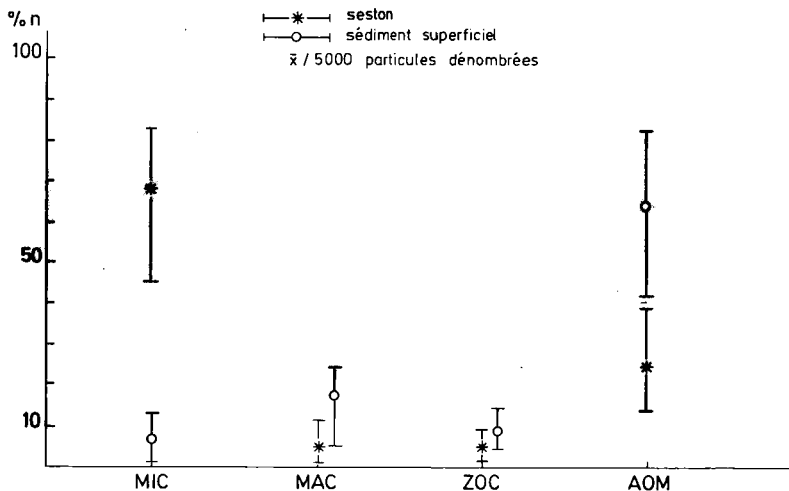


Fig. 1. Analyse microparticulaire comparée du seston et des sédiments superficiels bruts issus de 10 lacs jurassiens — valeurs moyennes et variations — 5 000 particules dénombrées par lac.

### 3.1.2. Répartition granulométrique après décarbonatation (fig. 2).

Sur la figure 2 on observe que si la matière organique domine la composition de la fraction grossière, essentiellement constituée de débris végétaux, le pourcentage massique le plus élevé en carbone organique se situe dans la fraction fine où la MO est fréquemment combinée aux argiles et aux métaux associés pour former des microagrégats.

La fraction des particules inférieures à  $25 \mu\text{m}$  peut représenter jusqu'à 88 % de la masse du sédiment et jusqu'à 94 % du carbone organique. Dans les échantillons de sédiments littoraux, de granulométrie plus grossière, ces valeurs sont respectivement rarement inférieures à 45 et 35 %.

En revanche la fraction grossière ( $\varnothing > 150 \mu\text{m}$ ) représente rarement plus de 10 % de la masse du sédiment.

Ces observations conduisent à envisager pour les études ultérieures une répartition en 3 classes : < 25, 25-100 et > 100  $\mu\text{m}$ .

### 3.1.3. Analyse micromorphométrique après décarbonatation (fig. 3 et 4)

Lorsque la catégorie « Diatomées » n'est pas individualisée, les frustules sont incluses dans la catégorie « microphytes ». La catégorie « matière organique transformée » réunit un ensemble de formes, non identifiables optiquement, parmi lesquelles figurent des particules individualisées plus ou moins mélanisées, parfois circulaires et très foncées (grains de charbon) ainsi que de nombreux agrégats, soit brunâtres où l'on distingue un feutrage, soit fortement mélanisés et dépourvus de structure apparente.

La figure 3 représente la répartition des catégories particulaires résultant de dénombrements réalisés sur 32 échantillons prélevés à 4 profondeurs

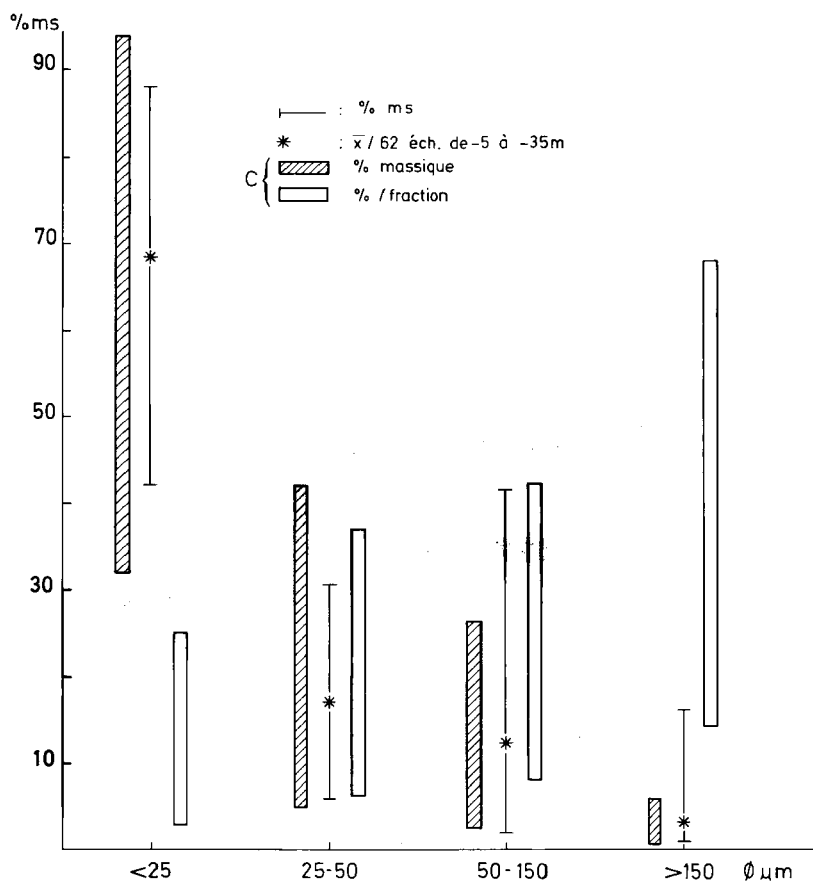


Fig. 2. Répartition granulométrique des sédiments superficiels décarbonatés issus de 10 lacs jurassiens — valeurs moyennes et variations — 62 échantillons — pourcentages massiques du carbone organique et proportions relatives du carbone organique de l'échantillon dans les différentes fractions granulométriques. % ms = pourcentage de matière sèche décarbonatée.

