

LES REALISATIONS SUEDOISES DANS LE DOMAINE
DE LA LUTTE CONTRE L'EUTROPHISATION DES LACS

Etude monographique réalisée pour
l'AGENCE DE BASSIN RHONE-MEDITERRANEE-CORSE

AGENCE DE BASSIN
Rhône - Méditerranée - Corse

31, rue Jules-Guesde
69 PIERRE-BENITE
TEL. (78) 50.16.40

DOCUMENTATION
N° 1348

CHAPITRE III

LA RESTAURATION DES LACS

Michel PALU

Institut National
des Sciences Appliquées
de Lyon
et
Ecole Polytechnique
Chalmers
de Göteborg, Suède

1970

CHAPITRE III

LA RESTAURATION DES LACS

Sommaire

	Pages
A) INTRODUCTION	178 à 180
B) CONTROLE MECANIQUE ET BIOLOGIQUE DES HERBES AQUATIQUES	180 à 186
1) <u>Le contrôle mécanique</u>	180
2) <u>Le contrôle biologique</u>	180 à 186
C) LIMITATION DE LA QUANTITE DE PHOSPHORE UTILISABLE PAR PRECIPITATION DIRECTEMENT DANS LE LAC	186 à 195
D) OXYGENATION DES EAUX DU FOND EN PERIODE DE STRATIFICATION THERMIQUE	196 à 202
1) <u>Introduction</u>	196
2) <u>Déstratification artificielle</u>	196 à 199
3) <u>Aération de l'hypolimnion</u>	199 à 200
4) <u>Conclusion</u>	200 à 202
E) INTERVENTION AU NIVEAU DES SEDIMENTS	202 à 212
1) <u>Enlèvement des sédiments de surface par pompage</u>	202 à 205
2) <u>Oxydation des sédiments</u>	205 à 212
F) COUTS DE RESTAURATION DES LACS EN SUEDE	212 à 215
LISTE BIBLIOGRAPHIQUE	216
ADRESSES DES LEADERS DES PROJETS	217
Annexe 6: données sur les lacs cités au chap. III	218 à 219

A) INTRODUCTION

Depuis 1970, des investissements très importants ont été réalisés en Suède pour l'épuration poussée des eaux usées urbaines. Actuellement, 95% des effluents sont traités biologiquement et 65% biologiquement et chimiquement (figure 36). En conséquence, les apports de phosphore aux rivières et lacs diminuent: on en est actuellement revenu à la situation de 1945-50 (figure 47).

Dans l'ensemble, les effets de cette politique sont nettement positifs: souvent les lacs "guérissent" d'eux-mêmes. Cependant, quelques récepteurs, situés dans des zones fortement urbanisées, ont subi une telle exploitation que les dommages sont pratiquement irréversibles: le relâchage intense de phosphore des sédiments maintient une production printanière et estivale surabondante; ce qui entraîne la consommation des réserves d'oxygène du lac en période de stagnation. En particulier, les couches profondes demeurent anaérobies et les conditions restent propices au relâchage du phosphore en période de production. Ce cycle peut se maintenir pendant de très nombreuses années. La capacité d'auto-épuration du lac est détruite.

Ainsi, la figure 51 et le tableau 18 donnent le bilan en phosphore dans le lac Trummen en 1969, après le détournement total des eaux usées urbaines et industrielles. On voit qu'aucune amélioration ne pouvait être attendue étant donné l'importance des réserves de phosphore dans le sédiment.

La recherche sur la restauration des lacs est un domaine très nouveau: l'intérêt pour ces questions s'est accru en Suède après 1968.

Actuellement, deux instituts suédois se consacrent à la restauration des lacs: le Laboratoire de Recherche sur la Pollution de l'Eau et de l'Air à Stockholm et l'Institut de Limnologie à l'Université de Lund. Dans chacun d'eux une vingtaine de chercheurs (limnologues, microbiologistes, phytoécologistes, zooécologistes, géologistes, etc) coopèrent.

Les méthodes employées en Suède sont les suivantes:

- 1) limitation des quantités de phosphore utilisables par précipitation au sulfate d'aluminium
- 2) rétablissement de l'équilibre entre la production et la

FIGURE 51



BILAN EN PHOSPHORE DANS LE LAC TRUMMEN EN JUILLET 1969
AVANT LA RESTAURATION

TABLEAU 18

Milieu	P	N	K (tonnes)	Ca	Mg
Macrophyte	0,7	2,6	5,2	1,3	0,4
Eau	0,5	4,5	2,4	10,4	2,3
Eau interstitielle (x)	0,4	3,2	2,4	5,6	1,6
Sédiment (x)	77	730	43	257	55
TOTAL	79	740	53	274	59
(x): couche 0-1 m					

TENEUR EN MATIERES NUTRITIVES DANS LES MACROPHYTES, L'EAU, L'EAU INTERSTITIELLE ET LES SEDIMENTS DU LAC TRUMMEN EN 1969 AVANT LA RESTAURATION

minéralisation par élimination d'une partie de la matière organique produite avant qu'elle ne se décompose (contrôle mécanique ou biologique).

3) renouvellement de l'oxygène en période de stagnation (déstratification ou aération de l'hypolimnion)

4) intervention sur les sédiments anaérobies, sources de sels nutritifs (enlèvement ou oxydation).

Le tableau 19 indique la fréquence d'emploi des différentes méthodes. On trouvera à l'annexe 6 quelques données sur les lacs cités dans ce chapitre.

B) CONTROLE MECANIQUE ET BIOLOGIQUE DES HERBES AQUATIQUES (Björk, 1974, réf. 21 et Ahling, 1971, réf. 22)

1) Le contrôle mécanique (faucardage) des herbes aquatiques est une méthode très fréquemment employée (souvent en combinaison avec d'autres méthodes comme le dragage, etc). En particulier pour des lacs peu profonds qui ne sont que des monocultures de *Phragmites communis*, *Myriophyllum verticillatum*, *Carex acuta*, etc.

Ainsi la collaboration entre limnologues et ornithologues a permis de restaurer le lac Hornborga de telle façon qu'il est redevenu une très intéressante réserve d'oiseaux.

2) Le contrôle biologique de la production des macrophytes a été expérimenté dans plusieurs pays (USA, URSS, Israël, etc). Le poisson utilisé est la carpe *Ctenopharyngodon idellus* originaire de la rivière Amour à la frontière de l'URSS et de la Chine.

Depuis 1970, des essais sont réalisés dans le lac Ösbysjön. Petit (4,6 ha), peu profond (profondeur moyenne: 1,3 m), c'était en 1969 une monoculture de *Phragmites communis* et de *Myriophyllum verticillatum*.

Les figures 52 à 55 montrent l'effet sur le macrophyte de l'introduction de carpes en mai 1970, 1971 et 1972.

Le premier essai, en 1970, avait été assez concluant: 250 carpes de poids initial 380 g avaient, à la fin de l'été, diminué de moitié la masse de macrophyte (*Myriophyllum*); leur poids moyen était alors de 1080 g.

D'autre part, les études physico-chimiques indiquèrent une amélioration sensible de l'oxygénation du lac lors de l'hiver suivant

TABLEAU 19

RESTAURATION DES LACS EN SUEDE

Essais de différentes méthodes (1968-1975) (x)

<u>Méthode</u>	<u>Nombre d'essais</u>
Faucardage des herbes aquatiques (souvent combiné avec une élévation du niveau de l'eau)	10
Aération de l'hypolimnion	9
Déstratification	2
Utilisation de carpes herbivores	2
Précipitation du phosphore dans le lac	4
Siphonage des eaux de l'hypolimnion (vers l'émissaire)	2
Pompage des eaux de l'hypolimnion vers l'épilimnion	1
Dragage de la vase	9
Oxydation du sédiment	1
Isolation du sédiment	1
TOTAL	41

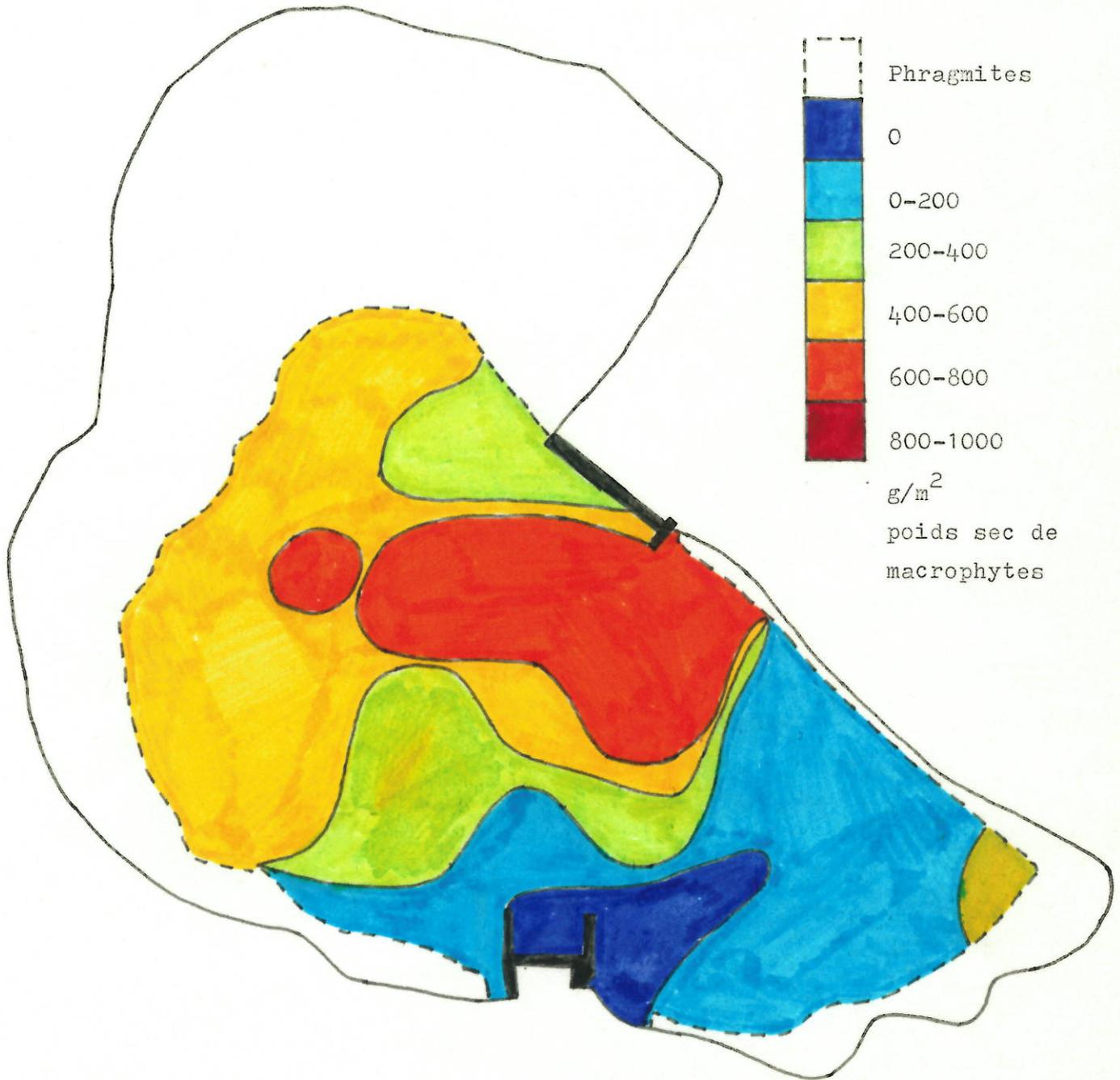
(x) : cette liste est incomplète car: - lorsque plusieurs méthodes ont été combinées elle ne tient compte que de la méthode principale (exemple: le dragage est souvent combiné avec le faucardage des herbes aquatiques)

- des méthodes comme le contrôle chimique des algues, le contrôle des herbes aquatiques par élévation du niveau des eaux, la compression des sédiments (réalisée par drainage puis remise en eau) ne sont pas considérées

Automne 1969: quantité de macrophytes (poids sec et Phragmites communis non compris): 15,9 tonnes

CONTROLE BIOLOGIQUE
DES HERBES AQUATIQUES
DANS LE LAC ÖSBYSJÖN

SITUATION EN OCTOBRE 1969
(avant la restauration)



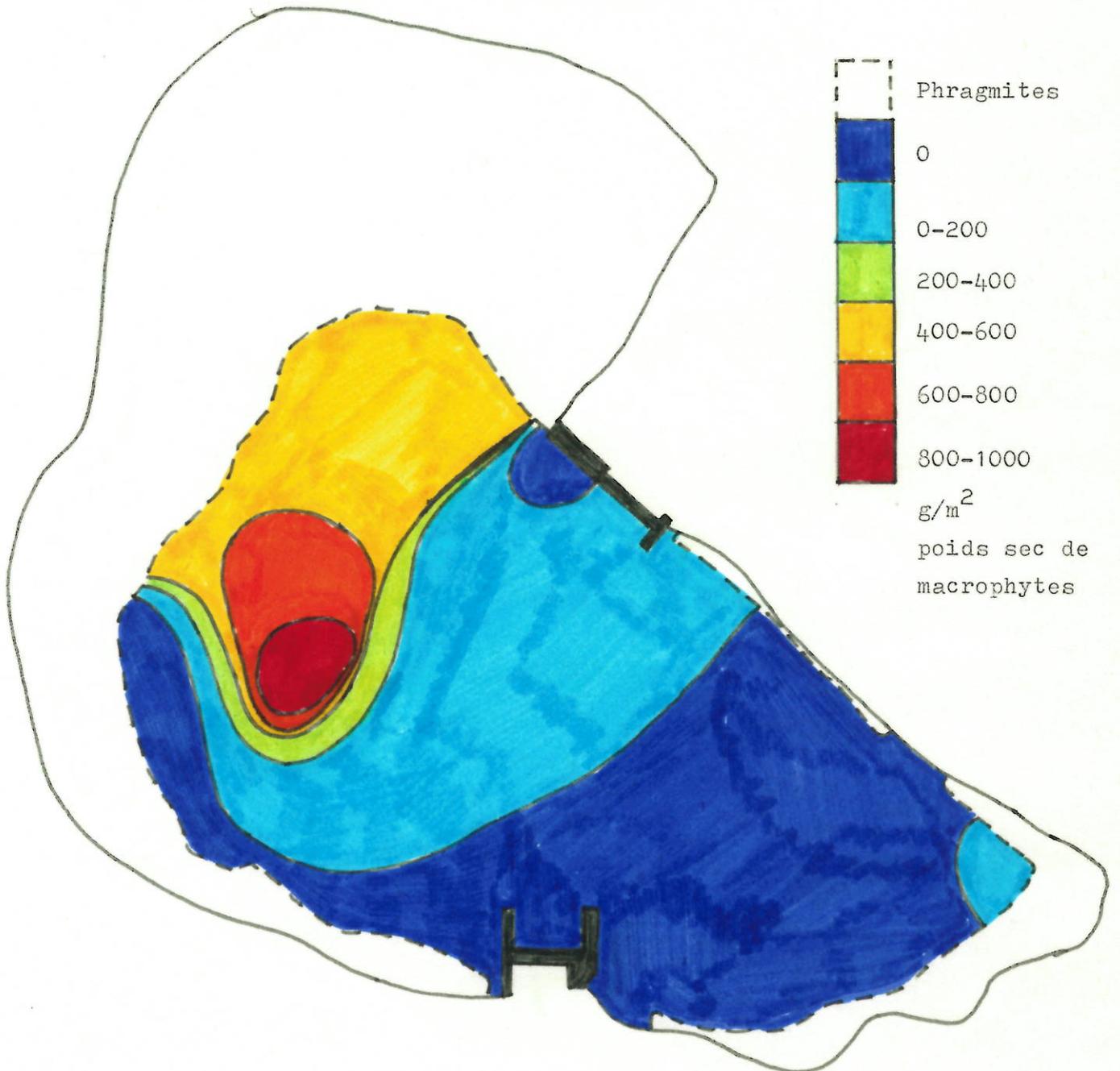
Automne 1969: quantité de macrophytes
(poids sec et Phragmites communis non
compris): 15,9 tonnes

Mai 1970: introduction de 250 carpes
(*Ctenopharyngodon idellus*) de poids
moyen 380 g

Octobre 1970: - poids moyen des carpes:
1080 g; quantité de macrophytes: 7,3 t.

