

WORLD HEALTH ORGANIZATION
REGIONAL OFFICE FOR EUROPE

WELTGESUNDHEITSORGANISATION
REGIONALBÜRO FÜR EUROPA



ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTE
BUREAU REGIONAL DE L'EUROPE

ВСЕМИРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ
ЕВРОПЕЙСКОЕ РЕГИОНАЛЬНОЕ БЮРО

INDEXED

Groupe de travail sur la lutte contre l'eutrophisation
des lacs-réservoirs en climat chaud

Copenhague, du 2 au 4 juin 1982

MOR/RCE 001(1)/6
18 mai 1982

FRANCAIS SEULEMENT
NON EDITE

*FCSA water pollution - p. c
water pollution*

SOLUTION POUR L'AMELIORATION DE LA QUALITE DE L'EAU DE LA RETENUE
SIDI MOHAMED BEN ABDELLAH SUR LE BOU REGREG

RESUME DU RAPPORT FINAL

par

Docteurs L. Landner et U. Wahlgren, Madame A.-L. Martin et
Messieurs H. Mideus et Å. Liljeblad
Institut de Recherche sur la Pollution de l'Eau et de l'Air (IVL)
Stockholm, Suède

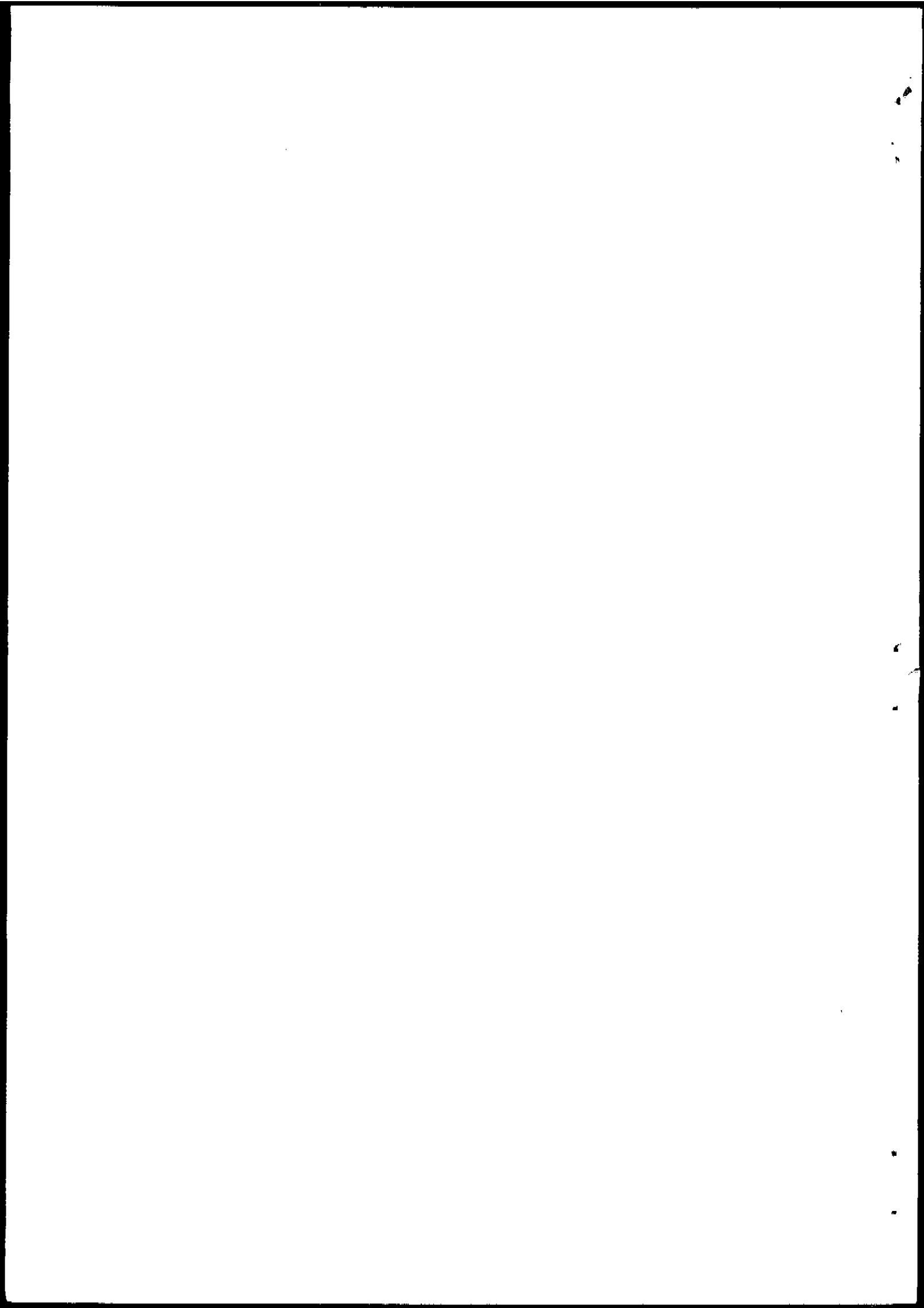


The issue of this document does not constitute formal publication. It should not be reviewed, abstracted or quoted without the agreement of the World Health Organization Regional Office for Europe. Authors alone are responsible for views expressed in signed articles.

Dieses Dokument erscheint nicht als formelle Veröffentlichung. Es darf nur mit Genehmigung des Regionalbüros für Europa der Weltgesundheitsorganisation besprochen, in Kurzfassung gebracht oder zitiert werden. Beiträge, die mit Namensunterschrift erscheinen, geben ausschliesslich die Meinung des Autors wieder.

Ce document ne constitue par une publication. Il ne doit faire l'objet d'aucun compte rendu ou résumé ni d'aucune citation sans l'autorisation du Bureau régional de l'Europe de l'Organisation Mondiale de la Santé. Les opinions exprimées dans les articles signés n'engagent que leurs auteurs.

Настоящий документ не является официальной публикацией. Не разрешается рецензировать, аннотировать или цитировать этот документ без согласия Европейского регионального бюро Всемирной организации здравоохранения. Всю ответственность за взгляды, выраженные в подписанных авторами статьях, несут сами авторы.



INSTITUTET FÖR VATTEN- OCH LUFTVÅRDSFORSKNING

HÄLSINGEGATAN 43
STEN STUREGATAN 42

BOX 21060
BOX 5207

S-100 31 STOCKHOLM
S-402 24 GÖTHEBURG

SWEDEN
SWEDEN

TEL. 08-24 86 80
TEL. 031-81 02 80

Protection de la qualité des
eaux des lacs-réservoirs

MOR/RCE 001
PNUD/MOR/79/005

SOLUTIONS POUR L'AMÉLIORATION DE LA QUALITÉ DE L'EAU DE LA
RETENUE SIDI MONAMED BEN ABDELLAH SUR LE BOU REGREG

RÉSUMÉ DU RAPPORT FINAL

le 10 mai 1982

par

L. Landner, U. Wahlgren, A.-L. Martin, H. Mideus, et Å. Liljeblad
Consultants de l'O.M.S.

Institut de Recherche sur la Pollution de l'Eau et de l'Air (IVL),
Stockholm, Suède.