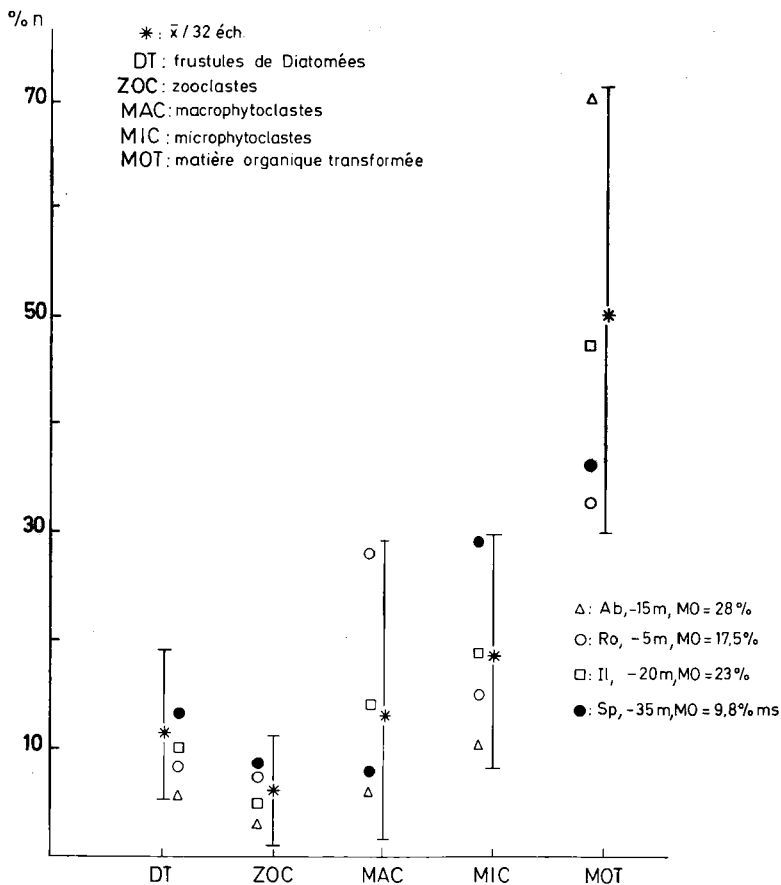


Fig. 3. Composition particulière de la matière organique des sédiments superficiels décarbonatés issus de 4 lacs jurassiens — pourcentages numériques — moyennes et variations générales — 4 exemples.

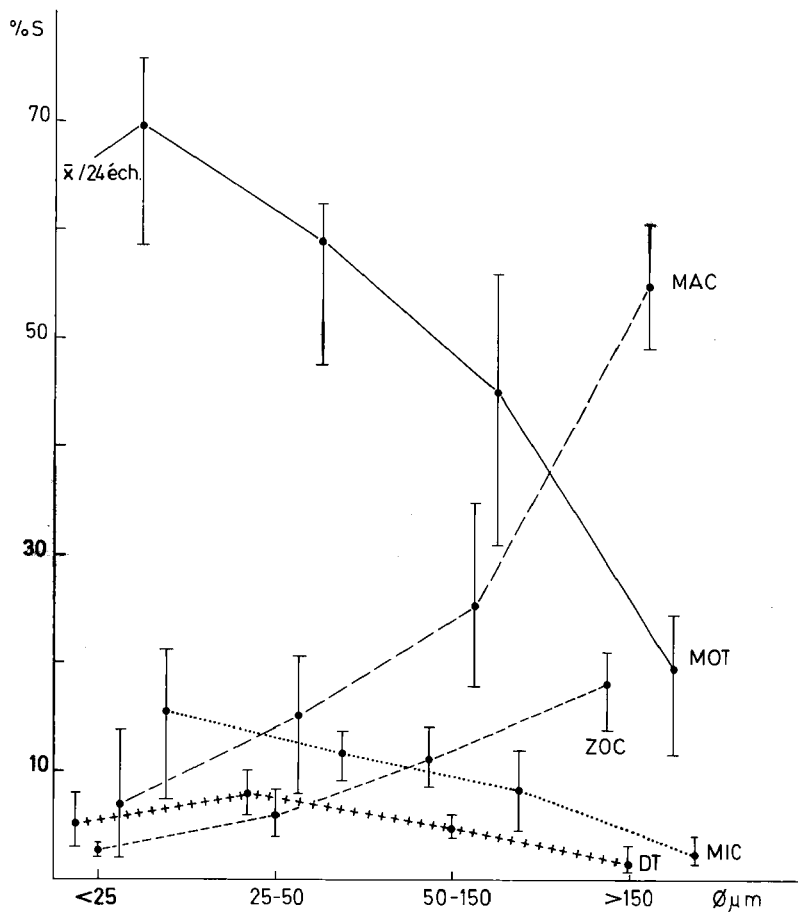


Fig. 4. Sédiments superficiels décarbonatés issus du lac d'Ilay (Jura) — répartition des catégories particulaires dans 4 fractions granulométriques — 8 transects, 3 profondeurs (— 5, — 15, — 25 m) — pourcentages relatifs à la surface totale des particules dénombrées.

dans 4 lacs jurassiens : les Rousses (– 5 m), l'Abbaye (– 15 m), Ilay (– 20 m), St. Point (– 35 m). Le sédiment décarbonaté est observé globalement à raison de 8 échantillons par profondeur.