CONTROLE BIOLOGIQUE
DES HERBES AQUATIQUES
DANS LE LAC ÖSBYSJÖN

SITUATION EN OCTOBRE 1970



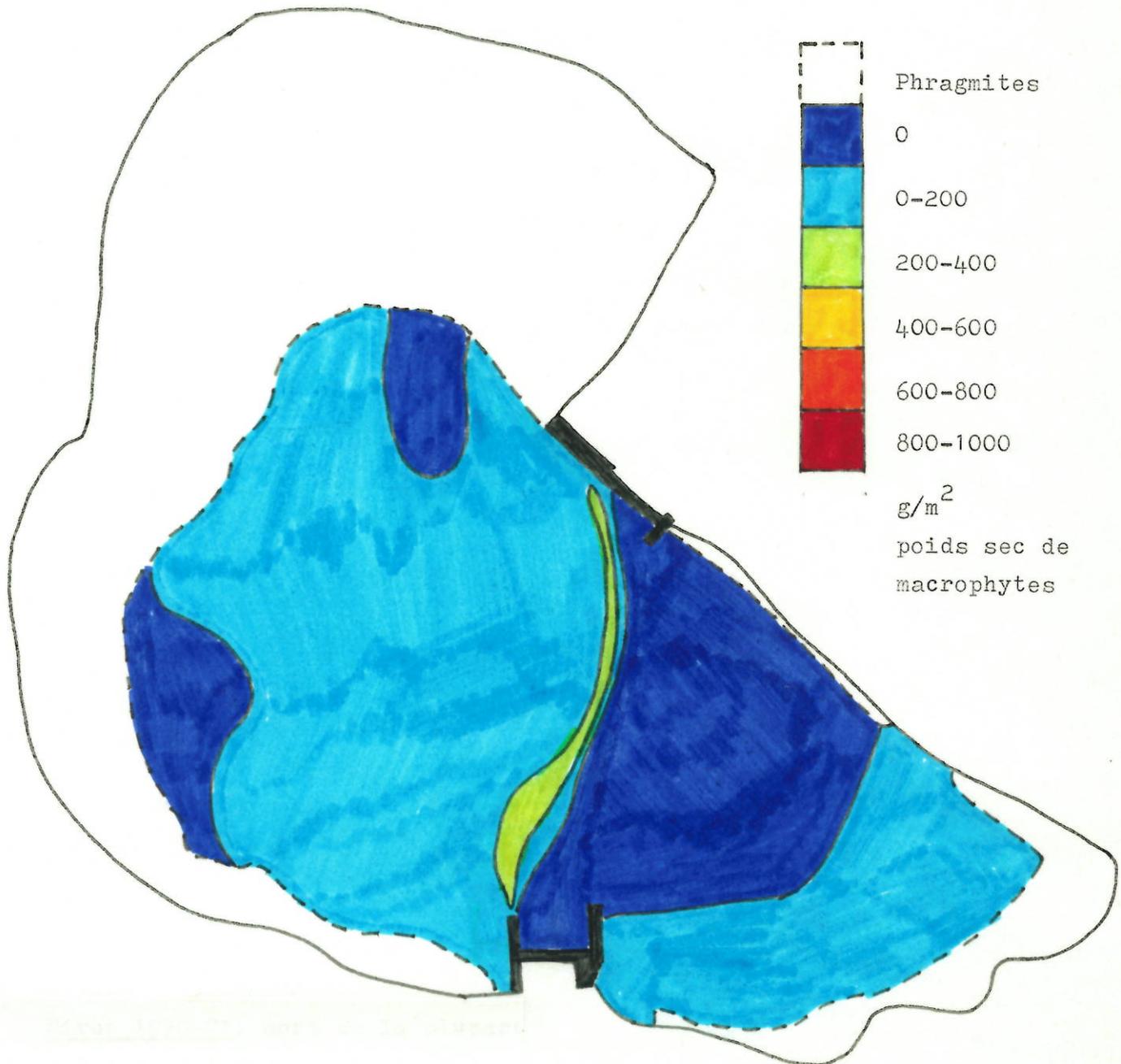
Automne 1969: quantité de macrophytes (poids sec et Phragmites communis non compris): 15,9 tonnes

Mai 1970: introduction de 250 carpes (Ctenopharyngodon idellus) de poids moyen 380 g

Octobre 1970: poids moyen des carpes: 1080 g; quantité de macrophytes: 7,3 t

CONTROLE BIOLOGIQUE
DES HERBES AQUATIQUES
DANS LE LAC ÖSBYSJÖN

SITUATION EN OCTOBRE 1971



Mai 1971: introduction de 4300 carpes de poids moyen 9 g

Octobre 1971: poids moyen des carpes: 31 g; quantité de macrophytes: 7,3 t

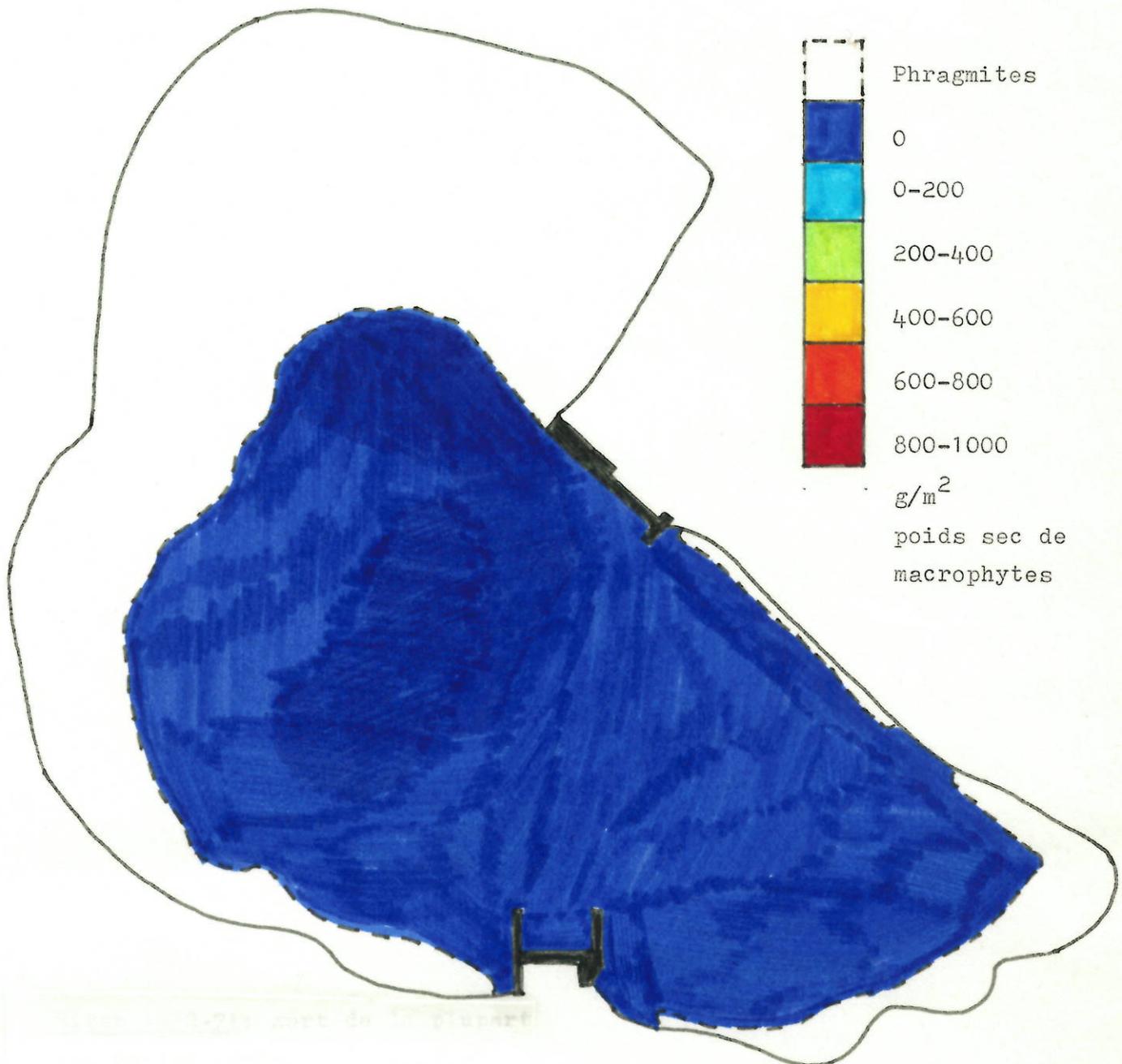
Automne 1969: quantité de macrophytes (poids sec et Phragmites communis non compris): 15,9 tonnes

Mai 1970: introduction de 250 carpes (Ctenopharyngodon idellus) de poids moyen 380 g

Octobre 1970: poids moyen des carpes: 1080 g; quantité de macrophytes: 7,3 t

CONTROLE BIOLOGIQUE
DES HERBES AQUATIQUES
DANS LE LAC ÖSBYSJÖN

SITUATION EN OCTOBRE 1972
ET 1973



Mai 1971: introduction de 4300 carpes de poids moyen 9 g

Octobre 1971: poids moyen des carpes: 31 g; quantité de macrophytes: 7,3 t

Mai 1972: introduction de 1900 carpes de poids moyen 185 g

Octobre 1972 et octobre 1973: disparition des macrophytes, sauf Phragmites communis

(figure 56).

Au sujet du phytoplancton, du zooplancton et de la faune benthique, on ne nota que des changements peu perceptibles (il faut souligner que ces études furent réalisées sans grands moyens et les résultats en sont peu sûrs).

En mai 1971, 4300 autres carpes furent introduites dans le but d'obtenir une plus grande réduction des macrophytes. Mais celles-ci étaient trop jeunes (poids initial: 9 g) et ne parvinrent qu'à maintenir la production de macrophytes à son niveau de l'année précédente.

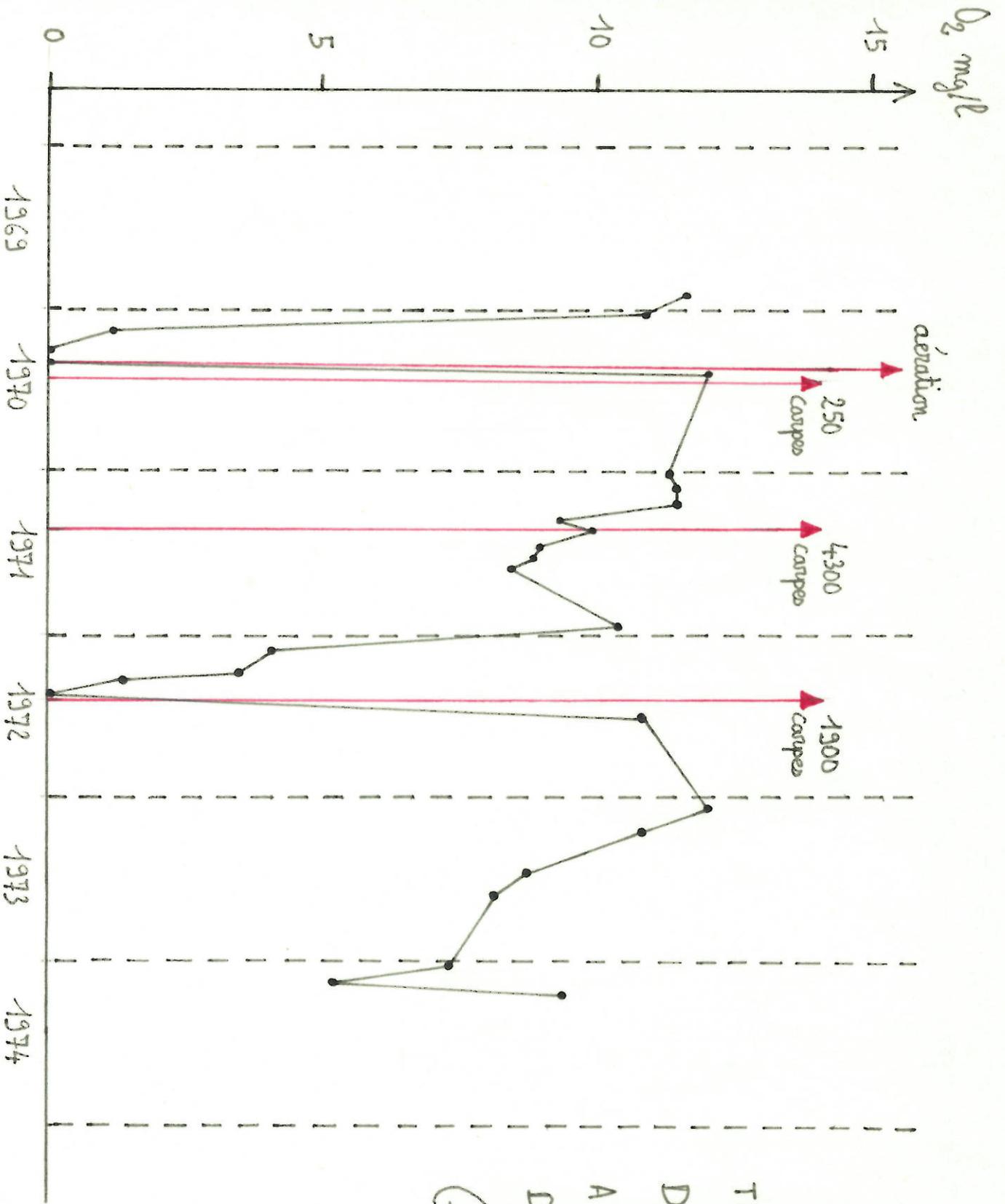
Un dernier essai a été fait en 1972 avec 1900 carpes d'un poids moyen de 185 g. L'effet sur le macrophyte est tout à fait concluant: il y a eu au cours des étés 1972 et 1973 une disparition presque complète des macrophytes (sauf Phragmites communis). De plus la bonne oxygénation hivernale du lac s'est maintenue de 1970 à 1974 (figure 56).

Cette méthode est cependant source de contradictions entre spécialistes: en effet, son intérêt est discuté car l'élimination des macrophytes a coïncidé, notamment en 1972, avec une très forte augmentation de la croissance du phytoplancton (voir figure 57): elle était en 1972 dix fois supérieure à ce qu'elle était en 1969, avant le début de la restauration; une diminution a été observée en 1973 et 1974 mais la production restait très forte.

Une critique importante est également souvent faite aux méthodes de contrôle biologique: celles-ci, en effet, diffèrent fondamentalement des méthodes de contrôle mécanique, dans la mesure où elles n'impliquent pas une élimination d'une partie de la biomasse du système lacustre mais un simple transfert; du point de vue de la restauration, l'élimination est habituellement considérée comme l'objectif prioritaire.