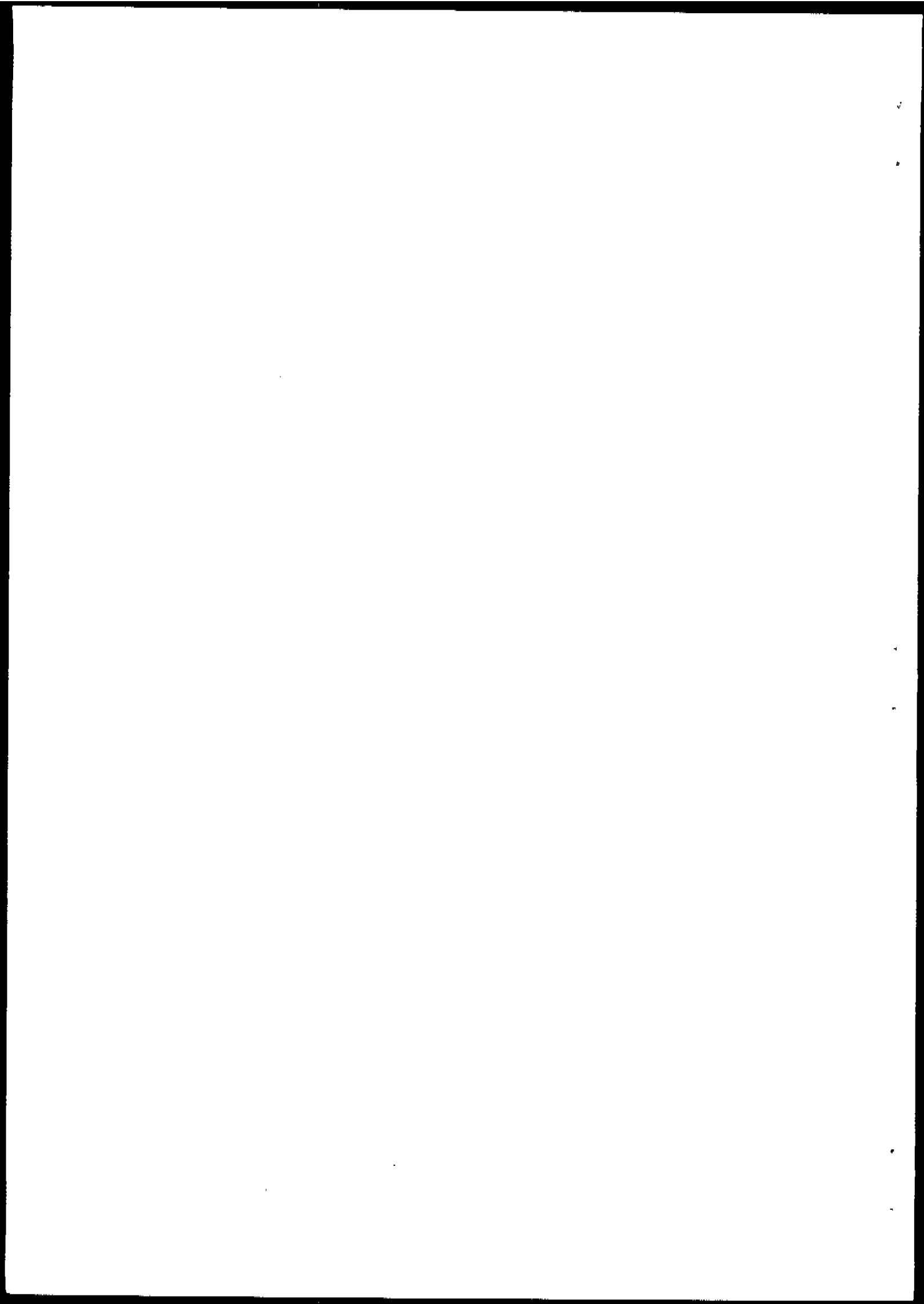
Nous aimerions exprimer notre vive gratitude à tout le cadre du personnel marocain, qui a participé à l'exécution de ce projet, notamment à Dr. H. Abouzaid, responsable national de l'exécution du projet et chef du Laboratoire de l'ONEP. Nous voudrions aussi remercier MM. Falkowski, Bourchich, Bouloud, Agbani et Ben Chafaï, nos collaborateurs dévoués et efficaces dans le projet.

TABLE DES MATIERES

		<u>Page</u>
1.	Introduction	1
2.	Définition du problème	2
3.	Données morphologiques et hydrologiques	3
4.	Résumé des résultats des études limnologiques	4
4.1.	Méthodes de travail	4
4.2.	Facteurs abiotiques	5
4.3.	Production primaire et biomasses	6
4.4.	Consommation d'oxygène et de nitrates	7
4.5.	Pêches d'essai qualitatives	8
5.	Les modèles mathématiques	8
6.	Solutions sélectionnées pour combattre l'eutrophisation	10
6.1.	Introduction	10
6.2.	Liste de solutions préliminairement sélect.	10
6.3.	Commentaires	12
6.4.	Solutions biologiques	13
6.4.1.	Introduction	13
6.4.2.	Implantation de poissons algivores	14
6.4.3.	Coûts de l'introduction des poissons algivores	18
6.5.	Circulation artificielle	20
6.5.1.	Quelques données de base	20
6.5.2.	Solution technique	25
6.5.3.	Conclusions	26
6.6.	Mesures au niveau du traitement de l'eau potab.	27
6.6.1.	Introduction	27
6.6.2.	Aération	27
6.7.	Traitement des eaux usées de la ville de Romani	34
6.8.	Introduction de nitrate	35
7.	Recommandations	36

Figures 1 - 14

Annexes I -



1. INTRODUCTION

La retenue du barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah, située à une vingtaine de kilomètres de Rabat, a été mise en eau en 1974. Cet ouvrage important a été spécialement construit pour assurer l'approvisionnement en eau potable à la zone côtière du Maroc entre les villes de Rabat et de Casablanca. La population desservie est de l'ordre de 4 millions d'habitants.

La capacité installée de production d'eau potable à partir de la retenue est actuellement de $4 \text{ m}^3/\text{s}$, elle sera portée à $9 \text{ m}^3/\text{s}$ au début de 1983 et à $13 \text{ m}^3/\text{s}$ avant l'an 2000. L'eau destinée à la production d'eau potable peut être captée à des niveaux variables par les 4 pertuis de la tour de prise.

Les études de la qualité de l'eau de la retenue menées par l'Office National de l'Eau Potable (ONEP) révélèrent dès octobre 1975 un déficit en oxygène et, depuis, toutes les études ont confirmé l'existence d'une stratification thermique intense pendant la saison chaude accompagnée de la désoxygénation de l'hypolimnion durant plusieurs mois. Pendant la saison sèche, la présence d'hydrogène sulfuré dans l'hypolimnion a également été notée au cours des années 1976, 1977, 1978, 1980 et 1981.

Cette dégradation de la qualité de l'eau a engendré de sérieuses difficultés d'exploitation à la station de traitement du Bou Regreg. Pendant la période où l'eau de l'hypolimnion est rendue inutilisable du fait de la présence de l'hydrogène sulfuré, le captage d'eau effectué alors dans les couches superficielles riches en algues, conduit en effet à:

- une consommation importante de chlore
- un surdosage de sulfate d'aluminium
- l'utilisation du charbon actif en poudre pour lutter contre les goûts et odeurs de l'eau.

Il en résulte une augmentation sensible du coût de l'eau produite sans que la qualité organoleptique de celle-ci soit toujours entièrement satisfaisante.

Depuis 1978, l'ONEP a entrepris, avec l'aide de l'Organisation Mondiale de la Santé et une participation au financement de la

part du Programme des Nations Unies pour le Développement, une étude intensive des facteurs déterminant la qualité de l'eau de la retenue.

2. DEFINITION DU PROBLEME

Entre avril - mai et décembre, la retenue est thermiquement stratifiée avec un écart maximal de température entre la surface et le fond égal à 15° C. L'eau de l'épilimnion étant chaude et riche en éléments nutritifs, constitue en début d'été un milieu très favorable au développement du phytoplancton. Ce phénomène d'eutrophisation résulte en une sédimentation excessive de détritus, qui amène la désoxygénation de l'hypolimnion où s'établissent des conditions d'anaérobiose, notamment caractérisées par la présence de l'hydrogène sulfuré.

Ce problème apparent demande un traitement poussé de l'eau brute pour éliminer l'hydrogène sulfuré. Indépendamment de la mauvaise odeur de l'eau, celle-ci peut aussi acquérir une potabilité réduite à cause d'une teneur accrue en certains ions, surtout le fer, le manganèse, le nitrite et l'ammonium comme conséquence du déficit en oxygène.

Une eutrophisation poussée peut entraîner un nombre d'autres conséquences négatives pour l'utilisation de l'eau comme eau potable, en dehors des conséquences indirectes dues au déficit en oxygène dans l'hypolimnion. Ces conséquences, plus directes, de la production excessive d'algues sont typiquement liées à la zone productrice, c'est-à-dire à l'épilimnion:

- augmentation du pH de l'eau
- concentration élevée de matières organiques en suspension
- présence de goûts et odeurs dus aux algues ou aux bactéries
- apparition d'algues filamenteuses qui ont tendance à colmater les filtres
- formation de produits toxiques par certaines algues
- augmentation du nombre de bactéries
- apparition de parasites
- existence d'une forte sursaturation en oxygène qui peut provoquer la mort massive des poissons.