On observe la dominance générale des particules de matière organique transformée, souvent agrégée, et les variations, selon les lacs et les profondeurs, des proportions de débris macrophytiques et des microphytoclastes comprenant parois cellulaires et filaments. La dominante secondaire est constituée par les microphytoclastes dans les sédiments du lac de St. Point à – 35 m (influence pélagique) et par les macrophytoclastes dans ceux du lac des Rousses à – 5 m (influence littorale).

La figure 4 met en évidence, dans les échantillons du lac d'Ilay, les variations inverses des proportions de débris macrophytiques et de matière organique transformée en fonction de la taille des particules. Les proportions des zooclastes et des microphytoclastes varient également en sens inverse.

La fraction grossière est essentiellement constituée de débris macrophytiques et la fraction fine de particules et d'agréats de matière organique transformée.

### 3.2. Composition des apports organiques. Rapport C/N

Dans le tableau II figurent les résultats des analyses effectuées sur 85 échantillons de matériaux représentant les principaux types d'apports aux cuvettes lacustres.

La distinction usuelle entre éléments autochtones, dans lesquels doivent être placés les macrophytes, et éléments allochtones, incluant les sels minéraux exogènes participant à la photosynthèse, peut paraître discutable lorsqu'elle se rapporte à un système considéré dans son ensemble bassin-versant. Nous distinguerons, d'une part, des constituants périphériques, terrigènes et benthio-littoraux, et d'autre part, des constituants pélagiques. Les analyses ont été effectuées sur du matériel récemment immergé, constituant la matière organique fraîche (MOF).

On observe une augmentation des apports azotés et une diminution du rapport C/N des éléments les plus périphériques (terrigènes puis littoraux) au matériel planctonique et zoobenthique. Ces résultats confirment et complètent les données réunies par Duchaufour (1982), Hakanson & Jansson (1983) et

Tableau II. Teneurs en carbone et azote de différents types d'apports organiques (MOF = matière organique fraîche) aux cuvettes lacustres — 95 échantillons.

MOF constituants		(n)	C			N			C/N			
			M	$\bar{x}$	m	M	$\bar{x}$	m	M	$\bar{x}$	m	
périphérique	terrigène	branches	(6)	54.2	48.1	40.2	0.4	0.5	0.2	211.3	127.8	111.0
		litières	(8)	49.3	45.2	28.7	2.6	1.1	0.6	54.2	43.4	32.8
		Soils										
		tourbe	(4)	51.0	41.4	37.8	2.7	2.2	1.9	33.1	27.4	20.7
		forestiers	(4)	28.7	25.1	20.2	1.4	1.0	0.6	30.8	21.5	15.6
	benthio-littorale	bas marais	(6)	52.9	41.2	33.7	3.0	2.3	1.7	29.4	19.7	13.2
		prairies	(3)	9.5	6.5	4.3	1.6	0.6	0.4	12.8	11.1	9.2
		macrophytes										
		hélrophytes	(16)	50.3	46.1	35.0	2.9	2.1	1.1	54.8	25.7	16.6
		hydrophytes	(14)	46.2	37.1	19.5	3.7	2.3	1.4	23.5	17.3	11.4
plancton	characées	(8)	12.9	10.3	7.2	1.3	0.7	0.5	18.8	14.1	9.6	
	algues fil.	(6)	27.6	18.4	13.2	2.8	1.8	1.2	11.3	8.1	6.2	
	macrobenthos	(4)	46.6	34.2	25.8	10.6	9.0	5.1	8.6	9.4	3.6	
	plancton	(5)	40.1	30.1	22.2	8.6	5.6	4.4	6.2	4.8	3.2	



Jocteur-Monrozier (1984) qui soulignent la richesse en protéines de la matière pélagique et celle en hydrates de carbone (lignine et cellulose) du matériel périphérique.

### 3.3. Variations du rapport C/N en fonction de la taille des particules

Les rapports très élevés ne s'observent que pour les grosses particules constituées de débris ligneux et macrophytiques, aussi avons-nous conservé ici la fraction, peu représentée, des particules supérieures à 500  $\mu\text{m}$ . La figure 5 représente les résultats issus de l'analyse de 60 échantillons. Sont représentées les valeurs moyennes obtenues pour 5 gammes de rapports C/N initiaux (fraction > 500  $\mu\text{m}$ ) ainsi que les variations observées dans deux échantillons extrêmes (Bonlieu - 7 m, MO : 30 % ms et Narlay - 35 m, MO : 17 % ms) et un échantillon où se succèdent les phases de diminution puis d'augmentation du rapport C/N (Clairvaux - 15 m, MO : 3,6 % ms).

Deux processus d'évolution précède de la matière organique fraîche se dégagent de l'ensemble des échantillons analysés :

— l'abaissement des C/N initialement élevés du matériel littoral, imputable à un départ majoritaire du carbone sous forme de  $\text{CO}_2$  (Duchauffour 1988) complété d'un enrichissement en azote bactérien (Mann 1976) ;

— le relèvement des C/N initialement bas du matériel planctonique par suite d'une minéralisation

primaire rapide fournissant des composés azotés solubles diffusant dans la masse d'eau (Jocteur-Monrozier 1984).

Les deux phénomènes s'observent de façon successive sur la figure 5 pour des échantillons à faible teneur en MO (Clairvaux - 15 m, MO : 3,6 %) ; l'examen optique indique que le relèvement du rapport C/N n'est pas dû à un changement de la nature des apports mais au fait, souligné par Bartholomew (1965) à propos des sols, que les phases à C/N bas sont favorables à la prédominance des phénomènes de minéralisation sur ceux de réorganisation.