C) LIMITATION DE LA QUANTITE DE PHOSPHORE UTILISABLE PAR PRECIPITATION DIRECTEMENT DANS LE LAC (Landner, 1970, réf. 23)

Le Löttsjön et le Langsjön sont des lacs de petite dimension (respectivement 0,06 et 0,28 km²) et de faible profondeur (profondeur moyenne: 1,5 et 2,3 respectivement). Tous deux sont fortement

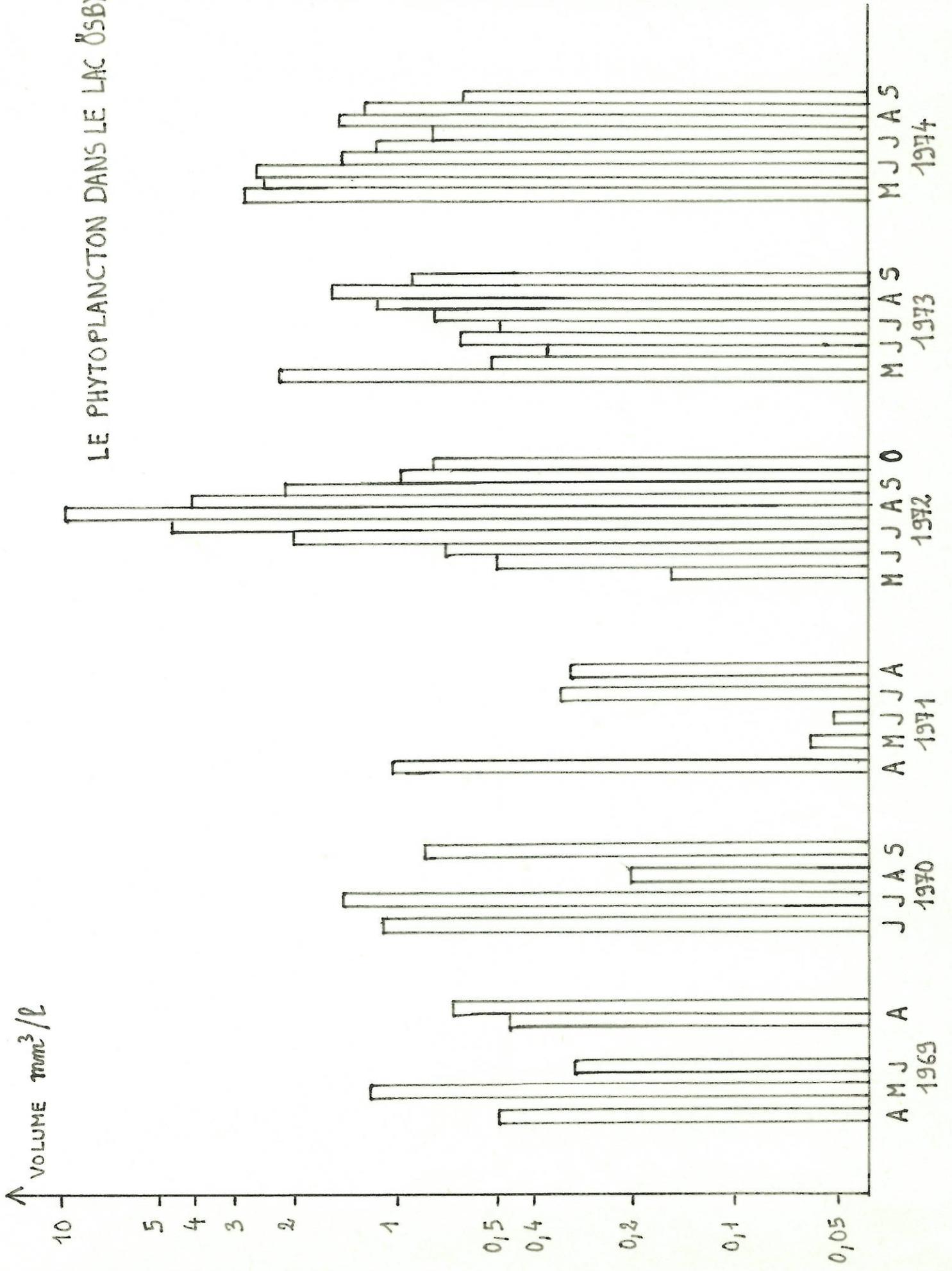


TENEUR EN OXYGENE
 DU LAC "OSBYSSJÖN"
 A LA PROFONDEUR
 DE 2 METRES
 (profondeur maximale
 du lac : 2,8 m)

FIGURE 56

FIGURE 57

LE PHYTOPLANCTON DANS LE LAC ÖSBYSJÖN



eutrophisés.

Après la dérivation, assez complète, des eaux usées (construction d'une conduite autour du lac Langsjön), la biomasse est demeurée extrêmement élevée.

On a, à plusieurs reprises, tenté de limiter la croissance du phytoplancton en réalisant une précipitation du phosphore assimilable en période de production. Le produit utilisé est le sulfate d'aluminium, tel qu'on l'emploie dans les stations d'épuration; les quantités utilisées sont respectivement de 133 et 116 g/m² (soit 90 et 50 g/m³).

Le sulfate d'aluminium a deux avantages: il n'est pas toxique aux teneurs employées et il forme des complexes peu solubles même en milieu réducteur.

Les figures 58 et 60 montrent qu'il s'est produit, dans les deux cas, une diminution de la teneur en phosphore du lac; cette situation s'est prolongée de 6 mois à 2 ans.

D'autre part, on a constaté une augmentation de la transparence; mais, dans le cas du lac Lötsjön, seulement dans le mois suivant le traitement (figures 59 et 61).

Pour ce qui est de l'oxygène, les figures 58 et 62 montrent une légère amélioration: il faut cependant noter que des dégagements d'hydrogène sulfuré se sont produits dans le lac Längsjön au cours des deux hivers qui ont suivi l'opération de restauration.

La figure 59 indique l'influence du traitement sur la teneur en sulfate des eaux du lac Langsjön.

Enfin il faut surtout noter qu'aucun effet important du traitement de précipitation sur la production du phytoplancton n'a pu être observé; tout au plus a-t-on constaté certains changements qualitatifs (apparition des péridinées *Peridinium cinctum* et *aciculiferum* et de la chrysomonadinée *Dinobryon sertularia*) (voir figure 63).

En conclusion, on peut dire que la précipitation du phosphore dans le lac lui-même est une opération qui a certains effets positifs - diminution de la teneur en phosphore, augmentation de la transparence, meilleure oxygénation - mais qui ne sont que temporaires; il faut la répéter après un ou deux ans. L'intérêt de cette méthode est aussi limité par le fait qu'elle semble avoir été jusqu'ici pratiquement sans effet sur la production planctonique - dont la diminution était l'objectif même de ces tentatives de restauration.

Il semble cependant que cette méthode peut être utile dans certains cas: par exemple lorsque le sédiment a été remué et demeure en suspension ou pour précipiter le phosphore avant une opération de dragage de la vase.

PRECIPITATION DU PHOSPHORE
DANS LE LAC LANGSJÖN -
INFLUENCE SUR LES TENEURS
EN P-total, P-PO₄ ET O₂

O₂
(% saturation)

O₂ (% saturation)