3. DONNEES MORPHOLOGIQUES ET HYDROLOGIQUES

A la cote normale (50 m NGM), le volume de la retenue est d'environ 500 millions de m^3 , sa superficie de $30 km^2$ et sa profondeur moyenne de 17 m (profondeur maximale de 35 m). La retenue est alimentée par trois rivières: Bou Regreg, Grou et Korifla-Mechraa, dont le débit moyen annuel est estimé à 17 - 20 m^3/s . Les apports totaux montrent une variation considérable entre années; ils ont été estimés aux valeurs suivantes pour les années 1974 - 1981:

Année	Volume, $M m^3$	Débit moyen annuel, m^3/s
1974 - 75	131	4,2
1975 - 76	239	7,6
1976 - 77	1258	39,9
1977 - 78	606	19,2
1978 - 79	1599	50,7
1979 - 80	425	13,5
1980 - 81	157	5,0

Les apports liquides sont concentrés pendant les périodes de crues qui s'étendent sur quelques semaines au cours de l'hiver; une seule crue a ainsi amené 90 % des apports durant l'année 1979. La contribution relative de chacune des trois rivières était pour le Bou Regreg 55 %, pour le Grou 39 % et pour Korifla - Mechraa 6 %. Les deux derniers affluents sont secs à l'étiage (juin - septembre).

Au cours de l'hiver 1978 - 79, qui était très pluvieux, les charges totales des matières en suspension étaient d'environ 5 millions tonnes, de phosphore total de 5 300 tonnes et d'azote sous forme de nitrate de 5 000 tonnes. On a pu également constater que environ 99 % des matières en suspension et du phosphore total ont été apportés au cours de crues, tandis que 80 % seulement des apports de nitrates ont été amenés par les crues.

La corrélation des apports liquides et des apports solides a montré qu'une relation log-log du type linéaire entre le débit et la concentration des solides dans l'eau de l'oued Bou Regreg est valable seulement pour les matières en suspension et le phosphore et uniquement pour des valeurs de débit entre 10 et $100 m^3/s$ (voir figure 2).

Dans le bassin versant de la retenue, dont la superficie est d'environ $9400 km^2$, les sources ponctuelles de pollution sont

peu significatives mais le sol presque nu est riche en matières nutritives et très sensible à l'érosion. L'analyse d'échantillons de terre a, par ailleurs, montré une remarquable uniformité des concentrations de nitrate et de phosphate à travers le bassin versant de la retenue.

4. RESUME DES RESULTATS DES ETUDES LIMNOLOGIQUES

4.1. Méthodes de travail

Depuis 1978, l'ONEP a entrepris une étude intensive pour mieux connaître le phénomène d'eutrophisation de la retenue Sidi Mohamed Ben Abdellah afin de mieux le combattre. Un des buts de ces études a été la préparation d'un modèle mathématique permettant de simuler l'efficacité de différentes mesures envisageables pour lutter contre l'eutrophisation.

Après la mise au point des méthodes d'analyse au laboratoire de l'ONEP et des méthodes de prélèvement et de mesure sur place, un programme global des études limnologiques a été lancé. Ce programme comprenait notamment les points suivants:

- La détermination des apports liquides et solides à la retenue;
- L'identification des régions, dans le bassin versant, d'où les pertes d'éléments nutritifs sont les plus importantes;
- L'étude de la stratification de la température, du pH, de l'oxygène dissous, des nitrates, des phosphates et de l'hydrogène sulfuré avec une périodicité allant d'une semaine à un mois;
- L'étude de la productivité du lac mesurée par deux méthodes: carbone 14 assimilé et oxygène produit, les deux in situ;
- La mesure de la biomasse et l'identification des phytoplanctons: la mesure des concentrations de chlorophylle-a et de phaeopigments, et la mesure de la biomasse des zooplanctons;
- L'étude de la vitesse de sédimentation des détritiques et l'étude des sédiments accumulés;
- L'étude de l'homogénéité horizontale et verticale de l'eau de la retenue pendant les périodes de brassage et de stratification thermique;
- L'étude de la chaîne alimentaire: pêches d'essai dans les rivières et dans la retenue;
- Les études diverses (faune benthique, assimilation de l'azote atmosphérique, bactériologie, dosage des trihalométhanes etc.).

Les méthodes d'analyse introduites ou mises au point au laboratoire de l'ONEP sont parues sous forme de modes opératoires (Série C des Rapports Techniques). Il en existe à présent 12 fascicules.

Les résultats des études limnologiques sont rapportés en détail dans les Rapports Techniques, Série A: "Etudes sur l'eutrophisation dans le lac-réservoir sur le Bou Regreg" (actuellement 16 tomes) aussi bien que dans le rapport intérimaire du 1 juin 1980. Ici nous nous contentons de faire un résumé très bref des résultats les plus significatifs pour la discussion, plus bas, sur les solutions proposées pour combattre l'eutrophisation ou ses conséquences.

4.2. Facteurs abiotiques

L'évolution par le temps (pendant la période janvier 1976 - juin 1981) de la température, du pH et de l'oxygène dissous à la surface et au fond de la retenue est montrée dans la figure 3. La valeur maximale du pH, 9,8 a été mesurée à la surface au moment d'une floraison d'algues. L'oxygène dissous dans l'épilimnion varie d'habitude entre 14 mg/l et 4 mg/l, mais des valeurs extrêmes ont été rencontrées: 16,8 mg/l le 19 mars 1982, au moment d'une forte floraison de Péridinium sp. et moins de 0,5 mg/l au cours du brassage en décembre 1980 (voir figure 4).

On voit bien de la figure 3 que la disparition de l'oxygène dissous dans l'hypolimnion pendant la période stratifiée se fait rapidement. Il y a tout de même une différence importante entre l'année 1979 et les autres années étudiées: pratiquement toutes les années on a vécu des conditions d'anaérobiose et formation de l'hydrogène sulfuré au moins vers la fin de l'été, tandis qu'en 1979, il y restait toujours des traces d'oxygène et on n'a jamais détecté de l'hydrogène sulfuré.

Ceci nous amène à étudier le cycle annuel des nitrates (figure 5). L'azote sous forme de nitrate montre une augmentation nette en concentration au moment des crues et puis une diminution successive pendant l'été et l'automne aussi bien dans l'épilimnion que dans l'hypolimnion. A l'automne 1979, on a toujours trouvé des faibles concentrations de nitrate dans l'hypolimnion, mais, par contre, les réserves en nitrate étaient entièrement épuisées pendant les périodes anaérobies en 1978, 1980 et 1981. Les détails

dans cette disparition des nitrates dans l'eau de la retenue sont montrés en fonction du temps à la figure 6.

Les matières en suspension ont montré une augmentation rapide au moment de la grande crue en février 1979, suivi d'une chute très rapide, due à la sédimentation efficace des particules. Une évolution semblable est évidente pour les orthophosphates (voir figure 7), ce qui indique que les particules d'argile apportées avec la crue ont adsorbé les phosphates presque quantitativement et ont provoqué une sédimentation rapide des phosphates initialement en solution. Pendant la période anaérobie entre septembre et décembre 1978, on observe en outre une augmentation de la concentration de phosphate dans l'eau du fond, ce qui indique une certaine mobilisation de ce nutriment des sédiments. Au cours de la saison productrice, la teneur en phosphate dans l'eau de l'épilimnion est relativement faible (en général $< 20 \mu\text{g/l PO}_4\text{-P}$).

Malgré la charge extrêmement élevée de phosphore total - en 1979 $150 - 200 \text{ g/m}^2$, la retenue ne montre pas des caractéristiques d'un lac hypertrophe, ceci vraisemblablement à cause du fait que ce phosphore ne se présente pas sous une forme accessible aux algues, ou bien qu'une partie est rapidement transformée en une forme qui est retirée de la zone productrice. Pourtant, il y a suffisamment de phosphates solubles dans l'épilimnion pour entretenir une production primaire importante, assez pour placer la retenue dans la catégorie "lac eutrophe".

Plusieurs campagnes de prélèvement sur 14 - 15 verticaux dans la retenue ont été effectuées pour étudier l'homogénéité de l'eau. La première campagne a été réalisée à la fin septembre 1979, juste après la première petite crue de l'automne. D'après les graphiques montrant les résultats (figures 8 - 9), on voit nettement la stratification thermique de toute la masse d'eau et le déficit en oxygène dans l'hypolimnion. C'est aussi évident que l'eau venant de l'extérieur était introduite juste au-dessus de la thermocline. La matière en suspension (turbidité) subit une sédimentation successive, ce qui se traduit par des valeurs plus élevées dans les couches profondes pour la turbidité (et aussi pour le phosphore total).