### 3.4. Variations de la teneur en MO et du rapport C/N en fonction de la profondeur

Le coefficient moyen de variation ( $v = \sigma/\bar{x}$ ) est calculé, pour chaque profondeur, d'après les valeurs obtenues pour chaque lac  $\bar{v} = \Sigma v/10$ .

On observe la faible variabilité des rapports C/N par rapport à celle des teneurs en matière organique ainsi que la tendance générale à la diminution de la variabilité avec la profondeur.

Les profils verticaux (fig. 6 et 7) relatifs à la matière organique et au rapport C/N représentent les différents types d'évolution observés. Les mentions de localisation des échantillons sont données à titre indicatif et l'exemple du lac Pavin a été tracé d'après les résultats publiés par Restiuito (1984).

Tableau III. Composition de l'échantillon sédimentaire soumis à l'analyse (10 lacs jurassiens - 7 profondeurs).

Z (m)	- 5	- 10	- 15	- 20	- 25	- 30	- 35
n	76	64	53	32	28	20	10
max	37.6	37.1	44.4	24.6	25.4	27.2	17.5
MO mini	2.3	2.4	4.5	2.2	5.3	4.3	9.5
$\bar{x}$	13.5	16.9	16.9	10.8	13.4	12.8	13.2
$\bar{v}$	0.60	0.50	0.62	0.37	0.48	0.38	0.30
C/N max	22.4	16.5	14.0	14.4	12.2	13.7	10.4
mini	3.3	7.2	8.5	7.8	8.4	8.1	8.1
$\bar{x}$	12.0	10.9	10.6	10.7	10.4	10.2	9.3
$\bar{v}$	0.19	0.09	0.11	0.12	0.09	0.12	0.11

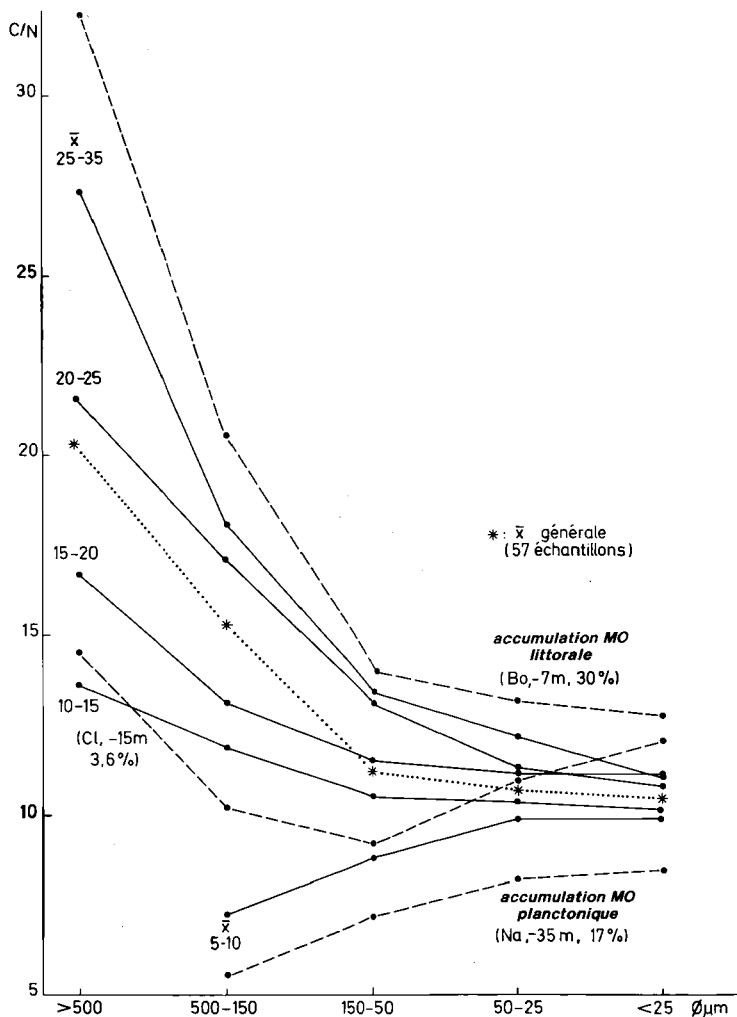


Fig. 5. Variations du rapport C/N en fonction de la taille des particules (affinement) — Évolutions moyennes pour 5 classes de C/N initiaux et 3 exemples dont 2 extrêmes : sédiments issus de 10 lacs jurassiens.