µg/l

150

100

50

0

100

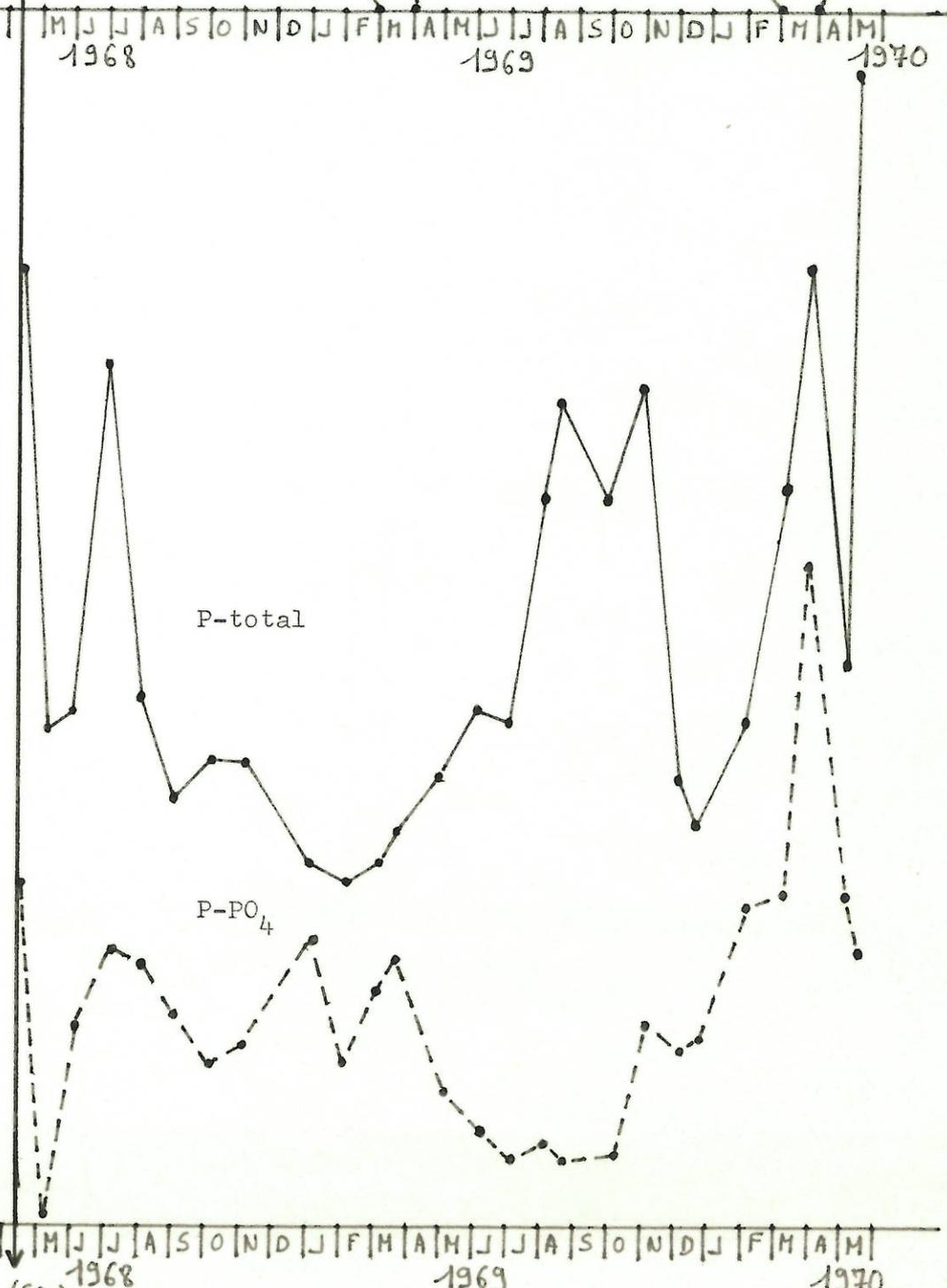
50

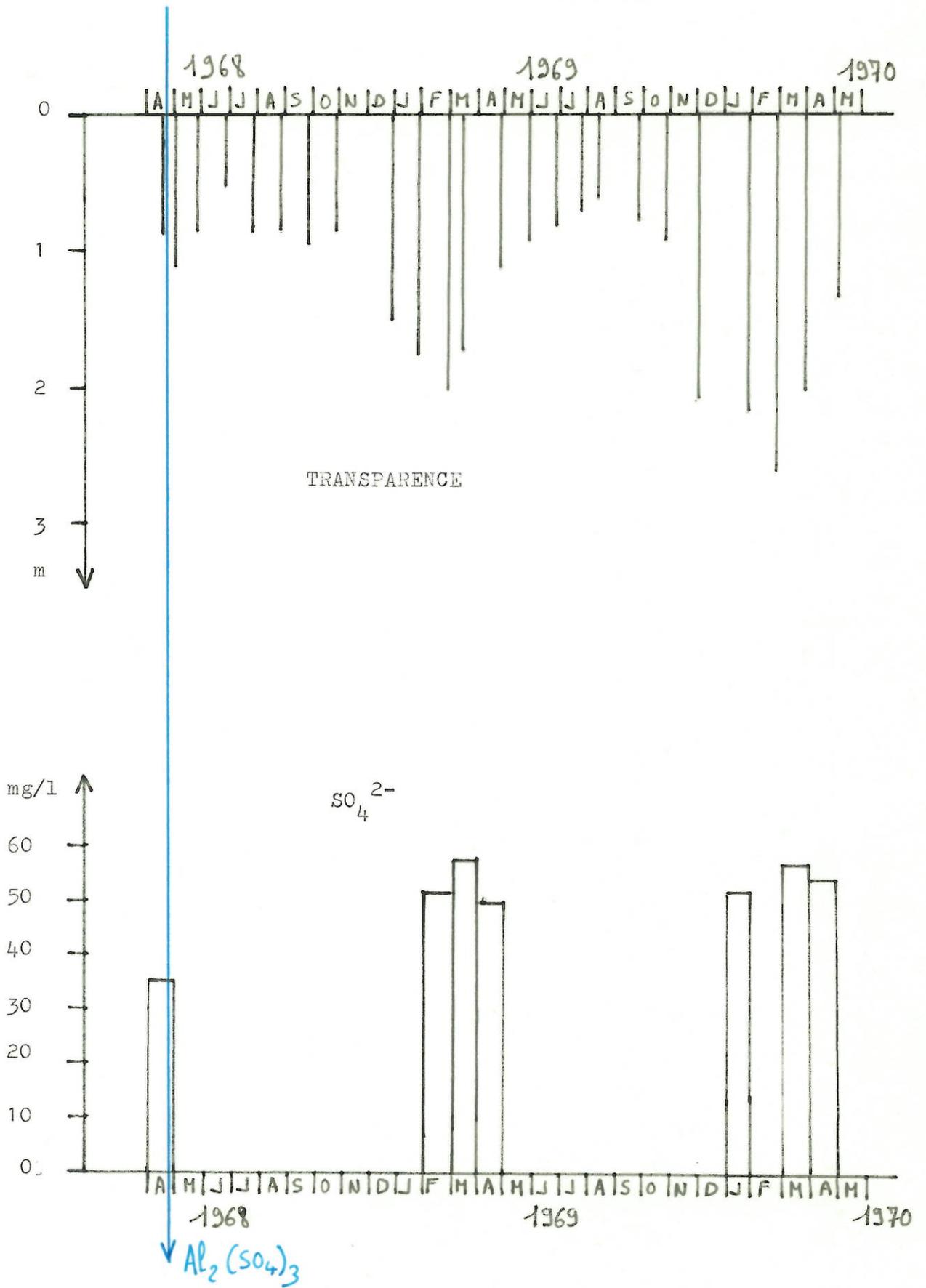
0

P-total

P-PO₄

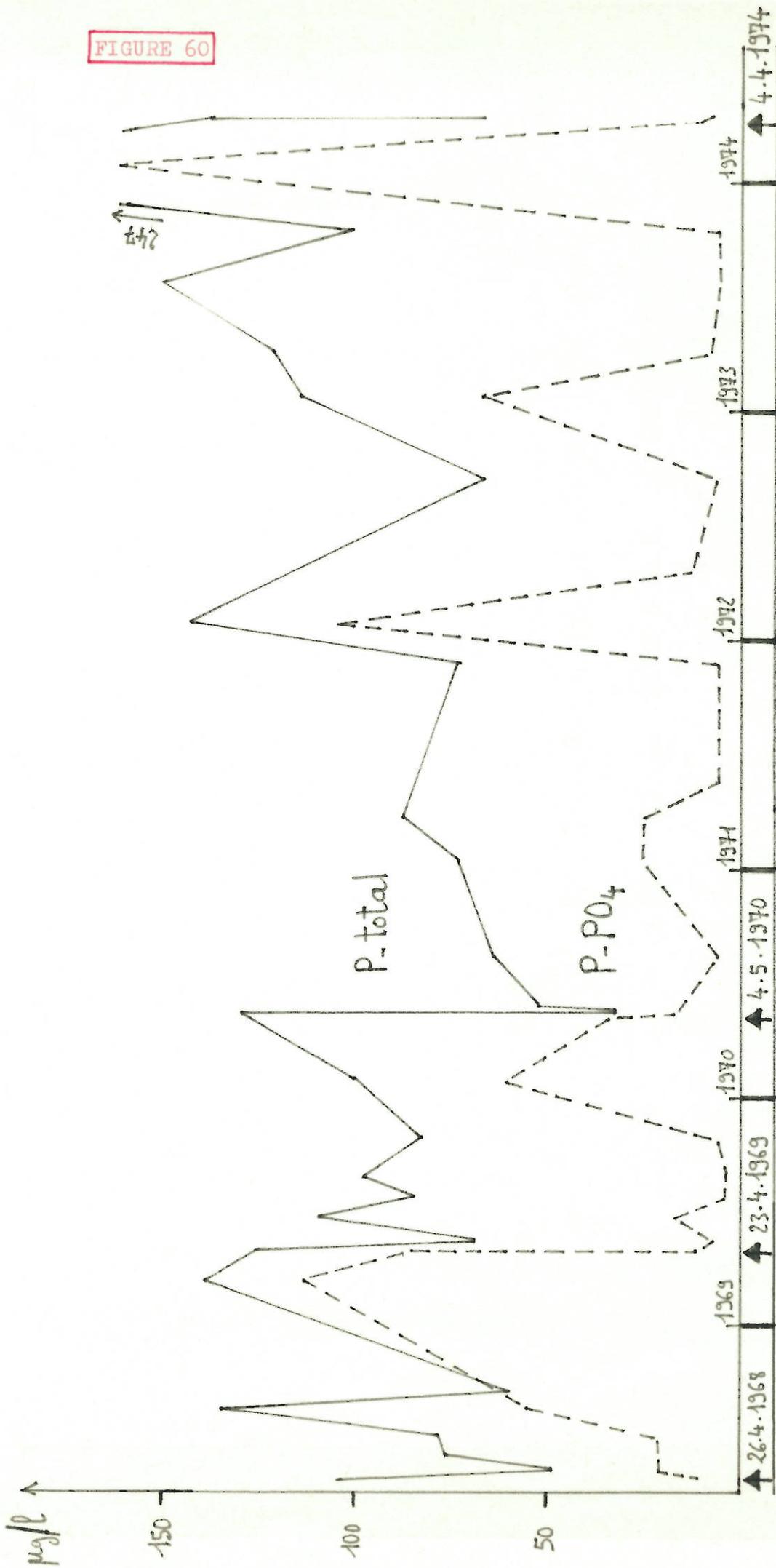
Al₂(SO₄)₃



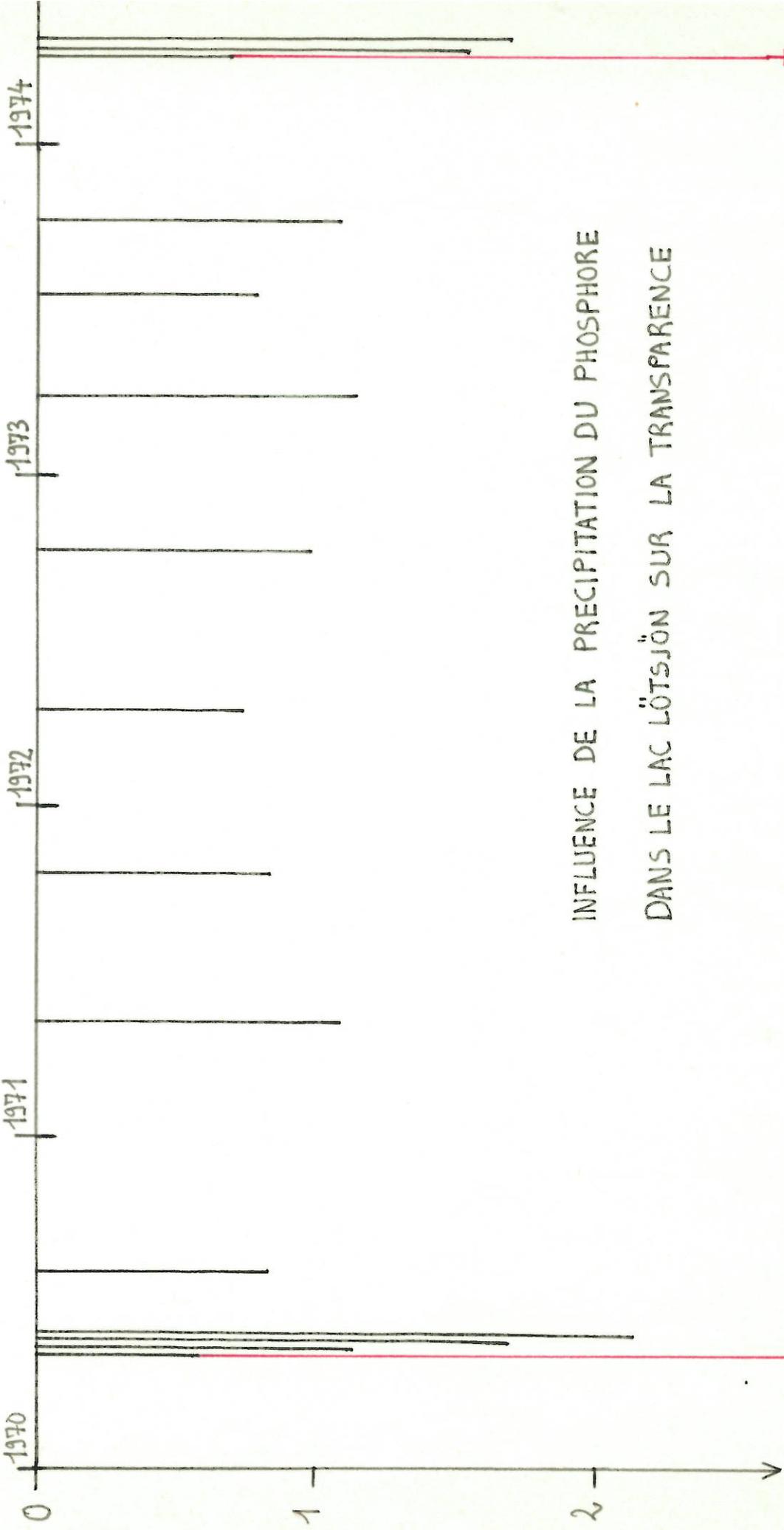


INFLUENCE DE LA PRECIPITATION DU PHOSPHORE DANS LE LAC LANGSJÖN SUR LA TRANSPARENCE ET LA TENEUR EN ION SO_4^{2-}

FIGURE 60



INFLUENCE DE LA PRÉCIPITATION DU PHOSPHORE DANS LE LAC LÖTTSJÖN
EN 1968, 1969, 1970 ET 1974 SUR LA TENEUR EN P-total et P- PO_4



INFLUENCE DE LA PRECIPITATION DU PHOSPHORE
DANS LE LAC LÖTSJÖN SUR LA TRANSPARENCE

FIGURE 61

precipitation

precipitation

FIGURE 62

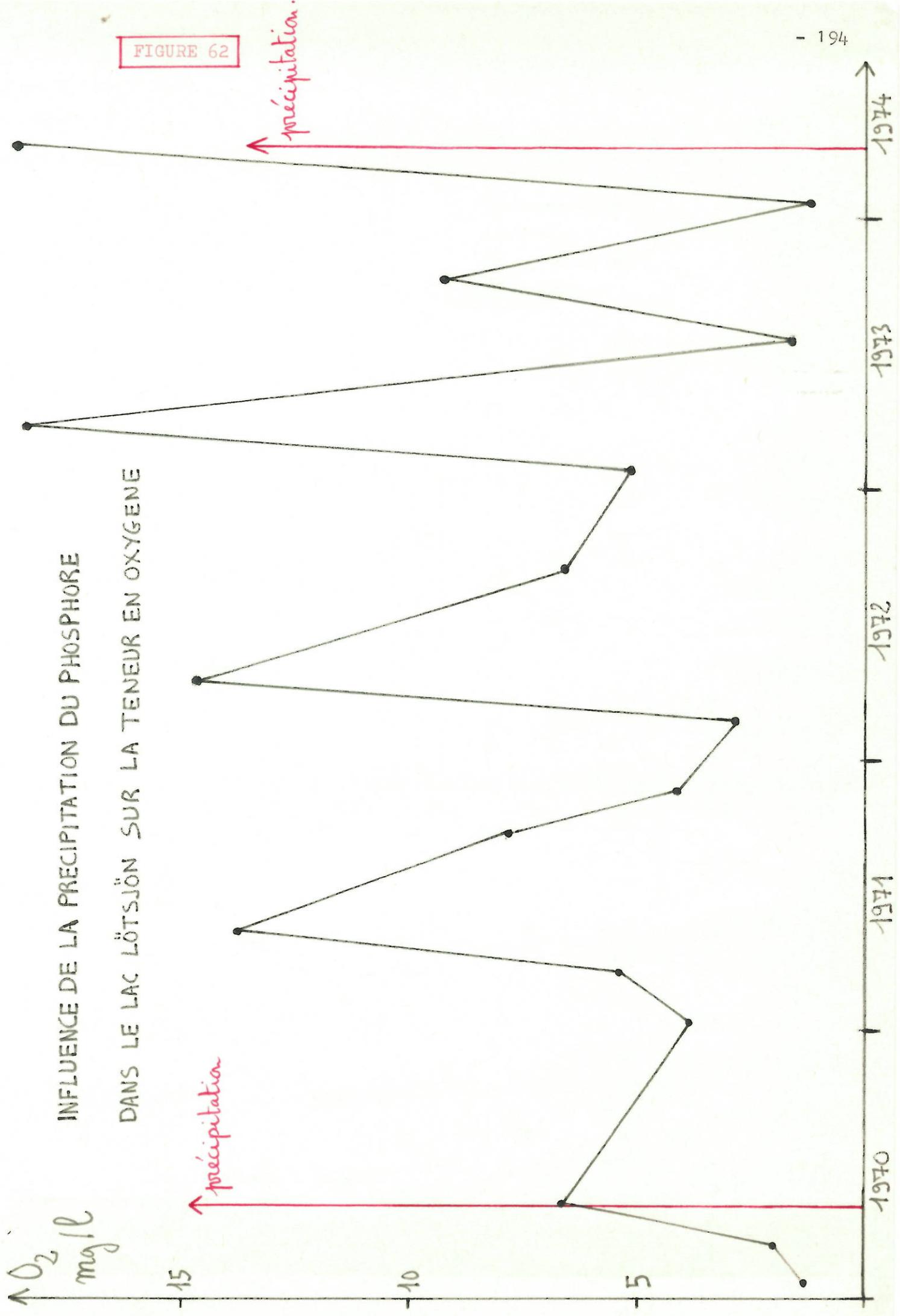


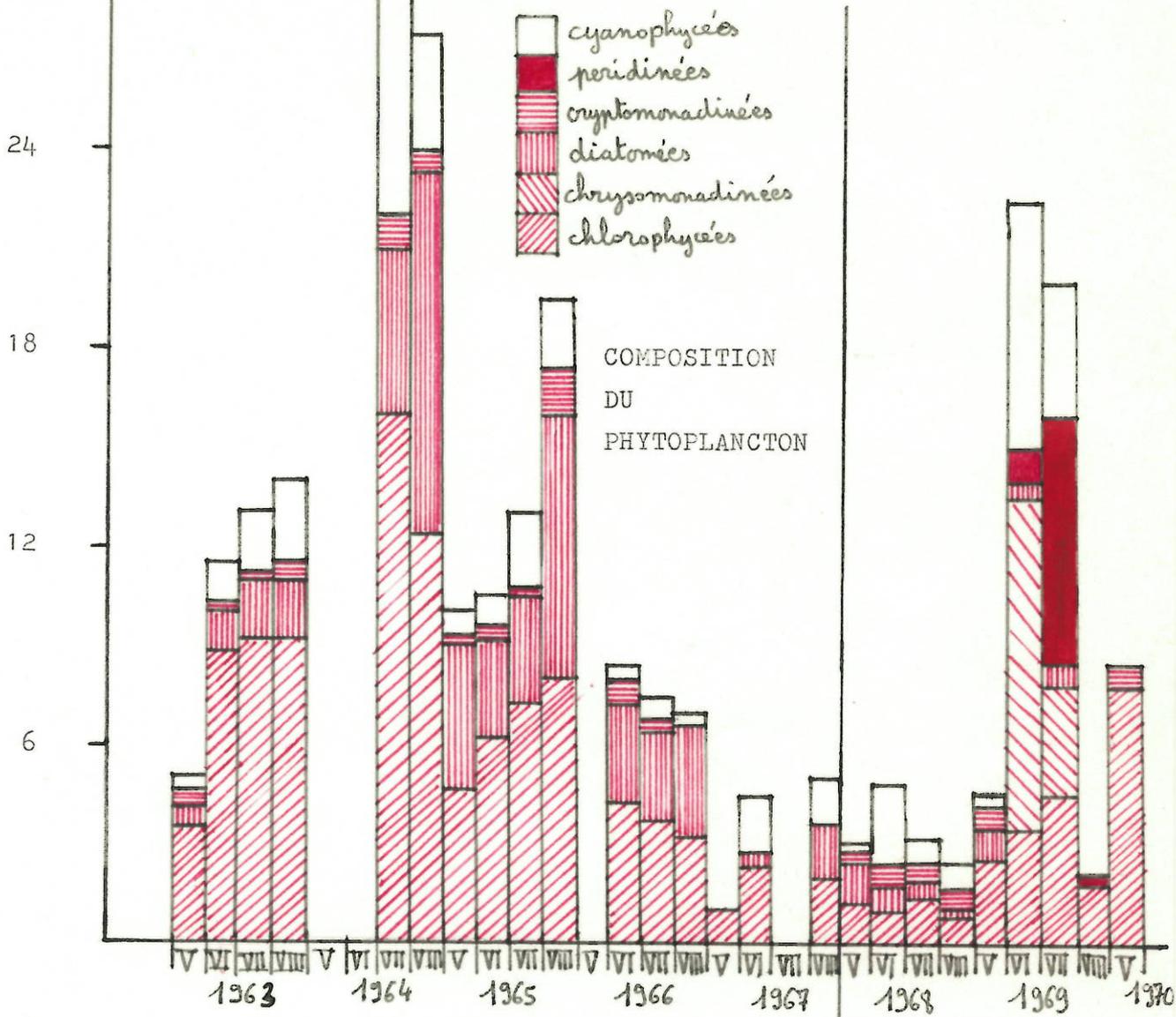
FIGURE 63

A LA PRECIPITATION DU PHOSPHORE

DANS LE LAC LANGSJÖN - EVOLUTION DU

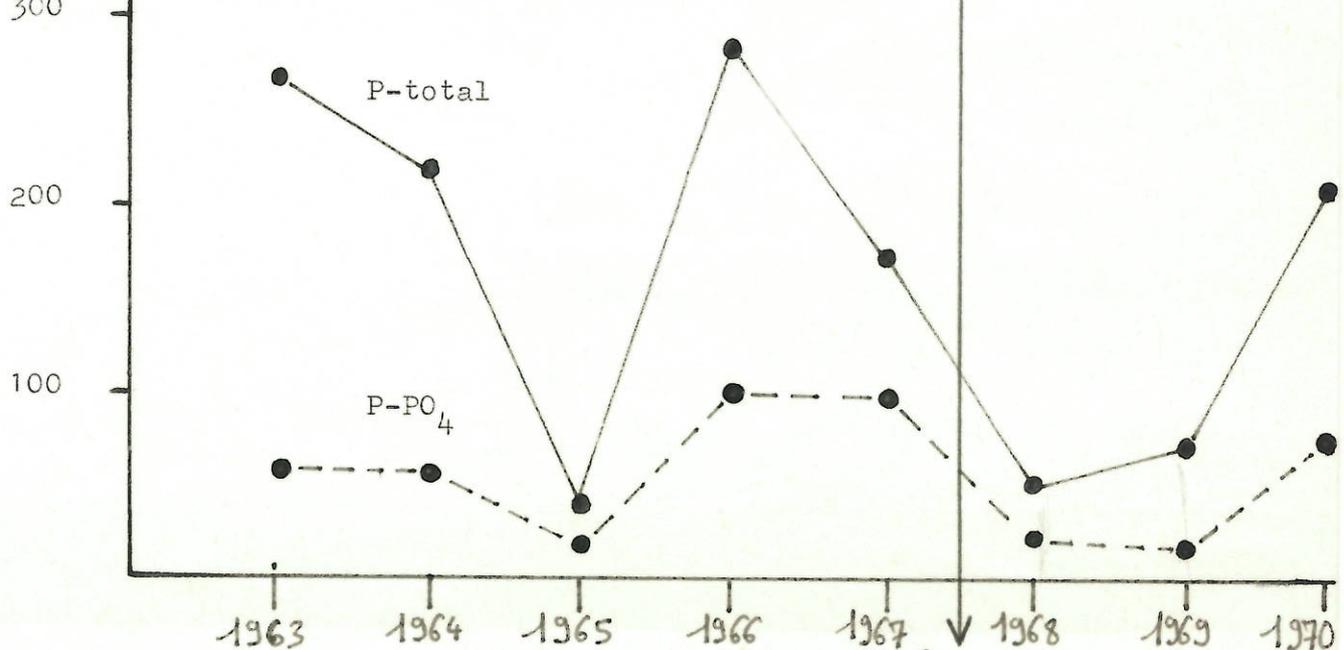
PHOSPHORE ET DE LA COMPOSITION DU PHYTOPLANCTON