4.3. Production primaire et biomasses

La production primaire dans la retenue a été suivie au moyen de deux méthodes différentes, incorporation de ^{14}C et production d'oxy-

gène. Bien qu'il y ait une certaine production même pendant l'hiver, cette production commence d'habitude à devenir importante au mois de mars. Pendant la période stratifiée, entre mi-avril et fin septembre, la production primaire moyenne pour les années 1979 - 1981 a été de 1,4 - 2,0 g C/m²,j. Ceci donne une production primaire annuelle de 300 - 400 g C/m², environ.

La biomasse algale instantanée atteint ses valeurs maximales vers la mi-juin; au cours des années 1980 et 1981 ces maxima étaient de 25 - 30 g de cellules par m³ dans l'épilimnion. Cette biomasse était composée à plus de 70 % du genre Peridinium, qui semble être le genre entièrement dominant au printemps et au début de l'été. Parfois on trouve une augmentation de la population des Cyanophycées vers la fin de l'année, mais on n'a jamais^{en} enregistré une dominance de ce groupe d'algues. Le genre algal numéro deux en importance dans la biomasse est le Chlorophycée Cosmarium.

Les mesures de chlorophylle-a + phaeophytine ont indiqué que ces pigments atteignent des concentrations en moyenne entre 5 et 20 mg/m³ dans l'épilimnion pendant la saison productrice.

Seulement peu d'études sur les zooplanctons ont été effectuées. De toute façon, on peut constater que les espèces suivantes sont importantes dans la retenue: Diaphanosoma brachyurum, Asplanchna sp. et Cyclops spp.

4.4. Consommation d'oxygène et de nitrates dans l'hypolimnion

L'épuisement total de l'oxygène dissous dans l'hypolimnion de la retenue est empêché par la présence de nitrates, qui servent de tampon ou de matières oxydatrices supplémentaires, ainsi retardant l'utilisation des sulfates dans les processus de décomposition. Au cours de l'été 1979, la consommation de l'oxygène dissous dans l'hypolimnion a été rapide, de façon que vers le 15 juillet on ne trouvait que des teneurs très faibles (< 0,5 mg/l), mais jamais zéro. Au même moment, il y avait toujours 1,5 mg/l d'azote sous forme de nitrate dans l'hypolimnion, et encore au mois de décembre, on pouvait trouver des traces de nitrates dans l'eau. Par conséquent, la formation d'hydrogène sulfuré n'a jamais été observée en 1979.

Faute de crues au début des années 1980 et 1981, la situation était entièrement différente pendant ces années, ce qui est évident au tableau suivant, qui montre la situation au mois de mars des trois années:

Année	Apports liquides pendant sept. - mars	Quantité	
		d'oxygène dissous	de nitrates
1979	1 540 M m ³	1 300 tonnes	1 400 t
1980	380 M m ³	650 "	800 t
1981	130 M m ³	350 "	400 t

Les conséquences de cette évolution ont été très nettes. Les réserves de matières oxydantes ont été épuisées de plus en plus tôt, ce qui a engendré une production d'hydrogène sulfuré. Ainsi, en 1980, les premières traces de sulfures ont été révélées au mois d'août et en 1981, les sulfures étaient déjà apparents au mois de mai, juste après la disparition totale des nitrates.

La consommation journalière d'oxygène dans l'hypolimnion a été estimée à 1 - 2 g/m², une vitesse qui place la retenue actuelle dans la catégorie des lacs eutrophes.

4.5. Pêches d'essai qualitatives

Neuf espèces ont été obtenues au cours des pêches d'essai effectuées dans la retenue: Barbus fritschii (labeobarbeau), Barbus callensis (barbeau), Cyprinus carpio (carpe commune), Eupomotis gibbosus (perche soleil), Alosa finta, Atherina mouchon, Mugil cephalus (mulet), Anquilla anquilla (anguille) et Micropterus salmoides (black bass à grande bouche). L'espèce entièrement dominante est le labeobarbeau, qui représente plus de 85 % des spécimens captés. Parmi les mulets on a trouvé les individus les plus lourds obtenus; jusqu'à 7 kg le specimen. Des analyses du contenu stomacal ont montré que cette espèce se nourrit principalement de phytoplancton.

5. LES MODELES MATHEMATIQUES

L'eutrophisation est un phénomène complexe faisant intervenir des facteurs d'ordre physique, chimique et biologique. Une analyse cohérente d'un système aussi complexe est fortement facilitée par des modèles mathématiques faisant appel à des techniques de simulation qui permettent en particulier des investigations impossibles à mener sur le terrain et réduisent notablement la redondance des informations requises.

Deux types de modèles décrivant le phénomène d'eutrophisation peuvent en principe être envisagés:

- (1) Les modèles empiriques qui décrivent le comportement macroscopique du système en utilisant des équations phénoménologiques (régression simple et multiple et régression polynomiale).
- (2) Les modèles analytiques qui décrivent le comportement microscopique du système au moyen d'équations déterministes et de constantes estimées ou mesurées.

Les modèles empiriques (type Vollenweider) décrivant seulement l'état stationnaire, l'influence d'une variation de charges de phosphore ou d'azote peut être prévue quant à son étendue, mais le temps de réponse du lac ne peut être connu.

Par conséquent, le travail de la modélisation mathématique de la retenue Sidi Mohamed Ben Abdellah a porté sur un ensemble de modèles analytiques, comprenant les parties suivantes:

- modèle de l'hydraulique, unidimensionnel
- modèle de l'hydraulique, bi-dimensionnel
- modèle de la qualité de l'eau.

Le modèle de l'hydraulique, uni-dimensionnel, développé à l'Institut de Recherche sur la Pollution de l'Eau et de l'Air (IVL) en Suède, est un modèle du bilan thermique avec la possibilité d'incorporation de l'advection (verticalement au moyen de l'équation de continuité, horizontalement au moyen des formules empiriques). La retenue est divisée en segments verticaux d'une profondeur d'un mètre chacun et les calculs sont faits pas-à-pas. Le programme de ce modèle est introduit sur l'ordinateur IBM 3/12 de l'ONEP.

Le modèle bi-dimensionnel, développé par Dr. W. Wilmot, sert à décrire la progression temporelle le long de la retenue des courants naturels ou induits, p.e. par l'ouverture de la vanne du fond du barrage. Ce modèle n'a pas été introduit sur l'ordinateur de l'ONEP, puisqu'il demande un ordinateur très puissant avec une capacité de mémoire importante.

Finalement, le modèle de la qualité de l'eau est basé sur un modèle analytique d'un lac, développé et employé à l'Institut de Recherche sur la Qualité de l'Eau (VKI) au Danemark. Ce modèle a été adapté au cas de la retenue actuelle par VKI et IVL en coopération et un nouveau programme du modèle a été écrit par IVL pour permettre son introduction sur l'ordinateur de l'ONEP. A l'état actuel, le modèle comprend les variables suivantes:

- carbone, azote et phosphore du phytoplancton, des détritiques et des sédiments
- zooplancton

- poissons
- ammonium, nitrate et phosphate solubles
- oxygène dissous.

Comme la retenue est divisée en cinq segments verticaux d'une profondeur variable (6 m - 3 m - 4 m - 5 m - et le reste de l'hypolimnion jusqu'au fond) on obtient avec les 15 variables d'état un total de 75 variables dans le modèle. L'évolution temporelle du système des variables est soumise à des processus biologiques les reliant, formalisés en langage mathématique.

L'ensemble de modèles développés (décrits en détail dans les Rapports Techniques, Série D, "Modèles mathématiques pour le lac-réservoir sur le Bou Regreg") sert d'une part à la prévision à court terme de la qualité de l'eau dans la retenue et d'autre part à tester des solutions envisagées pour combattre les causes et les effets de l'eutrophisation de la retenue Sidi Mohamed Ben Abdellah. Ces solutions et les résultats des simulations sont présentés plus bas.