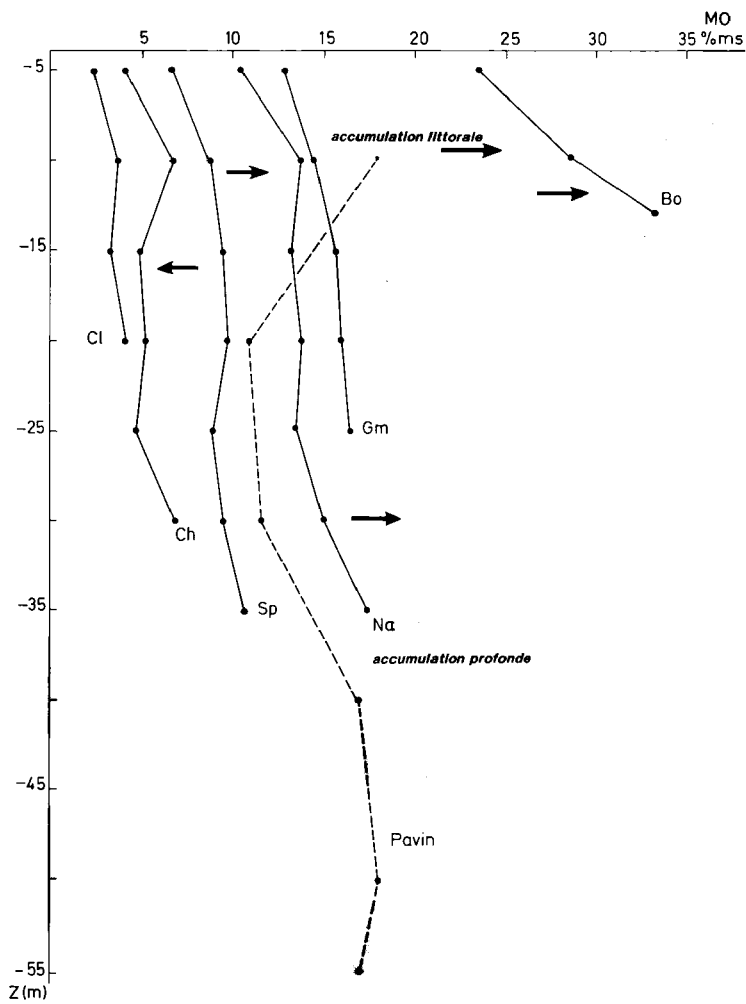


Fig. 6. Variations de la teneur en matière organique selon la profondeur — 7 transects issus de 7 lacs différents et 4 échantillons par profondeur. % ms = pourcentage de matière sèche.

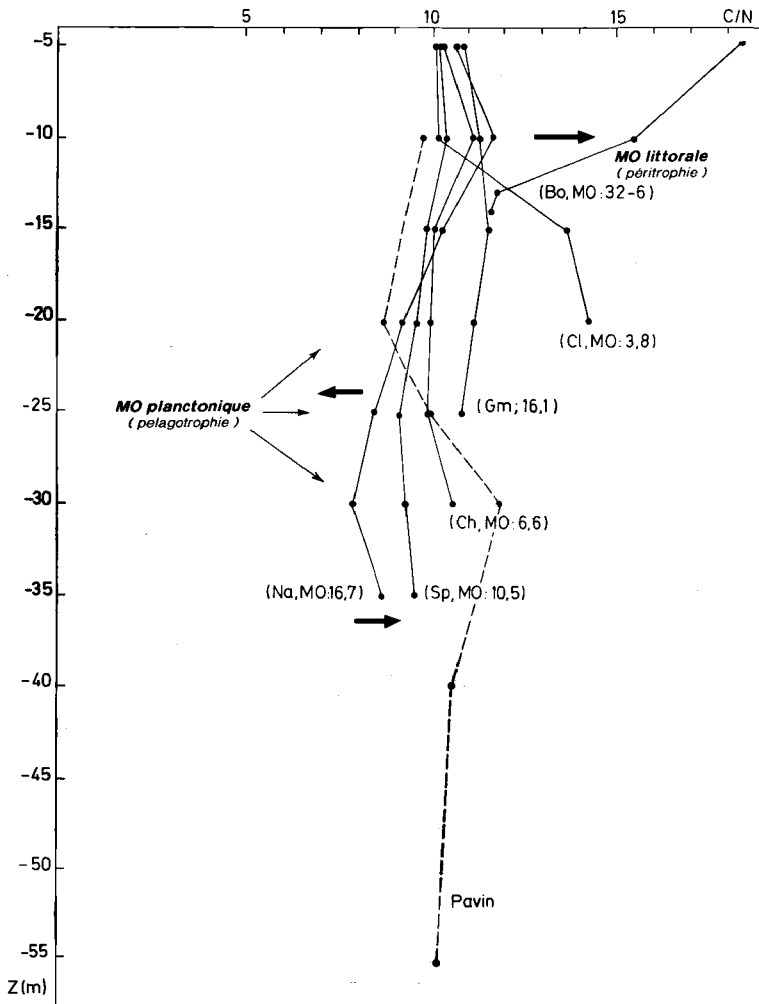


Fig. 7. Variations du rapport C/N selon la profondeur — 7 transects issus de 7 lacs différents et 4 échantillons par profondeur. Les transects des figures 6 et 7 proviennent des mêmes échantillons.

Les tendances suivantes sont observées :

— la matière organique tend à s'accumuler d'autant plus nettement que la cuvette lacustre est de faible profondeur ( $z < 15$  m). Malgré une tendance à la diminution se manifestant entre - 15 et - 25 m dans les lacs les plus profonds, on observe très généralement, même dans le lac Pavin, une accumulation en zone profonde où règnent des conditions hypoxiques, voire anoxiques, peu favorables à la minéralisation.

Dans les lacs jurassiens, une augmentation de la teneur en MO est fréquemment relevée au pied du

« mont » où s'accumulent des débris littoraux induisant une augmentation locale du rapport C/N.

Les deux processus d'évolution de la MO qui se manifestent au cours de l'affinement des particules, s'observent logiquement en fonction de la profondeur traduisant la fragmentation des particules : abaissement des C/N initialement élevés du matériel littoral et augmentation des C/N initialement bas du matériel pélagique.

#### 4. Interprétations relatives au fonctionnement des lacs

##### 4.1. Observations

Tableau IV. Quelques caractéristiques de l'eau et des sédiments des lacs jurassiens étudiés. *Nota* : dans le lac de Narlay, la somme des pigments, caroténoïdes inclus, dépasse 60  $\mu\text{g/l}$ . IV-X : période considérée — eau de contact : eau prélevée à 50 cm de la surface du sédiment — % ms : pourcentage de matière sèche.