volume
 $10^9 \cdot \mu^3/l$



$\mu g/l$

TENEUR MOYENNE ESTIVALE EN PHOSPHORE



$Al_2(SO_4)_2$

D) OXYGENATION DES EAUX DU FOND EN PERIODE DE STRATIFICATION THERMIQUE (Björk, 1973, réf. 24)

1) Introduction

Le problème principal causé par l'eutrophisation est une consommation trop forte de l'oxygène de l'hypolimnion en période de stagnation (de stratification thermique).

Deux méthodes ont été testées en Suède pour l'aération artificielle des eaux profondes: il s'agit d'un système de déstratification utilisé dans le cas de lacs peu profonds avec plusieurs stratifications successives au cours de l'été et d'un système d'aération de l'hypolimnion pour les lacs profonds qui présentent une stratification stable.

2) Déstratification artificielle

La déstratification peut être réalisée par deux méthodes:

- 1) le pompage des eaux de l'hypolimnion vers l'épilimnion
- 2) l'utilisation d'air comprimé

La première méthode n'est applicable que dans des lacs de faible superficie (inférieure à 10-50 ha) et elle nécessite une plus forte consommation d'énergie; la seconde méthode lui est donc préférée.

Notons que dans le cas de la déstratification à l'aide d'air comprimé le but est de maintenir artificiellement la circulation; la dissolution d'oxygène de l'air pompé n'a qu'une importance minime.

La déstratification ne peut avoir d'effet que pour des lacs de faible profondeur dans lesquels seule une couche d'eau de faible épaisseur est désoxygénée; dans ce cas le rapport entre les volumes d'eau avec et sans oxygène est favorable.

C'est le cas du lac Väckjösjön, dont les caractéristiques principales sont présentées à l'annexe 6.

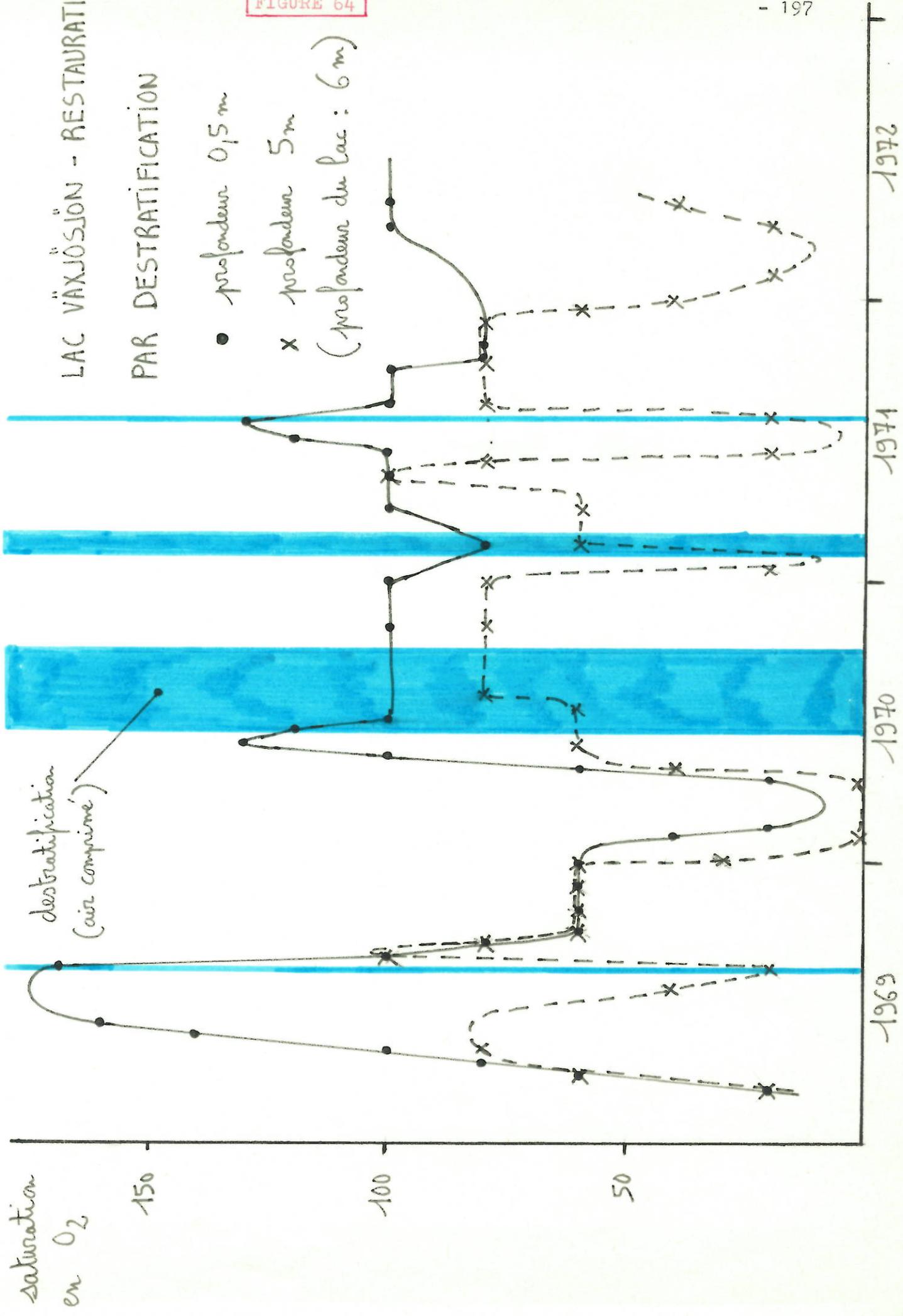
Il s'agit d'un lac dont l'état d'eutrophie est très ancien (plus de deux siècles). En 1958 on a dérivé l'ensemble des eaux usées urbaines et industrielles. Cependant, onze ans après, en 1969, la situation dans le lac était toujours extrêmement mauvaise. Il fut donc décidé d'essayer d'accélérer le processus de guérison en procédant à la réoxygénation des eaux du fond lors des périodes critiques.

L'installation consiste en des tubes de polyéthylène perforés

FIGURE 64

LAC VÄXJÖSNÖN - RESTAURATION
PAR DESTRATIFICATION

● profondeur 0,5 m
x profondeur 5 m
(profondeur du lac : 6 m)



1972

1971

1970

1969

saturation en O₂

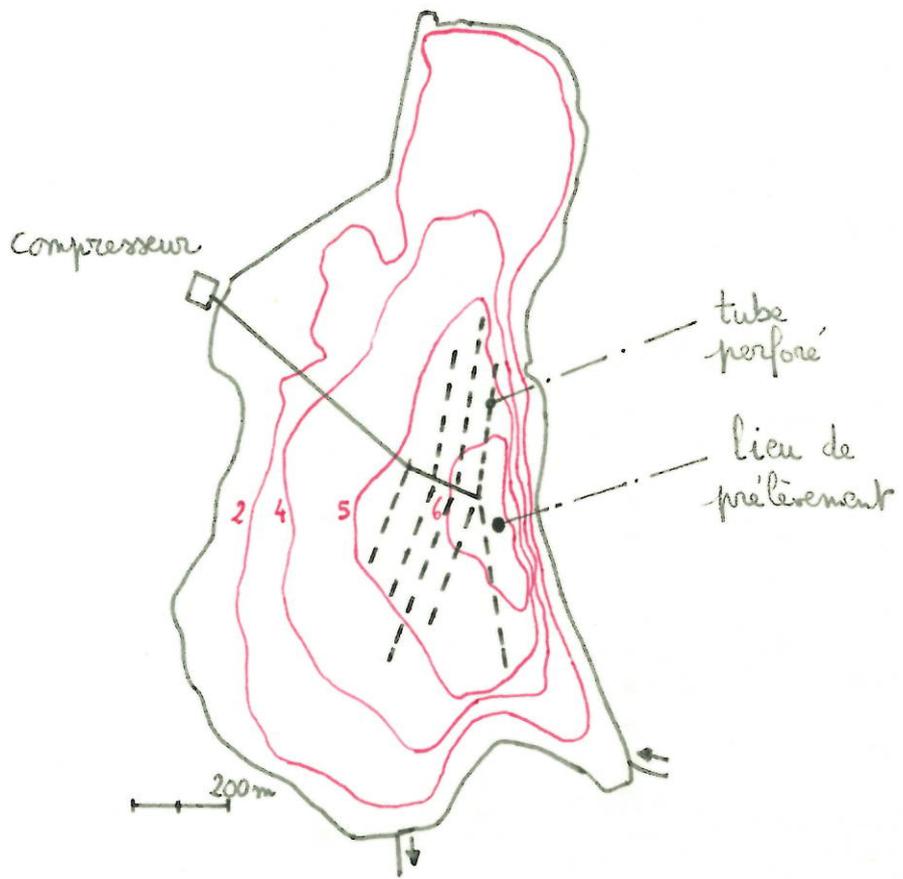
150

100

50

FIGURE 65

LAC VÄXJÖSJÖN - SYSTEME DE DISTRIBUTION
DE L'AIR COMPRI ME



(diamètre des trous: 0,8 mm, distance entre les trous: 5 m environ) fixés à environ 0,5 m au dessus du fond. Ces "rideaux de bulles" couvrent environ 10% de la surface du lac, c'est à dire approximativement la partie de profondeur supérieure à 5 m (voir figure 65).

Le système fonctionne de façon intermittente: aussitôt que la teneur en oxygène du lac commence à décroître, on fait fonctionner le compresseur (voir figure 64) et cela jusqu'au retour à une situation satisfaisante.

Les effets de ce système ont été, pour le lac Väckjösjön, tout à fait positifs. En général, deux jours ont été suffisants (en été comme en hiver) pour briser la stratification et obtenir une bonne oxygénation de l'ensemble de la colonne d'eau. Le phosphore, le fer, le manganèse et l'azote ont pu être maintenus à des concentrations suffisamment faibles pour que l'équilibre entre la production et la minéralisation (et la capacité d'auto-épuration du lac) soit rétabli. Actuellement, si le lac demeure eutrophe (ce qui était sa nature déjà à l'époque pré-industrielle), la situation est en très nette amélioration.

3) Aération de l'hypolimnion

Dans le cas des lacs profonds il est essentiel de ne pas briser la stratification thermique et chimique de façon à ce que les sels nutritifs accumulés dans les eaux profondes ne gagnent pas la strate productive et à ce que les eaux de l'hypolimnion ne soient pas réchauffées, ce qui entraînerait une consommation accrue d'oxygène par le sédiment de surface.

Le lac Järila a une profondeur moyenne de 9,3 m et une profondeur maximale de 24 m (autres caractéristiques à l'annexe 6). En 1969, la presque totalité des eaux usées a été détournée. La société Atlas-Copco avait mis au point pour l'aération de ce lac le procédé suivant: l'eau de l'hypolimnion est aspirée à l'aide d'injection d'air comprimé, réoxygénée par contact avec cet air puis renvoyée immédiatement au fond, sans changement de température. Ce procédé a été par la suite simplifié: l'appareillage utilisé actuellement est entièrement immergé; il a été utilisé dans une dizaine de lacs sous le nom de "Limno".

Cette méthode a donné des résultats tout à fait satisfaisants, dans la mesure où elle permet de fixer la teneur en oxygène des eaux de l'hypolimnion au niveau désiré (7,5 mg/l au lac Järila). L'efficacité

est bonne: un apport de 0,40 kg O₂/min a permis d'accroître la réserve d'oxygène de l'hypolimnion de 0,15 kg O₂/min. La figure 66 montre les résultats de l'aération du lac Järila au cours de l'été 1970: on voit que les eaux profondes sont demeurées aérobie pendant toute la période de production - contrairement à ce qui s'était passé au cours de l'année précédente. Après trois mois de traitement (juin-août), la surface du sédiment était oxydée et la concentration en phosphore de l'hypolimnion avait décréue.

4) Conclusion

En principe la méthode d'aération de l'hypolimnion est préférable à la méthode de déstratification; il s'agit de la seule qui soit applicable pour les lacs très profonds, mais même dans le cas des lacs de profodeur moyenne elle ne présente pas certains inconvénients de la déstratification.

En effet, cette dernière méthode doit être appliquée avec précaution car le risque existe d'une augmentation de la production planctonique en raison du contact créé entre les eaux de fond plus riches en sels nutritifs et les eaux chaudes de surface. Notons toutefois que dans le cas du lac Väckjö on a au contraire assisté à une (légère) diminution de cette production.

D'autre part, le refroidissement des eaux de surface d'une part diminue l'évaporation et d'autre part... rend les baignades moins agréables.

Elle a par contre l'avantage d'augmenter l'espace habitable par les poissons et donc leur population.

L'aération de l'hypolimnion est une méthode assez coûteuse, qui doit cependant être à peu près équivalente à la déstratification du point de vue économique: en effet, l'aération de l'hypolimnion n'est réalisée qu'en un point du lac tandis que la déstratification doit l'être dans l'ensemble du lac (ou du moins dans l'ensemble des parties profondes du lac que la convection naturelle - provoquée par les vents - est impuissante à réoxygéner).