6. SOLUTIONS SELECTIONNEES POUR COMBATTRE L'EUTROPHISATION

6.1. Introduction

A partir d'une liste d'un grand nombre de mesures à priori utilisables pour combattre l'eutrophisation ou ses conséquences, une sélection préliminaire a été faite, voir ci-dessous. Les solutions qui y figurent ont, dans la plupart des cas, été soumises à une évaluation approfondie concernant leur efficacité (simulation au moyen de modèles mathématiques) et leur faisabilité technique et économique. Cette évaluation a, à son tour, abouti à l'identification de la combinaison optimale de solutions recommandées par ce projet.

6.2. Liste de solutions préliminairement sélectionnées

1. Réduction des apports d'éléments nutritifs.
 - 1.1. Reboisement du bassin versant.
 - 1.2. Contrôle de l'utilisation du sol dans les régions agricoles.
 - 1.3. Contrôle des sources ponctuelles de pollution.
 - 1.4. Construction de pré-réservoirs.

2. Gestion du barrage basée sur l'évolution de la qualité de l'eau.
 - 2.1. Opération de la vanne de fond.
 - 2.1.1. Evacuation de l'eau de l'hypolimnion riche en sels nutritifs.
 - 2.1.2. Retardement de l'établissement d'une stratification stable au printemps.
 - 2.1.3. Affaiblissement de la stratification en automne (accélération du brassage).
 - 2.2. Optimisation du niveau de la prise d'eau pour préserver les réserves de matières oxydantes.
3. Mesures biologiques.
 - 3.1. Pêches intensives des poissons consommateurs de zooplanctons.
 - 3.2. Introduction des poissons algivores.
 - 3.2.1. Transvasement des alevins de mulets.
 - 3.2.2. Implantation des carpes argentées.
4. Augmentation artificielle des réserves de matières oxydantes dans l'hypolimnion.
 - 4.1. Introduction des nitrates.
 - 4.2. Circulation artificielle pour retarder la stratification au printemps.
 - 4.3. Circulation artificielle pour affaiblir la stratification à l'automne.
5. Mesures au niveau du traitement.
 - 5.1. Optimisation de la préchloration pour oxyder l'hydrogène sulfuré.
 - 5.2. Elimination de l'hydrogène sulfuré par aération.
 - 5.2.1. Tour d'aération.
 - 5.2.2. Réservoir d'aération.

6.3. Commentaires

Les solutions mentionnées sous le § 1 ont été discutées au cours de la Table Ronde à Rabat des 16 - 17 juin 1981 par les services compétents. Les conclusions concernant ces mesures et les recommandations des participants de la Table Ronde sont résumées ci-dessous:

"Les participants recommandent que le bassin versant du Bou Regreg soit l'objet de mesures spéciales de protection, étant donné qu'il approvisionnera bientôt en eau potable le quart de la population marocaine. Ces mesures de protection peuvent inclure: le reboisement, le contrôle de l'utilisation des engrais chimiques, la limitation du cheptel, l'interdiction d'implantation d'industries polluantes, le traitement des déchets produits dans le bassin versant, la lutte contre l'érosion des sols etc."

"Les participants recommandent comme mesure immédiate de protection de la qualité des eaux dans le bassin versant du Bou Regreg, l'assainissement et le traitement des eaux usées des localités de Romani, Oulmes et Maaziz."

Il est évident que toutes ces mesures sont des solutions à très long terme et pour pouvoir être réalisées, elles demandent le concours de plusieurs services administratifs. A l'exception du traitement des eaux usées de la ville de Rommani, les mesures de cette catégorie ne seront pas discutées ultérieurement dans ce rapport.

Les solutions figurant dans le § 2 de la liste feront l'objet de discussions entre l'ONEP et la Division d'Exploitation de la Direction de l'Hydraulique qui aboutiront, nous l'espérons, à l'établissement d'un plan détaillé pour la gestion. Ce plan devra comprendre deux parties - la gestion dans une perspective annuelle (basée sur la qualité de l'eau à la fin de la période de crues) et la gestion à court terme (basée sur l'évaluation mensuelle de la qualité de l'eau).

Le troisième groupe de solutions, les mesures biologiques, sera traité en détail dans ce rapport. Aussi les solutions mentionnées dans les § 4 et 5 seront étudiées, surtout en ce qui concerne la faisabilité technique et économique.

En conclusion, cinq catégories de solutions seront discutées plus en détail:

- solutions biologiques
- circulation artificielle
- mesures au niveau du traitement de l'eau potable
- traitement des eaux usées de Rommani.
- introduction de nitrate

6.4. Solutions biologiques

6.4.1 Introduction

Les bases scientifiques des méthodes biologiques aptes à améliorer la qualité de l'eau de la retenue ont été présentées à plusieurs reprises dans d'autres rapports du projet.

Il convient seulement de rappeler ici que les méthodes biologiques visent surtout à obtenir une réduction de la biomasse algale produite dans l'épilimnion de la retenue et, par conséquent, à diminuer la quantité de détritus qui, au moyen d'une sédimentation, atteint l'hypolimnion pour y être décomposée en consommant les réserves d'oxygène et de nitrates. Autrement dit, on peut constater que l'écosystème établi dans la retenue n'a pas encore atteint un équilibre faute de temps, ce qui donne lieu à des conséquences néfastes telles que l'eutrophisation et la dégradation de la qualité de l'eau. Les mesures biologiques doivent être considérées dans l'optique qu'elles devront aider à établir un système plus équilibré dans un temps plus court que si on laisse le système évoluer par lui-même. Il en résulte que les méthodes biologiques sont difficiles à appliquer puisqu'elles présupposent une bonne connaissance du fonctionnement du système mais, d'autre part, ces méthodes, bien choisies et appliquées, sont les plus rassurantes puisqu'elles constituent une "solution écologique", c'est-à-dire adaptée à l'écosystème en question.

Le déséquilibre fondamental dans l'écosystème de la retenue paraît consister en une sous-représentation du niveau trophique des consommateurs primaires, c'est-à-dire que les organismes qui consomment les phytoplanctons forment une population trop faible ou trop variable dans le temps pour être suffisamment efficace. Les consommateurs primaires consistent, dans la retenue, surtout en deux groupes d'animaux: les zooplanctons (notamment des cladocères - des crustacés planctoniques) et une espèce de poisson alguivore, le mulot (*Mugil spp.*). Or, le nombre des zooplanctons est contrôlé par une prédation continue de la part des poissons constituant le niveau des consommateurs secondaires. Cette population de consommateurs secondaires est relativement dense dans la retenue - l'abondance des espèces comme les

labaeobarbeaux (Barbus fritschii) et les barbeaux (Barbus callensis) est très importante (voir le rapport technique A 9). Ces espèces, aussi bien que les carpes et les aloses (moins nombreuses) exercent une prédation considérable sur les zooplanctons, surtout que la faune benthique, qui est habituellement une autre nourriture de base importante de ces poissons, est presque inexistante dans la retenue.

Il existe, dans un écosystème en équilibre, un moyen de contrôler le nombre de ces consommateurs secondaires, soit des gros poissons carnivores. Or, dans la retenue sur le Bou Regreg, l'effectif de ces espèces de poissons, notamment les "Black bass", est très faible et il en résulte que la prédation sur les poissons consommateurs de zooplanctons reste inefficace.

En ce qui concerne les mullets, la seule espèce de poisson probablement algivore dans la retenue, la population actuelle de la retenue a été établie par l'immigration des alevins à partir de la mer, où cette espèce se reproduit, avant que le barrage ait été construit. Par conséquent, et comme aucun transvasement de mullets de la mer ou de l'embouchure de l'oued vers la retenue n'est connu, la population d'origine est en rapide disparition - les spécimens âgés qui subsistent constituent un objet de pêche privilégié.

Dans le rapport de la mission du 27 mai au 17 juin 1981 on a énuméré toutes les possibilités théoriques pour augmenter la consommation des phytoplanctons dans la retenue. Ici on restreint la discussion aux solutions constituant un complément du peuplement des poissons.

6.4.2 Introduction de poissons algivores

Après une évaluation effectuée antérieurement, nous avons retenu comme espèces les plus intéressantes le mullet (Muqil spp.) et la carpe argentée (Hypothal^{PA}michtys molitrix).