		Ab	Bo	Ch	CZ	Et	IÉ	Ma	Na	Sp
- 5m $\bar{x}$ , IV-X n = 14	Chl a ( $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ )	3.2	9.5	2.8	1.6	2.9	4.0	2.8	(16.7)	19.2
eau contact à 4/5 Z max. $\bar{x}$ , IV-X n = 14	O <sub>2</sub> (mg/l)	4.7	0.6	5.1	4.6	8.2	4.5	7.6	0.7	6.7
sédiment fond à 4/5 Z max. strate	CaCO <sub>3</sub> (% ms)	23	18	62	83	40	63	71	60	67
0, - 5 cm $\bar{x}$ , n = 8	MO (% ms)	32	36	7	5	18	29	16	18	10

On observe que les lacs jurassiens, bicarbonatés calciques ( $150 < \text{HCO}_3^-$ , IV-V,  $< 220$ ) présentent fréquemment des productions (biomasses) primaires relativement faibles. D'autre part, les cuvettes sont désoxygénées en zone profonde. Les seuls lacs étudiés ne présentant pas d'hypoxie profonde accentuée sont St. Point, alimenté par le Doubs (Verneaux et al. 1988), Grand Maclu et Etival, ce dernier assimilable à un étang (Z max.  $< 10$  m). Toutefois on note que cette hypoxie est généralement limitée au quart inférieur de la profondeur, sauf à Bonlieu,

passant à la tourbière, et à Narlay, pollué par des émergences profondes. A défaut d'enregistrement de l'oxygène, nécessaires à l'interprétation des valeurs dans l'espace et le temps, nous avons retenu la profondeur 4-5 m Z max. comme discriminante.

Des données détaillées sont réunies dans la série des monographies lacustres (1979-1987) réalisées par le S.R.A.E. de Franche-Comté, le C.E.M.A.G.R.E.F., Lyon et le Centre d'Étude des Eaux Continentales de l'Université de Franche-Comté.

— Dans les lacs peu profonds, à péritrophie dominante (Bonlieu) les sédiments accumulent de la MO résiduelle ( $20 < MO < 40$  ms) ; le rapport C/N peut s'abaisser rapidement sans toutefois atteindre le seuil de 10 en raison d'une profondeur insuffisante et d'une hypoxie marquée.

— Dans les lacs plus profonds à forte production primaire et hypoxiques de façon durable en profondeur (Narlay), le rapport C/N demeure bas (aux environs de 8) par suite d'une accumulation algale : (*Oscillatoria rubescens*), peu transformée.

— Dans les lacs non désoxygénés et à forte production primaire, ce phénomène ne s'observe pas nécessairement et le rapport C/N peut également se stabiliser autour de 10 (cas du lac de St. Point).

— Dans le lac de Neuchâtel l'observation de C/N bas (6.1 à 7.9 à - 100 m *in* Beck 1987) ne correspond pas à des conditions hypoxiques.

— Dans des lacs comme celui de Clairvaux, à faible production primaire, aux sédiments très pauvres en matière organique ( $MO < 5\%$ ) et dont l'hypoxie est limitée à la couche profonde, on peut observer une tendance à la remontée du rapport C/N, avec la profondeur.

Ainsi, Hakanson (1977) mentionne le cas de lacs oligotrophes dont les sédiments pauvres en MO (1.8 - 3.3 %) présentent des C/N globaux élevés ( $C/N > 16$ ). Le même phénomène est relevé à - 30 m dans le lac Pavin par Restituto (1984) qui, se référant à Obeng-Asamoah (1976), évoque l'allochtonie de la matière accumulée à ce niveau.

Des valeurs similaires du rapport C/N nécessiteraient donc des interprétations différentes selon les teneurs en MO et les profondeurs correspondantes.

#### 4.2. Teneur en matière organique résiduelle

L'accumulation de la MO résiduelle dans les sédiments, exprimant un transfert insuffisant et un refus de minéralisation de la matière disponible, apparaît comme un critère important du mode de fonctionnement des systèmes lacustres plutôt que comme l'expression d'un « niveau trophique » (Hakanson & Jansson 1983). En effet, des lacs à forte production primaire sont susceptibles de n'accumuler que très peu de matière résiduelle (lacs de St. Point, de Neuchâtel) et inversement. En autochtonie dominante, la minéralisation accentuée de la MO produite apparaît comme la condition essentielle du développement d'une forte production primaire et de son

transfert à la chaîne consommatrice. Le problème demeure de la détermination des seuils de MO résiduelle correspondant à ces conditions eufonctionnelles.

Les résultats obtenus confirment, qu'en dehors de dysfonctionnements imputables à une hypertrophie pélagique (lac de Narlay), les accumulations organiques correspondent à des alimentations périphériques dominantes (matériel allochtone et macrophytique littoral).

Nous retrouvons ici, partiellement, la distinction entre allotrophie et autotrophie proposée par Rodhe (1969), puis Wetzel (1975), à condition cependant de considérer les apports de nutriments comme une forme d'allotrophie et les productions primaires induites comme une forme possible de dystrophie.

La classification « trophique », descriptive proposée par Hakanson & Jansson (1983) selon les teneurs des sédiments en MO et Azote devient alors inadéquate, d'autant plus, d'ailleurs, que les fortes productions primaires augmentent la fraction minérale (Si des Diatomées et  $CaCO_3$ ) en diminuant d'autant la proportion relative de la matière organique conservée dans le sédiment (Koschel et al. 1990).

#### 4.3. Rapport C/N et nature de la matière organique résiduelle

Les difficultés à interpréter les valeurs globales du rapport C/N proviennent du caractère complexe de cette information qui traduit à la fois les importances relatives des apports périphériques et pélagiques et les modalités, activités bactériennes incluses, de leur transformation où se combinent des processus de minéralisation, de réorganisation (synthèse) et de conservation de la matière (Kleerekoper 1957, Seki et al. 1968, Balinger & Mac Kee 1971, Obeng-Asamoah 1976).