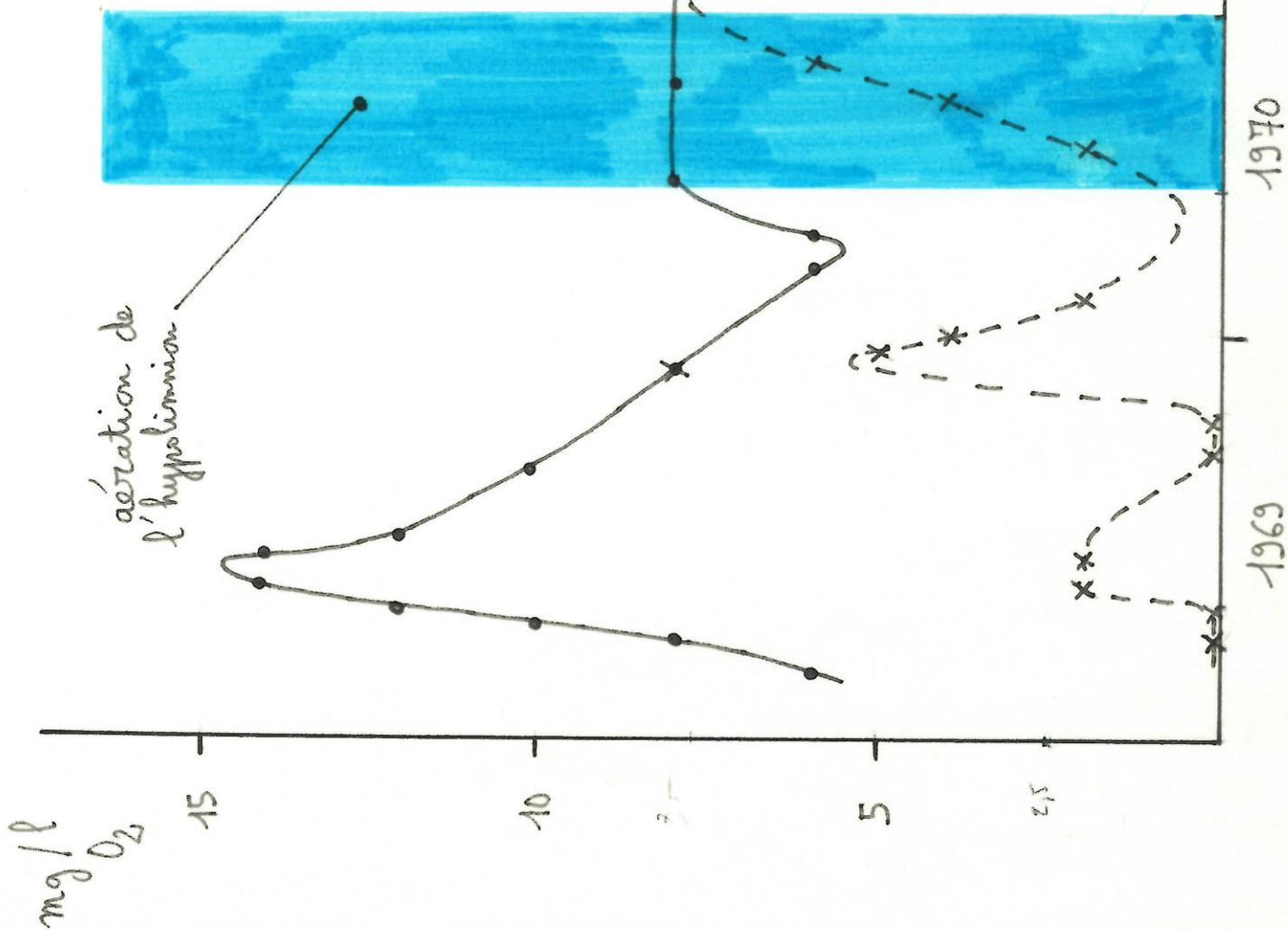
Les cas où les méthodes d'oxygénation des eaux profondes semblent être d'une application intéressante sont les suivants:

1) lorsque la dérivation complète ou une épuration poussée des eaux usées est réalisée, elles peuvent permettre d'avancer de plusieurs années la guérison du lac

2) pour les lacs artificiels, dans les premières années

LAC JÄRLASJÖN - RESTAURATION PAR
AÉRATION DE L'HYPOLIMNION

- profondeur 0,5 m
- x profondeur 20 m
(profondeur du lac = 24 m)



aération de l'hypolimnion

1969 1970 1971 1972

suivant la mise en eau - ce qui doit permettre de les utiliser rapidement pour les besoins récréatifs de la population voisine

3) dans le cas où une épuration poussée ou la dérivation des eaux usées est en projet, pour permettre d'éviter dans l'intérim des dommages irréversibles ou la mort du lac.

4) dans le cas où le lac est utilisé pour l'approvisionnement en eau potable, un usage plus ou moins permanent de ces méthodes est envisagé

E) INTERVENTION AU NIVEAU DES SEDIMENTS

1) Enlèvement des sédiments de surface par pompage (Björk, 1973, réf. 24)

Cette méthode a été employée pour la première fois pour la restauration du lac Trummen.

A l'origine oligotrophique, ce lac a été un récepteur surchargé d'eaux usées de 1936 à 1958. En dépit du détournement complet réalisé en 1958, le lac ne retrouva pas sa capacité d'auto-épuration au cours des douze années suivantes. Ceci est dû à l'extrême richesse du sédiment en sulfure et phosphore jusqu'à une profondeur de 30-40 cm (voir figure 67). La concentration en phosphate de l'eau interstitielle dépassait 2 mg/l à une profondeur de 15 cm: Les dommages étaient irréversibles (voir figure 68).

Le problème fut résolu en pompant les sédiments riches en sels nutritifs dans des bassins de dépôt; l'eau de décantation fut traitée par le sulfate d'aluminium dans une simple station d'épuration avant d'être retournée au lac; les boues obtenues furent utilisées comme engrais dans des parcs. Dans le même temps, on procéda à une élimination d'une partie des plantes aquatiques.

Dans une telle restauration, il s'agit essentiellement de déterminer l'épaisseur de sédiment qui doit être pompée de façon à ce que la nouvelle surface de contact entre l'eau et le sédiment soit impropre au relâchement du phosphore. Pour cela, les tests de fertilité potentielle réalisés sur les eaux interstitielles sont un excellent moyen d'obtenir les informations nécessaires. Ainsi, la figure 69 montre qu'il était nécessaire d'enlever au moins 30 cm de sédiment dans le cas du lac Trummen. La quantité enlevée a été en fait de 50 cm; ce qui correspond à 55 tonnes de phosphore, soit

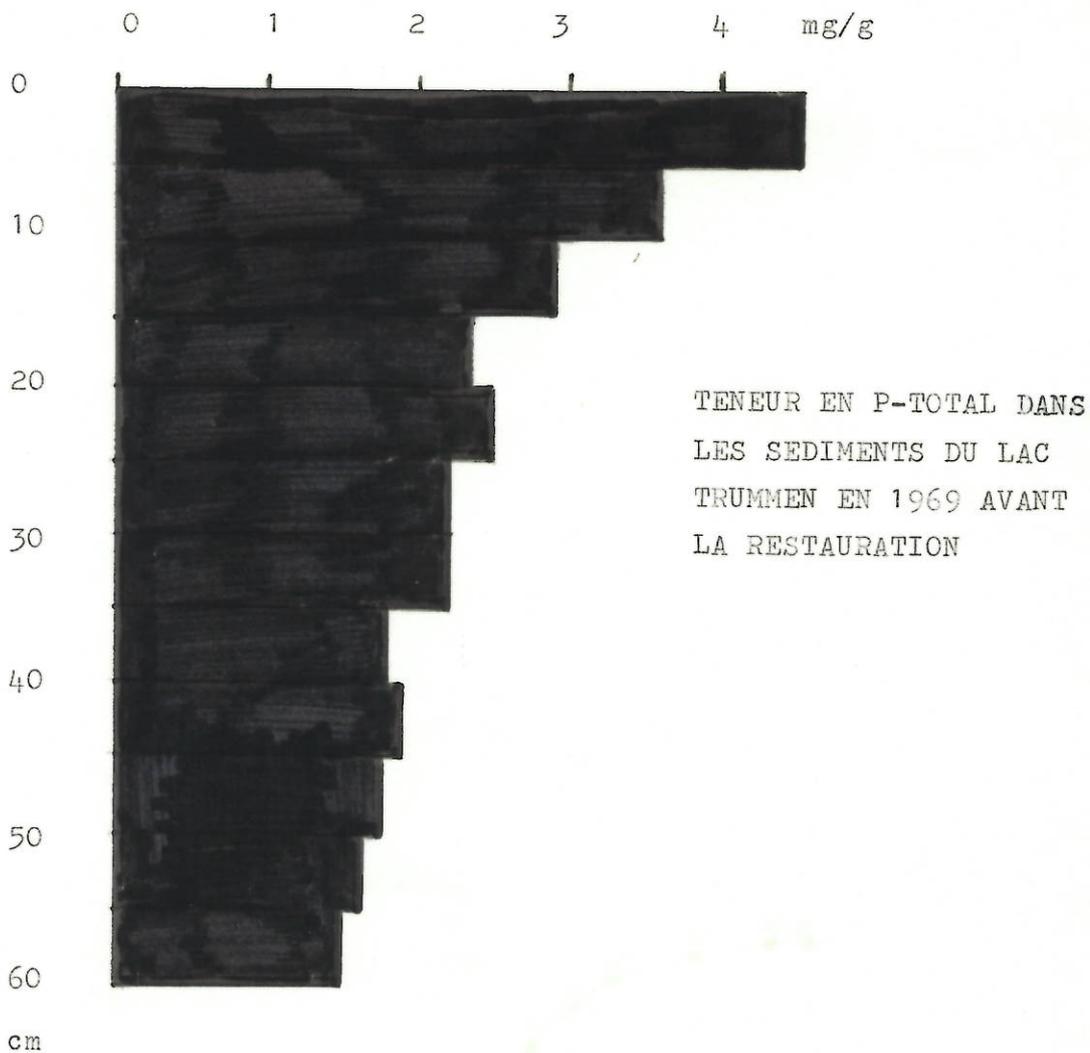
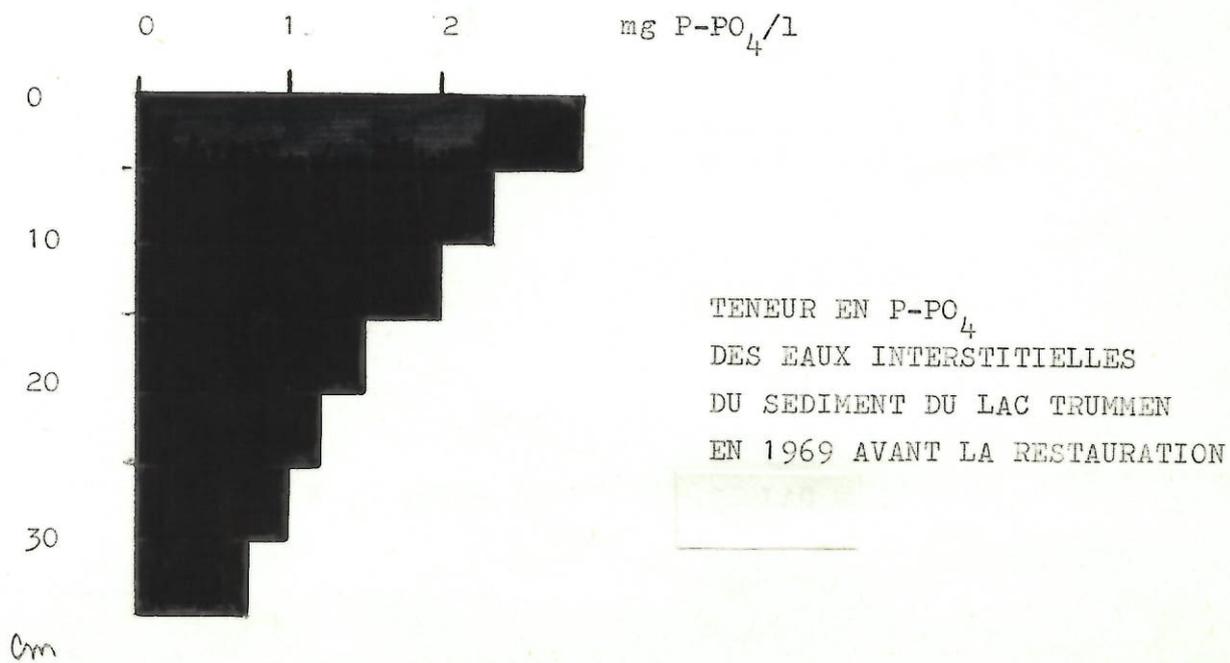
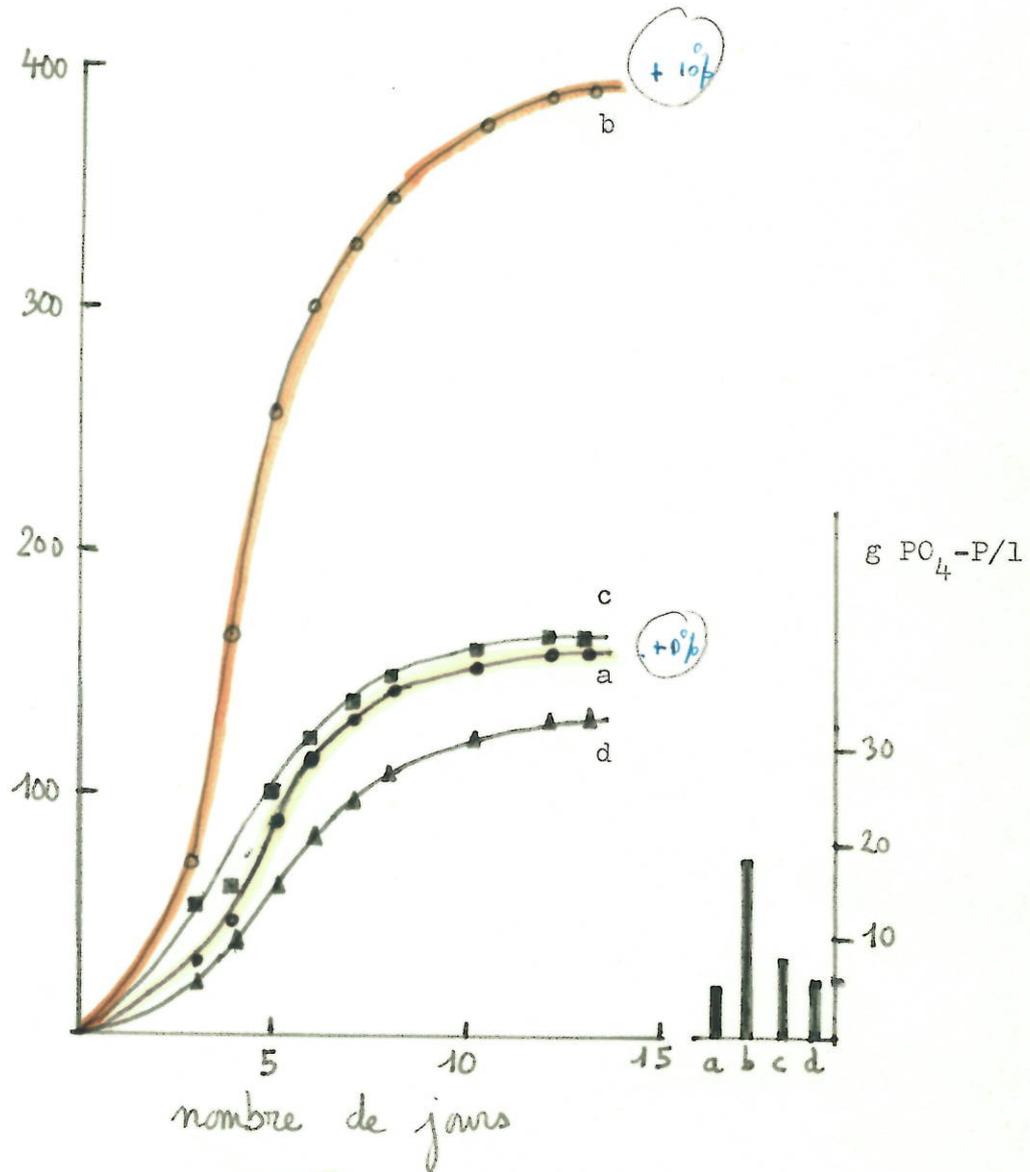


FIGURE 68



TESTS AVEC SELENASTRUM CAPRICORNUTUM
 MONTRANT L'INFLUENCE FERTILISANTE DES
 EAUX INTERSTITIELLES DES DIFFERENTES COUCHES
 DU SEDIMENT EN 1970 AVANT LA RESTAURATION
 DU LAC TRUMMEN



● = eau du lac



eau du lac + 10% eau interstitielle de la couche 0-10 cm du sédiment



eau du lac + 10% eau interstitielle de la couche 10-30 cm du sédiment



eau du lac + 10% eau interstitielle de la couche 30-50 cm du sédiment

plus du double de celle déposée au cours de la période de pollution (24 tonnes).