6.4.2.1 Muqil spp. (mulet)

Dans l'estuaire de l'oued Bou Regreg, le genre de Muqil est composé d'au moins trois espèces: M. saliens, M. cephalus et M. capito. Le mullet, qui se reproduit normalement dans la mer, d'où les

alevins remontent dans les rivières pour grandir dans l'eau douce, existe déjà dans la retenue. Vraisemblablement ces spécimens ont été renfermés au moment de la construction du barrage et forment une population en extinction puisque ces poissons doivent revenir dans la mer pour se reproduire. Les spécimens pêchés dans la retenue au cours des dernières années étaient, sans exception, de grande taille (à titre d'exemple: un spécimen capturé au mois d'avril dernier mesurait 87 cm et pesait 7-8 kg). Quelques analyses du contenu stomacal de ces gros spécimens ont révélé l'existence de phytoplanctons, notamment des péridinées, dans les estomacs. Des analyses du contenu stomacal ont été effectuées également sur un assez grand nombre de mulets plus jeunes, pêchés dans l'estuaire du Bou Regreg, ce qui a permis de vérifier la présence pratiquement constante de phytoplanctons. D'autre part, des débris de provenance animale, indiquant une diète de zooplanctons ou de faune benthique, n'ont jamais été trouvés dans les estomacs de ces poissons. Ceci indique que les mulets pourraient être un consommateur intéressant de phytoplanctons dans la retenue, surtout de grosses cellules comme Peridinium et Ceratium, qui dominant souvent la biomasse algale au printemps.

Le choix alimentaire des mulets et leur adaptation à l'eau douce de la retenue ont été examinés au cours de l'automne 1981 au laboratoire de l'ONEP (voir Rapport Technique, Série A, No 16). Il était évident qu'il y avait une certaine différence entre les espèces en ce qui concerne leur capacité d'adaptation, et pour le moment, il s'avère que Mugil saliens est l'espèce la plus simple à adapter à l'eau douce. Le choix de nourriture semble plus ou moins pareil entre les espèces. Les genres dominants parmi les phytoplanctons (Peridinium et Cosmarium) sont trouvés à peu près en mêmes proportions dans les analyses stomacales. Les essais sont réalisés en cages de filet dans la retenue pendant une période de production algale élevée. La période d'acclimatation semble possible à limiter à une semaine au plus.

Entre les alternatives de transvaser les mulets de l'estuaire et de commencer à cultiver l'espèce, la pêche et le transport des alevins sont plus économiques aujourd'hui.

Deux points présentent actuellement certains désavantages dans le transvasement des poissons de l'estuaire à la retenue. L'un concerne l'importance du stock des mulets dans la proximité de

l'embouchure de l'oued Bou Regreg et de l'oued Sébou. Il n'existe aucune évaluation précise de l'importance du stock de mulets, mais seulement une conception générale de l'existence d'une grande quantité d'alevins. Par conséquent, il est difficile de dimensionner le captage de façon à être sûr de ne pas appauvrir l'espèce. L'autre s'applique au fait que les alevins captés dans l'estuaire peuvent être porteurs de germes pathogènes, à partir de la pollution par les eaux usées urbaines qui existe dans l'estuaire.

L'importance de ce problème sera examinée en cultivant des germes prélevés sur les alevins de l'estuaire. Dans le cas échéant, il faut prévoir une désinfection des poissons avant le transvasement pour garantir que des germes pathogènes ne sont pas transportés à la retenue destinée à la production de l'eau potable.

L'équipe du laboratoire de l'ONEP, travaillant au projet a étudié et développé des techniques efficaces pour capturer de grandes quantités d'alevins de mullet dans l'estuaire de l'oued Bou Regreg. Des techniques pour le transport et l'acclimatation de ces alevins à l'eau de la retenue ont aussi été étudiées en détail. Il semble donc que cette stratégie - repeupler la retenue en mulets au moyen d'un transvasement d'alevins - soit une solution parfaitement faisable, en plus, un tel programme pourrait être lancé immédiatement. Cette stratégie ne demande pas d'investissements coûteux (voir plus bas), cependant le besoin de main d'oeuvre pendant les campagnes de pêche est important. Or, il sera vraisemblablement possible d'y engager des pêcheurs locaux.

Pourtant, même avec un effort considérable, il est difficile d'envisager que, par cette stratégie, on puisse apporter plus que 0,5 - 1 tonne de mulets par an dans la retenue. Si on présume que la longueur de vie moyenne dans la retenue serait de 4-5 ans (avant que les poissons ne soient pêchés), ceci correspond, à l'état d'équilibre, à une population de mulets dans la retenue de quelques 10-50 tonnes. Une telle population ne suffira pas (d'après les simulations au moyen du modèle mathématique) pour contrôler d'une façon significative la biomasse algale. En plus, on peut supposer que, même s'ils sont efficaces pour consommer les péridiniées, les mulets ne sont pas capables de capter et consommer les algues de petite taille. Ces algues

risquent, par conséquent, d'être favorisées - et le seul résultat d'un repeuplement par les mulets pourrait être un changement de la population algale dans le sens d'une domination des espèces de petite taille.

Pour éviter ceci et pour obtenir un contrôle efficace de la biomasse algale en entier, il faut envisager une mesure complémentaire à l'implantation des mulets. Une telle mesure pourrait être l'introduction de la carpe argentée, en plus du transvasement des mulets présenté ci-dessus.

6.4.2.2. Hypophthalmichthys molitrix (carpe argentée).

La carpe argentée n'existe pas à l'état naturel au Maroc. Elle a son origine en Chine mais elle est utilisée dans un grand nombre de pays dans le monde pour contrôler la biomasse algale, dans des lacs et des réservoirs. C'est une espèce très intéressante à cette fin puisqu'elle est capable de manger des algues plus petites (entre 10 et 50 μ m de diamètre) que n'importe quelle autre espèce de poisson.

La carpe argentée ne se reproduirait très probablement pas spontanément dans les eaux du bassin du Sou Regreg, ce qui est plutôt un avantage dans un cas où on veut être en mesure de pouvoir contrôler la population. La reproduction artificielle est, par contre, mise au point et on a acquis une grande expérience sur ce sujet dans plusieurs laboratoires de pisciculture dans le monde. Il nous paraît entièrement faisable de monter une culture de la carpe argentée, par exemple dans le laboratoire du Service de la Pêche à Azrou, et un élevage pendant la première année dans les étangs attenants. Avec le concours du personnel compétent du Service de la Pêche (qui devrait se perfectionner dans les techniques appropriées auprès d'un laboratoire européen), une telle entreprise serait parfaitement possible à monter pour repeupler la retenue en carpes argentées, après une première introduction de carpes importées. Comme la carpe est un excellent mets, la population une fois introduite devra être renforcée par de nouvelles implantations au fur et à mesure que de gros spécimens seront pêchés - au moins à partir de cinq ans après la première introduction.

L'efficacité de la carpe argentée à consommer des phytoplanctons et, par conséquent, le besoin en tonnage de poissons peut

être calculé d'après les données dans la littérature sur la consommation journalière d'algues, c'est-à-dire 10 à 40 % de leur poids. L'effet cumulatif de ce taux de consommation est, bien entendu, plus important et pour obtenir une idée plus nette des conséquences à long terme d'une introduction de poissons algivores, il faut recourir aux résultats des simulations mathématiques. Comme il est montré dans l'Annexe I, des simulations indiquent qu'une population de poissons algivores de l'ordre de grandeur de 500 tonnes pourrait diminuer la biomasse algale dans la retenue actuelle suffisamment pour influencer la qualité de l'eau.

D'après les renseignements donnés dans la littérature sur la vitesse de croissance de la carpe argentée dans des conditions semblables à celles de la retenue sur le Bou Regreg, on obtiendra au bout de 3-4 ans la biomasse de poissons vouluë (500-600 tonnes), si on effectue une implantation de 25 tonnes de carpes argentées d'un poids moyen de 100 g. Il serait possible d'obtenir cette quantité de carpes d'une station de pisciculture en Hongrie.

Le coût d'une telle implantation, le transport inclus, s'élève à environ 1,5 millions Dirhams (taxes et frais de douane exclus).