Cependant certaines tendances peuvent être dégagées des précédentes analyses.

— Le rapport C/N de la couche superficielle du sédiment global tend à se stabiliser autour de 10, valeur également mentionnée par Laville (1971) pour les sédiments des lacs pyrénéens et seuil déjà retenu par Hansen (1959) pour séparer les types « gytja » et « dy ». Cet auteur souligne le fait que la teneur en azote (Hakanson & Jansson 1983) ne suffit pas à caractériser le sédiment compte tenu de l'amplitude des variations de la teneur en carbone dans les sédiments récents (de 29 à 58 % MO selon les cas).

— Les valeurs les plus élevées du rapport C/N correspondent à des accumulations de matériel pério-phérique, terrigène et littoral, le matériel planctonique, à C/N bas, étant en grande partie transformé dans le volume d'eau avant sédimentation.

Les auteurs ont souligné la résistance à la dégradation des apports terrigènes et littoraux à C/N élevés ainsi que la rapide minéralisation du matériel planctonique riche en protéines et à C/N bas (Bou-gis 1974, Billen 1977).

De ce point de vue, une accumulation, même quantitativement limitée de MO à C/N bas (5-8), peut être considérée comme l'indice d'une minéralisation insuffisante des composés azotés (Kemp 1971) issus d'une hypertrophie pélagique induite par des apports allochtones de nutriments.

— Dans les lacs étudiés, les rapports C/N relativement élevés (12-14) associés à de faibles teneurs en matière organique (Clairvaux : MO < 5 % ms) correspondent à l'accumulation de débris (parois celluloseuses, faisceaux libéro-ligneux, débris chitineux...) d'autant moins dégradables que s'instaurent des conditions hypoxiques et que les processus de transformation ont été préalablement accentués (Pillon 1979).

Ce phénomène s'apparente à l'augmentation du rapport C/N avec l'enfouissement (de 0 à 30 cm) mis en évidence dans les sédiments du lac de St. Point (Verneaux et al. 1988).

## 5. Conclusions

Les caractéristiques de la strate superficielle des sédiments expriment principalement, surtout en zone littorale, les proportions relatives des apports pério-phériques et pélagiques ainsi que, surtout en zone profonde, l'intensité des phénomènes de minéralisation primaire de la matière organique. Cette minéralisation s'effectue au sein de la masse d'eau et dans la couche de bioturbation ou l'activité biologique est d'autant plus accentuée que les eaux de contact sont bicarbonatées-calciques et oxygénées et que la température est élevée (Degens & Mopper 1976, *in* Wetzel 1983). La proportion importante des agrégats de matière organique transformée, dans le sésion (*fig. 1*), mais surtout dans la composition du sédiment (*fig. 3*), souligne le fait que dans la strate superficielle du sédiment, les phénomènes de réorganisation de la matière, comme l'humification, accompagnent et complètent ceux de minéralisation.

La nature de la MO résiduelle influence donc considérablement la valeur du rapport C/N, indépendamment de la teneur en MO.

Si la teneur en MO constitue une information synthétique exploitable dans le cadre d'une typologie fonctionnelle des systèmes lacustres, il n'en est pas de même du rapport C/N global dont des valeurs similaires, surtout proches du seuil de 10, peuvent résulter de combinaisons très différentes de la nature et du degré de transformation de la matière.

Ce constat conduit certains auteurs à proposer des formules soit redondantes avec la teneur en MO (produit C.N de Ballinger & Mac Kee 1971), soit tronquées et présentant des incertitudes de même nature (rapport N/MO de Hakanson & Jansson 1983). La prise en compte des formes de la matière organique, dans différentes conditions écologiques, paraît constituer une étape nécessaire à une meilleure compréhension des mécanismes mis en jeu. Les interprétations proposées sont en cours de vérification selon deux voies d'approche :

— l'une, relative aux phénomènes, repose sur l'analyse de la répartition des différentes formes de la matière organique : elle est destinée à définir les conditions de minéralisation, de réorganisation et de conservation de la MO en relation avec d'autres paramètres comme l'oxygène dissous, le potentiel d'oxydo-réduction, la minéralisation de l'eau, la production primaire, la température... ;

— l'autre, relative à la caractérisation des systèmes eux-mêmes, s'appuie sur l'analyse conjointe des sédiments et des peuplements consommateurs associés (macrobenthos) afin d'établir des référentiels biologiques permettant l'interprétation de la gamme sédimentologique.

Les variabilités physico-chimiques et biologiques, relevées dans les sédiments d'un même système, quels que soient le lac et sa superficie, nécessitent l'établissement préalable de protocoles d'échantillonnage adaptés à l'analyse comparée des systèmes. Les résultats précédents indiquent l'utilité de la confrontation d'échantillons représentatifs des zones littorales, moyennes et profondes.

## Remerciements

Les auteurs remercient leurs collègues pédologues M. Gaiffe et S. Bruckert pour leurs précieuses indications.