La restauration a eu des effets tout à fait concluants: les teneurs en phosphore et azote des eaux du lac ont fortement diminué (figure 70), de même que la consommation d'oxygène du nouveau sédiment de surface.

D'autre part, la fertilité potentielle de l'eau interstitielle a diminué de façon radicale (figure 71).

Au sujet du phytoplancton, on a assisté à la fois à une diminution de la biomasse et à un net accroissement de la diversité des espèces (importance accrue du nanoplancton). Mais le lac reste toutefois eutrophe: son évolution sera suivie jusqu'en 1980.

Cette méthode exige de prendre de grandes précautions non seulement dans le choix du nouveau fond du lac mais aussi dans la conception du dispositif utilisé pour le pompage; il s'agit de remuer le moins possible la vase. Dans le cas du lac Trummen, comme il n'y avait pas de végétation submergée avant la restauration, il s'est produit la resuspension d'une masse importante de détritiques et la transparence a diminué pendant une année.

La méthode mise au point au lac Trummen a été et est employée pour la restauration d'autres lacs en Suède (voir tableau 19). C'est le cas du lac Trehörningen (figures 72 à 74).

La restauration de ce lac a été une opération coûteuse (voir F, tableau 20). La municipalité concernée (Huddinge, près de Stockholm) estime toutefois qu'il s'agit d'un investissement très bien placé, dans la mesure où le lac est rapidement devenu un complexe de loisirs très fréquenté.

2) Oxydation des sédiments (Ripl, 1976, réf. 25)

Une méthode nouvelle dont l'objectif est de diminuer la consommation d'oxygène par le sédiment et d'empêcher le relâchage de phosphore a été expérimentée dans un lac de petite dimension, le Lillesjön (voir annexe 6).

Il s'agit d'une oxydation in-situ du sédiment riche en sels nutritifs par le nitrate de calcium: la matière organique dégradable est oxydée par dénitrification.

Le traitement a été, en fait, réalisé en quatre temps (figure 75):

- 1) 13 tonnes de chlorure ferrique permirent tout d'abord

TESTS AVEC SELENASTRUM CAPRICORNUTUM
 MONTRANT L'INFLUENCE FERTILISANTE DES
 EAUX INTERSTITIELLES AVANT, DURANT ET
 APRES LA RESTAURATION DU LAC TRUMMEN

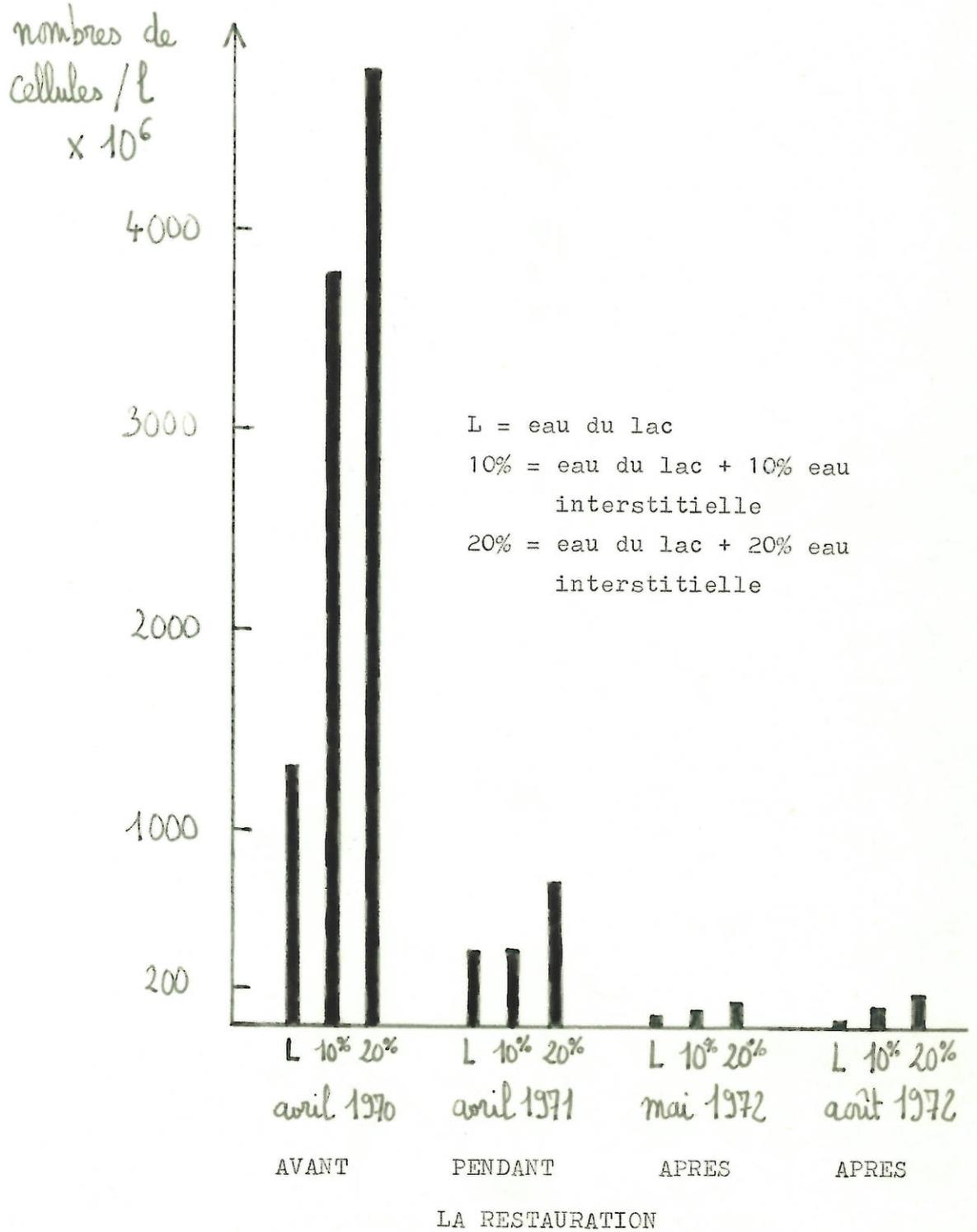
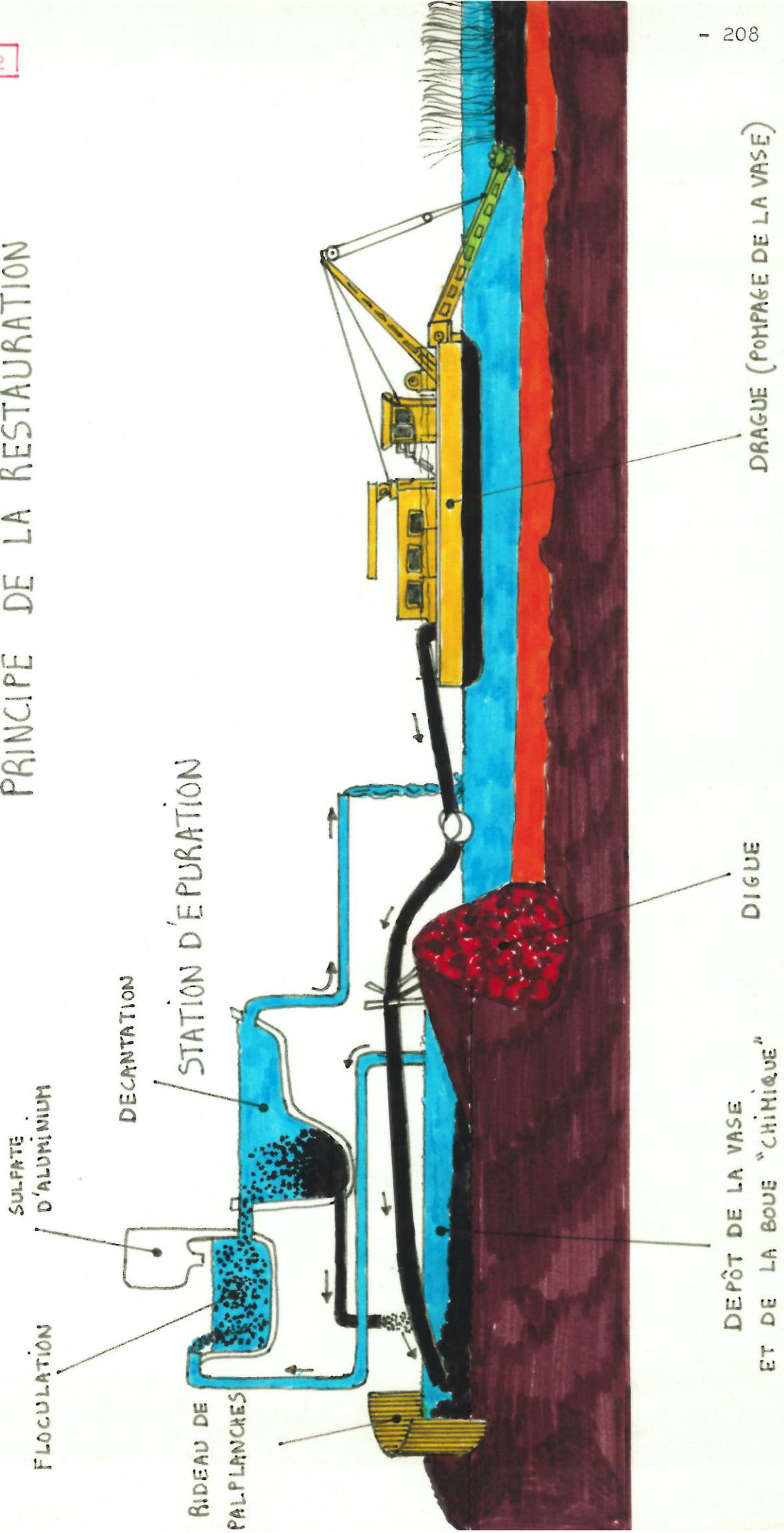


FIGURE 72

LAC TREHÖRNINGEN PRINCIPE DE LA RESTAURATION

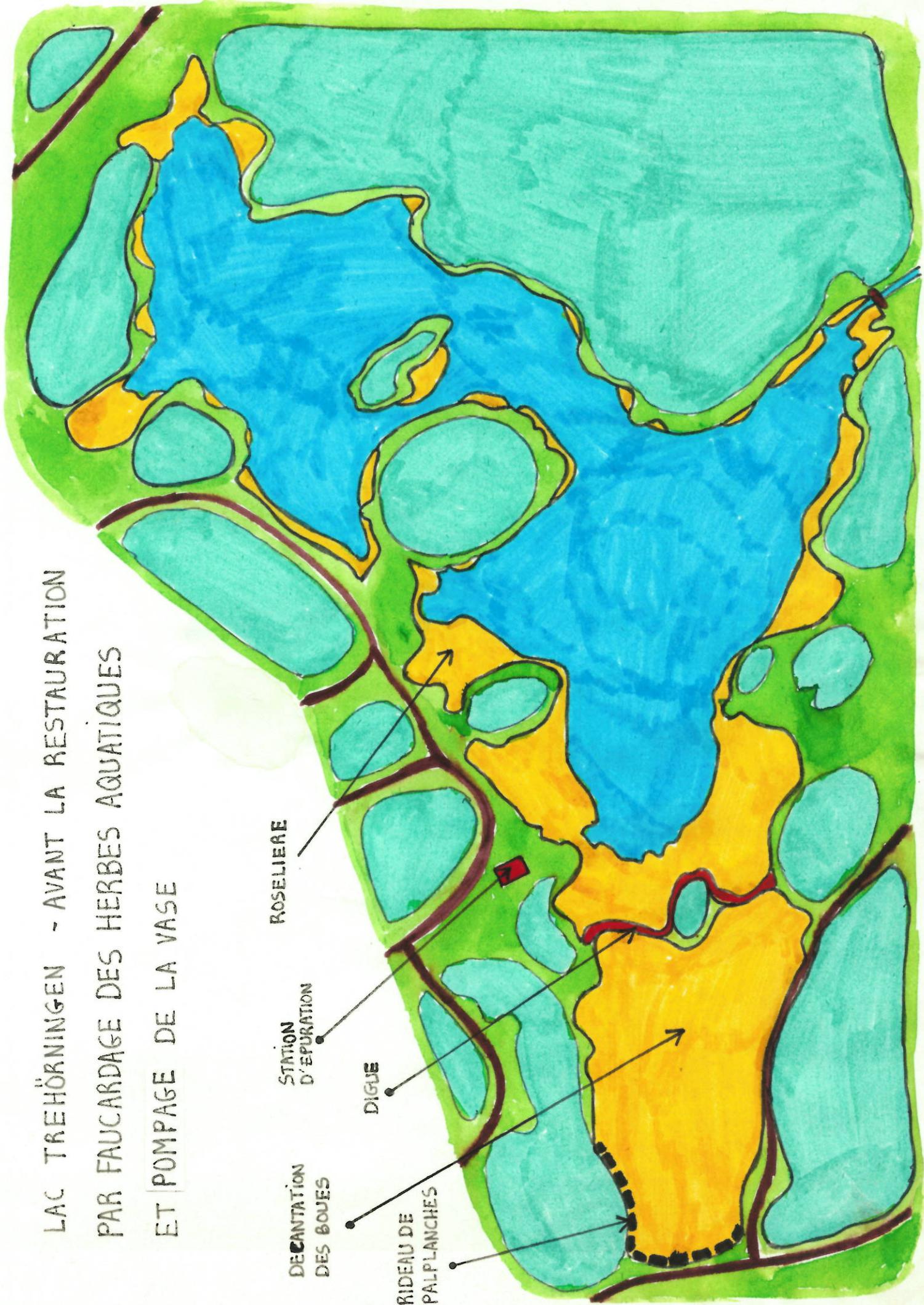


DEPÔT DE LA VASE
ET DE LA BOUE "CHIMIQUE"

DIGUE

DRAGUE (POMPAGE DE LA VASE)