Le laboratoire de l'ONEP a déjà obtenu une centaine de carpes argentées, grâce au concours aimable de la Station de Pisciculture d'Azrou. Actuellement des expériences sont en marche pour étudier l'adaptabilité de ces poissons à l'eau de la retenue et aussi le taux de croissance dans le milieu actuel et le choix de nourriture des carpes (au moyen d'analyses stomacales). Une évaluation finale de cette solution doit donc attendre les résultats de ces essais. Si les conclusions sont positives, on pourra toujours, sans délai, décider de faire une implantation initiale. Pour aborder la question sur la création d'une station d'élevage des carpes argentées au Maroc, on aura largement le temps après une introduction initiale, comme une implantation pour renforcer la population peut attendre 4 ou 5 ans.

6.4.3. Coûts de l'introduction des poissons algivores

Avec une combinaison d'un transvasement des alevins de mullet et une implantation des carpes argentées le coût d'investissement

dans l'immédiat peut être limité à:

- station pour l'adaptation des mulets et
- quantité initiale de carpes argentées.

En ce qui concerne la station pour l'adaptation et désinfection des alevins de mullet, il a été prévu de construire un local de 50 m², près de la station de pompage existante. Ce local sera muni de six bassins pour les poissons et de l'équipement nécessaire pour l'aération et la désinfection (compresseur, ventilateur, pompe etc.).

Le coût d'investissement de cette station a été estimé à 120 000 - 150 000 Dirhams et le coût d'exploitation (pêcheurs, filets, transports, surveillance etc.) est estimé à 75 000 Dirhams par an, étant donné que le transvasement dure trois mois.

L'importation de 25 tonnes de carpes argentées de Hongrie, le transport inclus, s'élève à environ 1,5 millions Dirhams, taxes et frais de douane exclus. Le coût d'exploitation au cours des premières années est nul. Pour la période après les 5 premières années, si on décide de monter une station d'élevage de ces poissons, nous n'avons pas pu estimer les coûts.

6.5. Circulation artificielle

6.5.1 Quelques données de base

Par la création d'une circulation artificielle de la masse d'eau de la retenue, on peut empêcher ou retarder l'établissement d'une stratification thermique stable ou raccourcir la durée d'une telle stratification. Le but principal de la déstratification serait d'éliminer le risque pour la formation de l'hydrogène sulfuré dans les eaux profondes de la retenue.

6.5.1.1 Opération pendant toute l'année (mélange total)

La circulation peut être effectuée pendant toute l'année, soit de façon continue, soit à plusieurs reprises répandues au cours de l'année, ou pendant une période limitée au printemps ou à l'automne. Si on choisit la stratégie de circulation pendant toute l'année, la conséquence négative la plus apparente serait une augmentation très nette de la température de l'eau du fond.

Au moyen du modèle mathématique de l'hydraulique (modèle uni-dimensionnel), une simulation a été effectuée, en utilisant des données initiales de l'année 1979, pour étudier le développement du profil thermique au cours de l'année. La circulation artificielle dans cet exemple a démarré le premier avril, quand la stratification thermique était presque inexistante, et a continué jusqu'à la fin de l'année. Les résultats de la simulation (voir Annexe II) montrent que la masse d'eau; tout en gardant l'homothermie, est successivement chauffée de façon qu'à mi-~~mai~~ mai, la température de toute la masse dépasse 20° C et au milieu de juillet, elle dépasse 25° C pour atteindre le maximum de 27° C à la fin août.

Sans circulation artificielle, l'eau du fond serait environ 15° C et l'eau de la surface $26,5^{\circ}$ C à la même période. Le processus de refroidissement de la masse d'eau serait plus lent en effectuant une circulation artificielle que sous conditions naturelles, de façon qu'à la fin octobre l'écart est de deux degrés environ dans l'eau de la surface.

Ce surplus très important de chaleur dans l'eau du fond, provoqué par la circulation artificielle, si elle est effectuée

pendant tout l'été, crée ~~une situation~~ un certain nombre de problèmes potentiels:

- température désagréable de l'eau de boisson pendant l'été
- conditions plus favorables pour la production bactérienne
- conditions favorables pour des germes pathogènes dans toute la masse d'eau.

En plus, la circulation en soi-même crée d'autres problèmes possibles, comme:

- l'augmentation de la concentration de phosphates dans les zones trophogènes
- turbulence augmentée près de la surface du sédiment, ce qui peut provoquer un transport plus rapide de la matière organique, dissolue dans l'eau interstitielle, hors du sédiment
- vraisemblablement, on facilite aussi le transport des cellules d'algues en état de repos (p.e. Péridinium) du fond jusqu'à la surface
- le pH de l'eau du fond augmente, ce qui provoque des difficultés au niveau du traitement.

Les avantages qu'on peut obtenir par la circulation artificielle sont surtout les suivants:

- augmentation du transport de l'oxygène de la surface vers le fond, ce qui diminuerait le risque d'une formation de l'hydrogène sulfuré
- diminution du temps moyen de résidence des cellules algales dans la zone trophogène, ce qui limiterait la production totale pendant la période où la circulation est en marche.

Il est difficile d'évaluer lesquels parmi les facteurs positifs et négatifs en relation à la production primaire sont les plus importants, mais on peut noter les points suivants:

En période ~~où~~^{ou} la retenue est stratifiée, la concentration de phosphate dans l'hypolimnion est toujours plus élevée que celle dans l'épilimnion. Avec un mélange de la masse d'eau, la concentration de phosphate et d'autres éléments nutritifs, libérés au cours de la minéralisation des algues, sera augmentée dans les couches d'eau où la production primaire a lieu. La température plus élevée au fond accélère aussi la minéralisation, ce qui tend à augmenter encore (à court terme) la concentration d'éléments nutritifs dans les couches superficielles.

Cette situation plus favorable pour la production primaire est tout de même opposée par le simple fait que les cellules d'algues sont circulées hors de la zone trophogène par la circulation artificielle. Le temps de résidence de chaque cellule dans cette zone est réduit par la déstratification et ainsi on crée une situation où la lumière devient le facteur limitant pour la production primaire. D'après les résultats de simulation mathématique, où on met en jeu les deux facteurs simultanément, la circulation provoque en effet une diminution de la production primaire, mais aussitôt que la circulation est terminée, les algues profitent du surplus d'éléments nutritifs à la surface et une biomasse plus élevée que d'habitude est formée.

Une question, dont la réponse reste inconnue, est quelles modifications dans la succession algale une circulation artificielle peut provoquer. Si on obtient d'avantage des espèces aptes à former des substances donnant à l'eau des goûts ~~et~~ ou odeurs, rien n'est gagné dans cette entreprise. Aussi, c'est difficile de prévoir si la décomposition bactérienne plus rapide, due à l'augmentation de la température, aggravera ou non le problème des goûts et odeurs.

Finalement, on peut constater que l'utilisation des nitrates comme matière oxydatrice dans les eaux du fond ne sera plus possible, puisque la circulation artificielle entraîne de l'oxygène de façon que les conditions pour la dénitrification ne seront plus favorables.

Il est donc clair, que la solution au problème de l'hydrogène sulfuré qui consiste en une circulation artificielle de toute la masse d'eau entraîne un grand nombre de risques, dont certains sont difficiles à quantifier. Bien que la méthode ait été appliquée ailleurs (p.e. en Angleterre, en Australie et, récemment, à l'Equateur), on ne peut pas directement transplanter les expériences obtenues dans ces pays à la situation actuelle.

La discussion plus haut nous amène à la conclusion que les risques associés avec une circulation artificielle, effectuée de façon continue ou interrompue pendant toute la période du printemps jusqu'à la fin de l'année, sont tellement importants, que cette méthode ne peut pas être recommandée, sans que ces risques soient évalués plus en détail.

6.5.1.2 Opération pendant des périodes limitées (mélange total)

Une stratégie alternative serait de recirculer la masse d'eau seulement pendant une période limitée au printemps ou à l'automne. L'opération d'un dispositif de circulation, soit au printemps soit à l'automne, c'est-à-dire pendant des saisons plus froides, possède l'avantage principal que l'eau du fond ne sera pas réchauffée autant que si on recircule pendant l'été.

Dans le cas circulation artificielle limitée pendant le printemps on peut, en principe, gagner trois avantages supplémentaires:

- un délai du début de la production algale
- une augmentation de la quantité d'oxygène dissous dans les couches profondes de la retenue
- un raccourcissement de la période de stratification, dû à l'augmentation légère de la température de l'hypolimnion (de 2 à 4° C), qui entraîne un avancement du brassage à l'automne .

Il convient de signaler que l'établissement de la stratification se fait très vite après le cessement de la circulation.