## Travaux cités

- Balinger (D.G.) & Mac Kee (G.D.). 1971. — Chemical characterization of bottom sediments. *J. Wat. Poll. Contr. Fed.*, 43 : 217-227.
- Bartholomew (W.V.). 1965. — Minéralisation and immobilization of nitrogen in the decomposition of plant and animal residues. *IN : Soil nitrogen. Amer. Soc. Agron. Publ.* : 285-306.
- Beck (C.). 1987. — Étude des composés humiques et essais de caractérisation de la matière organique dans les sédiments récents (post-glaciaires) du lac de Neuchâtel. Thèse Univ. Neuchâtel, Suisse : 140 p. + annexes.
- Berner (R.A.). 1980. — *Early diagenesis. A theoretical approach*. Princeton Univ. Press, New Jersey : 241 p.
- Billen (G.). 1977. — Étude écologique des transformations de l'azote dans les sédiments marins. Thèse Univ. Libre Bruxelles : 266 p.
- Bougis (P.). 1974. — *Ecologie du plancton marin. I : la phyto-plancton*. Masson éd., Paris : 196 p.
- Degens (E.T.) & Mopper (K.). 1976. — Factors controlling the distribution and early diagenesis of organic material in marine sediments. *In : Chemical Oceanography*, VI, Riley & Chester éd. : 59-43.
- Duchauffour (H.). 1982. — Inventaire des constituants minéraux et organiques de différents sédiments marins récents. Liaisons organo-minérales et modes d'agrégation. Thèse 3ème cycle, Univ. Nancy : 110 p + annexes.
- Duchauffour (H.). 1988. *Pédologie*. Masson éd. Paris : 224 p.
- Hakanson (L.). 1977. — The influence of wind, fetch and water depth on the distribution of sediments in lake Vänern, Sweden. *Can. J. Earth Sci.*, 14 : 397-412.
- Hakanson (L.) & Jansson (M.). 1983. — *Principles of Lake sedimentology*. Springer-Verlag éd., Berlin : 316 p.
- Hansen (K.). 1959. — The terms Gytija and Dy. *Hydrobiologia*, 13 : 309-315.
- Jocteur-Monrozier (L.). 1984. — Nature et évolution de l'azote organique dans les sols et les sédiments marins récents. Thèse Univ. Nancy : 175 p. + annexes.
- Jones (B.F.) & Bowser (C.J.). 1978. — The Mineralogy and Related Chemistry of Lake Sediments. *In Lerman (A.), Lakes : Chemistry, Geology, Physics*, N.Y. Springer Verlag : 179-235.
- Kemp (A.L.W.). 1971. — Organic carbon and nitrogen in the surface sediments of lakes Ontario, Erie and Huron. *J. sedim. Petrol.*, 41 : 537-548.
- Kimmel (B.L.) & Goldman (C.R.). 1977. — Production, sédimentation and accumulation of particulate carbon and nitrogen in a sheltered subalpine lake. *In Golterman (H.L.) Interactions between sediments and freshwater*, Proc. Sil. 4 Unesco symp., Amsterdam : 148-155.
- Kleerekoper (H.). 1957. — Une étude limnologique de la chimie des sédiments de fond des lacs de l'Ontario méridional, Canada. Thèse Univ. Paris : 205 p.
- Koschel (R.), Giering (B.), Kasprzak (P.), Proft (G.) & Raidt (H.). 1990. — Changes of calcite precipitation and trophic conditions in two stratified hardwater lakes of the Baltic Lake District of the GDR. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 24 : 140-145.
- Laville (H.). 1971. — Recherches sur les Chironomides (Diptera) lacustres du Massif de Néouvielle (Hautes-Pyrénées). *Annls Limnol.* 7 (3) : 335-414.
- Lindström (L.). 1979. — Bioturbation i sediment i olika vattenmiljöer och den betydelse för tussmetallers omsättning — en litteraturstudie. *Inst. Vatten Lufv. Forskn.* IVL B 482 : 39 p.
- Mann (K.H.). 1976. — Decomposition of marine macrophytes. *In : The rôle of terrestrial and aquatic organisms in decomposition processes*. 17th Symp. British Ecol. Soc. Blackwell Scient. Publ. : 247-267.
- Monographies et diagnostics des lacs du Jura. 1979-1987. — *St. Point*, 1979 : 105 p. + annexes — *L'Abbaye* : 1982 : 61 p. + annexes — *Clairvaux*, 1984 : 99 p. + annexes — *Maclou*, 1985 : 104 p. + annexes — *Châlain*, 1986 : 116 p. + annexes — *Ilay*, 1986 : 95 p. + annexes — *Bonlieu*, 1987 : 87 p. + annexes — *Étival*, 1987 : 87 p. + annexes. S.R.A.E. Fr. Comité, éd. Besançon.
- Obeng-Asamoah (E.K.). 1976. — Nutrient regeneration in sediment of an oligotrophic lake. *Arch. Hydrobiol.* 78 (4) : 526-536.
- Pillon (P.). 1979. — Caractérisation organo minérale dans différents milieux de sédimentation marine. *Mém. D.E.A. Agro-Eco-Pédol.* Univ. Nancy : 35 p.
- Restituito (F.). 1984. — Contribution à l'étude du sédiment d'un lac oligo-mésotrophe d'origine volcanique (lac Pavin, France). *Hydrobiologia*, 109 : 229-234.
- Rodhe (W.) in Rohligh (G.A.). 1969. — *Eutrophication : causes, conséquences correctives*. Nat. Acad. Sci. Washington DC : 661 p.
- Rofes (G.) & Savary (R.). 1981. — Description d'un nouveau modèle de carotier pour sédiments fins. *Bull. Franc. Piscicult.*, 283 : 102-113.
- Seki (H.), Skelding (J.) & Parson (T.R.). 1968. — Observations on the decomposition of a marine sediment. *Limnol. Oceanogr.* 13 : 440-447.
- Verneauux (J.), Remy (F.), Vivonne (A.) & Guyard (A.). 1987. — Caractères généraux des sédiments de 10 lacs jurassiens. *Sci. Eau.*, 6 : 107-128.
- Verneauux (J.), Guyard (A.), Joly (D.) & Vidonne (A.). 1988. — Étude physico-chimique des sédiments du lac de St. Point (massif du Jura) : cartographie thématique. *Annls Limnol.* 24 (1) : 15-29.
- Wetzel (R.G.). 1975-1983. — *Limnology*. CBS College Publ. New York, Philadelphia : 767 p.