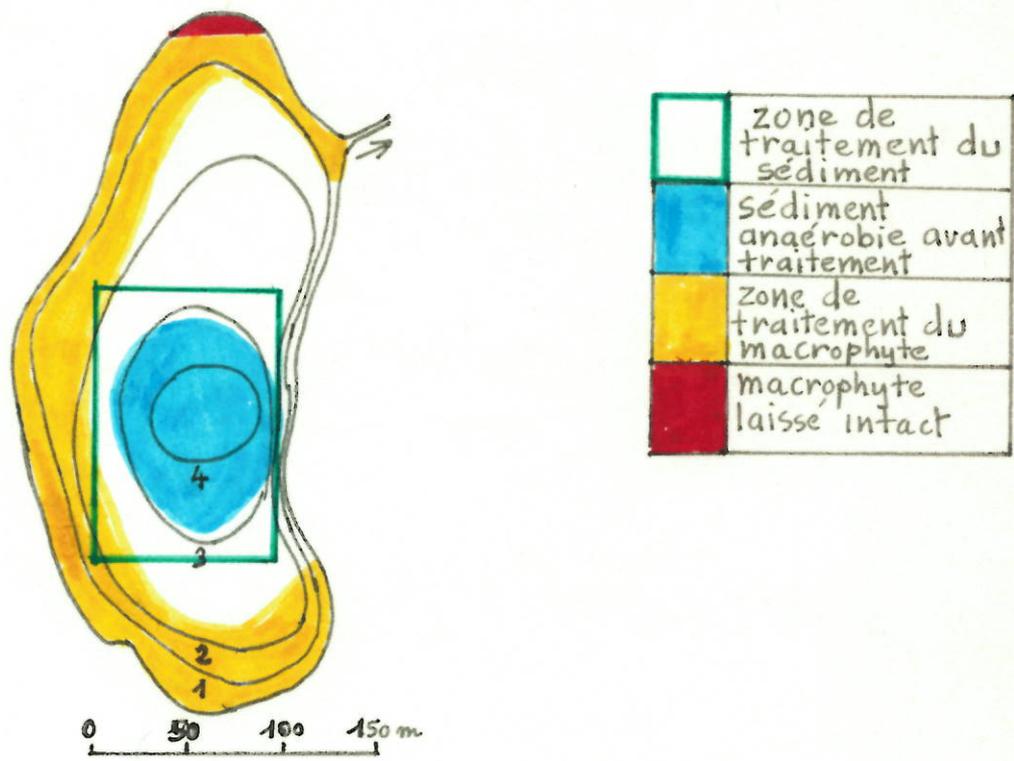
LAC TREHÖRNINGEN - AVANT LA RESTAURATION
PAR FAUCARDAGE DES HERBES AQUATIQUES
ET POMPAGE DE LA VASE





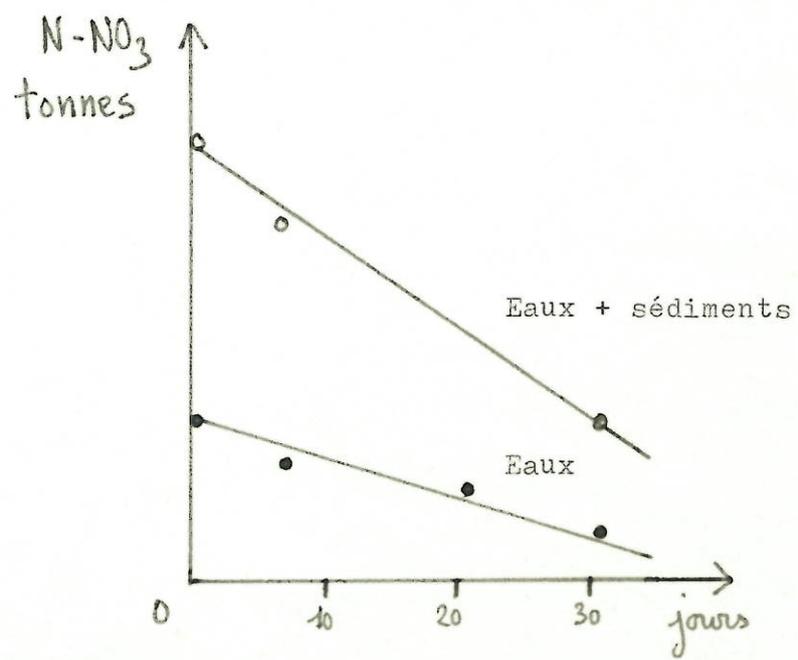
LE LAC TREHØNINGEN
APRES LA RESTAURATION

FIGURE 75



LA RESTAURATION DU LAC LILLESJÖN

FIGURE 76



DENITRIFICATION DANS LE LAC LILLESJÖN APRES TRAITEMENT PAR LE NITRATE DE CALCIUM

d'oxyder le fer à l'état ferreux (sulfure ferreux) en ion ferrique: un dégagement d'hydrogène sulfureux se produisit

2) comme le processus de dénitrification est très lent en milieu acide il fallut ensuite précipiter les ions ferriques en solution pour neutraliser le pH; ce qui fut fait avec 5 tonnes de chaux éteinte

3) la dégradation de la matière organique du sédiment put alors être réalisée avec l'apport de 12 tonnes de nitrate de calcium

4) une élimination d'une grande partie des macrophytes fut la dernière étape du traitement

Les effets furent les suivants:

1) une oxydation rapide de la couche supérieure du sédiment (disparition des sulfures)

2) une diminution importante des concentrations en phosphore et azote des eaux du lac (figure 78)

3) une diminution de la demande biologique en oxygène du sédiment (figure 77)

4) une dénitrification très rapide (voir figure 76 et 78)

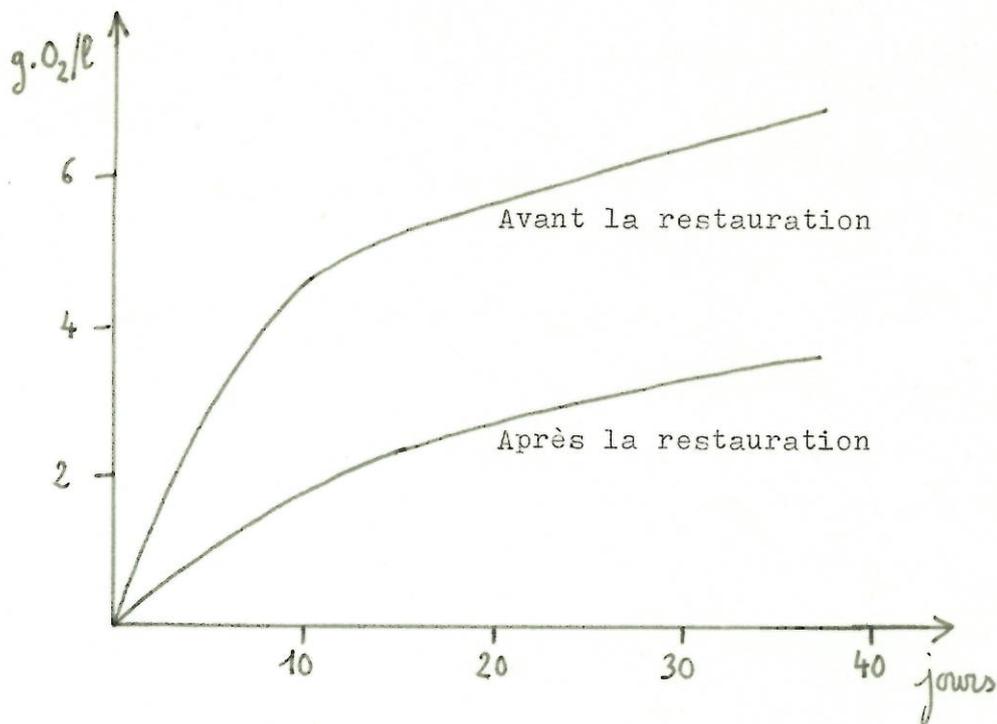
Cette méthode est conçue pour avoir des effets permanents: l'oxydation du sédiment, due à un apport convenable de nitrate au moment propice, combinée à un contrôle mécanique des plantes aquatiques, doit permettre de rétablir l'équilibre en oxygène d'un lac.

La méthode demande certainement à être à nouveau testée; peut-être pourra-t-elle concurrencer la méthode de pompage du sédiment car elle semble être moins coûteuse (voir F, tableau 20).

F) COUTS DE RESTAURATION DES LACS EN SUEDE

Les coûts figurant au tableau 20 ne sont donnés qu'à titre indicatif. En effet, ceux-ci varient certainement fortement en fonction des conditions géographiques, climatiques, de la morphologie du lac, etc. Il s'agit, d'autre part, souvent de la première expérimentation d'une méthode nouvelle.

Par ailleurs, il faut tenir compte du fait que les coûts des investigations scientifiques effectuées avant et après la restauration sont compris. On peut penser que, lorsque ces méthodes auront été



COURBES DE DBO AVANT ET APRES LA RESTAURATION
DU LAC LILLESJÖN

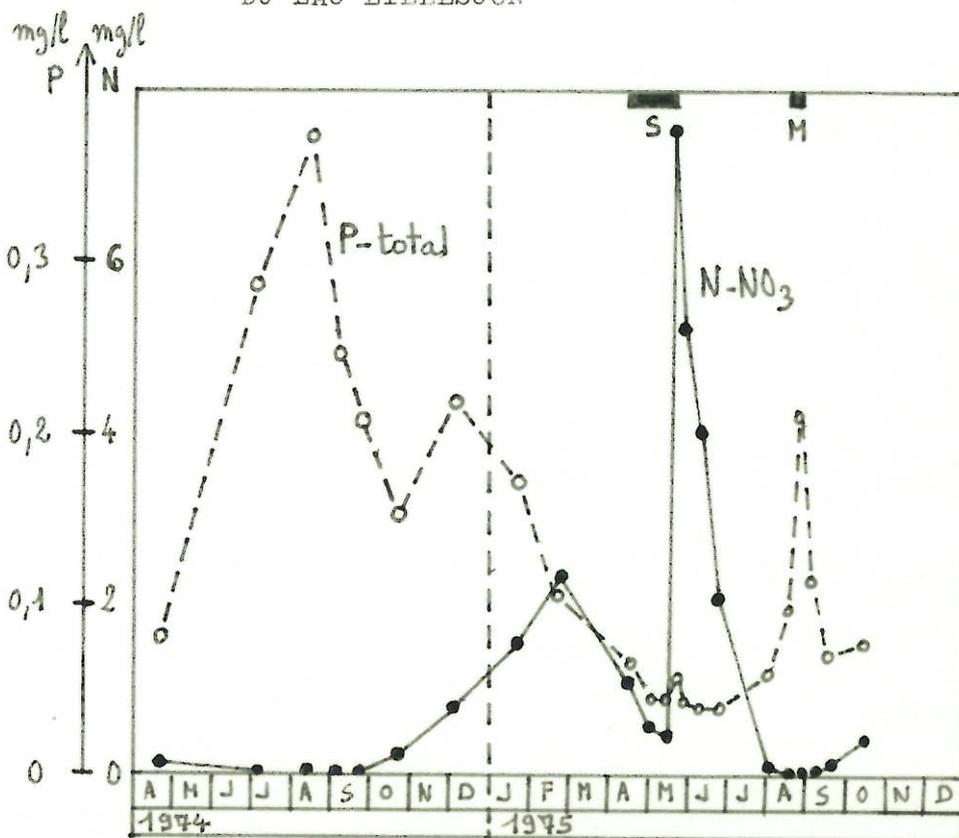


FIGURE 78

S = traitement du sédiment
M = traitement du macrophyte

INFLUENCE DE LA RESTAURATION DU LAC LILLESJÖN
SUR LA TENEUR DE PHOSPHORE TOTAL ET DE NITRATE DES EAUX DU LAC

essayées de nombreuses fois, les crédits d'investigations pourront être diminués (il est toutefois douteux qu'on puisse jamais se passer d'une étude limnologique préalable vraiment sérieuse car chaque lac est certainement un cas particulier).

COUTS DE RESTAURATION DES LACS EN SUEDE

Lac	Aire (km ²)	Profondeur moyenne (m)	Principe de la restauration	Coûts (couronnes)
Lötsjön	0,06	1,5	précipitation du phosphore	70 000
Langsjön	0,28	2,3	précipitation du phosphore	160 000
Växjösjön	0,87	3,5	déstratification	90 000
Brunnsviken	1,00	~ 8	aération de l'hypolimnion	200 000 (+50 000/année)
Ösbysjön	0,05	1,3	contrôle biologique (carpes)	100 000
Trummen	0,60	1,1	faucardage + dragage	2 500 000
Steningeviken	0,06	-	faucardage + dragage	100 000
Kocktorpssjön	0,04	-	faucardage + dragage	550 000
Trehörningen	0,80	1,5	faucardage + dragage	5 535 000
Lillesjön	0,04	2,0	oxydation du sédiment	250 000

III <u>Données biologiques avant la restauration</u> (surface)			
Lac	Production de phytoplancton (g C/m ² et j.)	Production max. phytoplancton. (g C/m ² . j.)	Biomasse de phytoplancton (mg/l) (frais)
Järla	1,05	0,55	26
Langsjön			
Lillesjön			
Lötsjön			
Ösbysjön			
Trehörningen			
Trummen	3,62		40
Växjösjön	3,40	6,40	42

DONNEES SUR LES LACS CITES DANS LE CHAPITRE III

<u>I Données générales</u>						
Lac	Aire (km ²)	Volume (10 ⁶ . m ³)	Profondeur moyenne (m)	Profondeur maximale (m)	Temps de rétention (mois)	<u>Aire bassin</u> Aire lac
Järla	0,84	7,80	9,3	24,0	24	25
Langsjön	0,28	0,65	2,3	3,0		
Lillesjön	0,04	0,08	2,0	4,2	3	25
Lötsjön	0,06	0,09	1,5	3,0		18
Ösbysjön	0,05	0,06	1,3	2,0		
Trehörningen	0,80	1,20	1,5	3,0		
Trummen	0,60	0,66	1,1	2,5		
Växjösjön	0,87	3,10	3,5	6,5	8	22
<u>II Données physico-chimiques avant la restauration (surface)</u>						
Lac	Transparence (m)	P-total (mg/l)	N-total (mg/l)	Conductivité spécifique		
Järla	2,2	0,30	1,1	298		
Langsjön	0,9	0,15	2,0			
Lillesjön		0,20				
Lötsjön	0,6	0,10		520		
Ösbysjön		0,04				
Trehörningen						
Trummen		0,5 7	5			
Växjösjön	1,9	0,22	2,5	190		

LISTE BIBLIOGRAPHIQUE

- 21) Björk, Sven; 1974: The degradation and restoration of lake Hornborga. Report of the Institute of Limnology, University of Lund, Sweden
- 22) Ahling, Bengt and Jernelöv, Arne; 1971: Weed control with grass carp in lake Üsbysjön. Report B 94a from the Swedish Water and Air Pollution Research Laboratory, Stockholm
- 23) Landner, Lars; 1970: Lake restoration. Report B 83 from the Swedish Water and Air Pollution Research Laboratory, Stockholm
- 24) Björk, Sven; 1973: Restoring lakes in Sweden. Technology Review Volume 76, N° 2, December 1973, Alumni Association of the Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts
- 25) Ripl, W; 1976: Biochemical oxidation of polluted lake sediment with nitrate - a new lake restoration method. Ambio, Vol. 5, N° 3

ADRESSES DES LEADERS DES PROJETS

6) La restauration des lacs

- Contrôle mécanique, oxygénation des eaux du fond, dragage du sédiment: Sven Björk, Institute of Limnology, University of Lund, Fack, S-220 03 LUND, SWEDEN

- Contrôle biologique: Bengt Ahling, Swedish Water and Air Pollution Research Laboratory, Hälsingegatan 43, BOX 21060, S-100 31 STOCKHOLM

- Précipitation du phosphore dans le lac lui-même: Lars Landner, Swedish Water and Air Pollution Research Laboratory, Drottning Kristinas Vägen 47D, S-114 28 STOCKHOLM

- Oxydation du sédiment par le nitrate de calcium: W. Ripl, Institute of Limnology, University of Lund, S-220 03 LUND, SWEDEN