Le désavantage principal de cette stratégie consiste en l'augmentation de la concentration du phosphate dans l'épilimnion juste avant le pic de la production primaire.

Deux simulations à l'ordinateur, une utilisant les données initiales de 1979 et une autre correspondant à 1980, ont été effectuées pour étudier les conséquences d'une circulation artificielle opérée du début mars jusqu'à mi-mai (voir Annexe III). Le brassage naturel de l'automne était avancé d'environ 0,7 mois, mais la production algale totale était devenue plus importante par rapport à la situation sans circulation artificielle. Bien que le pic de biomasse algale soit retardé, le surplus d'oxygène était rapidement consommé et la formation de l'hydrogène sulfuré n'était presque pas affectée. La consommation rapide de l'oxygène dépend surtout de l'excès de matière organique qui se trouve toujours dans les couches profondes au début de l'année.

Par conséquent, ce qu'on gagne au début de la période productive, risque d'être perdu et on risque même de provoquer une aggravation plus tard. En conclusion, nous ne pouvons pas recommander une stratégie qui consiste en une circulation artificielle pendant quelques mois au printemps.

Par contre; une circulation artificielle seulement à l'automne paraît être une solution fort intéressante. La baisse naturelle de la thermocline et le brassage de l'hiver peut être avancé de quelques mois sans que des conséquences négatives soient trop importantes. Le brassage naturel est d'habitude accompli vers le 10 - 20 décembre. Ce processus peut être avancé d'environ deux mois si on commence la circulation artificielle autour du premier octobre. Ceci doit être fait d'une façon qui simule la baisse naturelle de la thermocline pour éviter une propagation de l'hydrogène sulfuré dans l'eau de surface.

Au moyen d'une circulation à l'automne on obtient donc:

- un raccourcissement de la période stratifiée
- un transport accru d'oxygène aux couches profondes
- une accélération de la décomposition de la matière organique accumulée pendant l'été
- une disparition plus tôt de l'hydrogène sulfuré.

En limitant la circulation à l'automne on évite les problèmes associés avec l'augmentation trop forte de la température et aussi les risques d'accélérer la production primaire. Par conséquent, cette stratégie peut être envisagée, dent les solutions techniques possibles vont être étudiées par la suite.

5.1.3. Circulation de l'épilimnion seulement

On peut aussi envisager une stratégie tout à fait différente de celles discutées plus haut, c'est-à-dire de circuler uniquement l'épilimnion pendant l'été. Le but de cette stratégie serait de baisser le niveau de la thermocline de quelques mètres, ce qui pourrait avoir comme conséquences:

- de cycler les algues hors de la zone productrice pour ainsi diminuer la production primaire;
- d'augmenter le volume de l'épilimnion et ainsi augmenter la fraction du détritus minéralisée dans l'épilimnion, ce qui aurait comme conséquence une diminution de la quantité de détritus traversant la thermocline pour atteindre l'hypolimnion.

Une combinaison optimale serait, bien entendu, de choisir des solutions techniques qui rendent possible d'effectuer les deux stratégies, circulation de toute la masse d'eau à l'automne et circulation de l'épilimnion pendant l'été, par le même équipement.

6.5.2. Solution technique

La circulation artificielle peut être obtenue au moyen:

- des générateurs de courants
- du pompage de l'eau de surface vers le fond.

Ce sera notamment le premier cas qui est discuté. Circulation par pompage est équivalente à la génération de courants, si le générateur est placé verticalement.

Un générateur de courants est un type d'hélice, qui peut être disposé à la profondeur voulue dans la retenue et là produire une circulation. L'avantage d'un tel système, par rapport à la méthode de l'air comprimé, réside dans le fait qu'on peut tourner le générateur de courants et ainsi le diriger vers la couche dans la retenue, où on veut provoquer une circulation. Par conséquent, on peut obtenir une très grande efficacité avec ce système, voir figure 10.

La figure 11 montre un dessin, indiquant une conception possible de l'installation. Cinq fondements sont disposés au bord de la retenue, où les conditions de fondation sont bonnes. L'emplacement exact doit être basé sur les résultats d'une investigation de la géologie. Sur les fondements on fixe une barre, sur laquelle le générateur de courants est suspendu. Ce dispositif permet de monter et descendre le générateur le long la barre au moyen d'un treuil. Pendant l'exploitation le générateur est fixé par des battants.

Au moyen d'une simulation par le modèle mathématique de l'hydraulique, partant de la situation en 1979, nous avons déterminé le temps nécessaire d'opération des générateurs de courants. Pour un débit total de l'épilimnion à l'hypolimnion de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ et si on commence le 23 septembre, il faut opérer les générateurs de courants pendant une période de 24 jours pour arriver à un brassage total de la retenue le 1er novembre. Comme chaque générateur entraîne une masse d'eau correspondante à environ $10 \text{ m}^3/\text{s}$, il faudra installer cinq unités pour répondre au besoin donné dans l'exemple. Chaque générateur a un effet électrique de 15 kW et doit être alimenté par une tension de $3 \times 380 \text{ V}$.

Le coût d'investissement est estimé à 3 millions de Dirhams, taxes et frais de douane exclus (calculé pour 5 générateurs).

Le coût d'exploitation est estimé à 60 000 Dh par an. Le besoin de surveillance est estimé à 2 heures par jour pendant 1 mois,

si on choisit uniquement l'alternative circulation à l'automne. Avec une circulation de l'épilimnion pendant 4 mois d'été en combinaison avec une circulation totale pendant un mois à l'automne, on arrive à un coût d'exploitation de 120 000 Dh par an, pourvu que l'effet installé (5 générateurs) soit suffisant pour la circulation de l'épilimnion. Ce point n'est pas encore vérifié et ce n'est pas évident, comme on ne peut s'en servir qu'à un degré limité des courants de densité, quand on travaille uniquement dans l'épilimnion. Des simulations au moyen du modèle bi-dimensionnel de l'hydraulique, qui sont actuellement en marche, vont fournir une réponse à ce problème.

6.5.3. Conclusions

La circulation artificielle au moyen des générateurs de courants est une solution très flexible, à cause du fait qu'on peut diriger l'effort exactement vers la couche d'eau où les problèmes se présentent en chaque période. Ainsi, on peut utiliser les mêmes appareils pour effectuer la circulation de l'épilimnion entre avril et août, en les dirigeant horizontalement, et pour projeter l'eau de l'épilimnion vers le fond et ainsi chauffer l'eau de l'hypolimnion pendant un mois, environ, à l'automne. Aussi, en dirigeant la circulation à l'automne de façon que des couches de plus en plus profondes soient mélangées au fur et à mesure que l'hydrogène sulfuré est éliminé, on peut éviter de propager de grandes quantités de ce gaz jusqu'à la surface.

Cette solution peut aussi facilement être adaptée à la situation après la surélévation du barrage, comme on peut simplement augmenter l'effet électrique installé en ajoutant des générateurs supplémentaires.

Pour finaliser un projet basé sur l'installation des générateurs de courants et préparer un coffret de commande, il reste une étude de dimensionnement relativement limitée. Le coût d'un tel travail peut être estimé à environ 200 000 Dirhams. Comme consortium d'études nous proposons une combinaison de IVL, Stockholm, Flygt, Box 1309, 171 25 Solna, Suède en coopération avec des ingénieurs conseillers marocains.

En conclusion, nous recommandons:

- circulation totale pendant un mois d'automne (mi-sept. - mi-oct.)
- circulation de l'épilimnion pendant 4 mois d'été
- solution technique: des générateurs de courants.

6.6. Mesures au niveau du traitement de l'eau potable

6.6.1 Introduction

Dans la liste des solutions retenues après une sélection préliminaire (voir le rapport de mission, 27-mai - 17 juin 1981), il en figure quelques-unes qui visent uniquement à une solution du problème occasionnel et passager de la mauvaise qualité de l'eau brute puisée à la tout de prise, mauvaise qualité due à la présence de l'hydrogène sulfuré dans cette eau. Ces solutions font, en principe, partie du système de traitement de l'eau potable, et leur but sera, avant tout, l'élimination de l'hydrogène sulfuré par aération, suivi par la préchloration.

6.6.2 Aération

L'objectif de l'aération sera d'obtenir la dégazification de l'hydrogène sulfuré dans l'eau captée pour la station de traitement. La concentration maximale de sulfures mesurée dans l'eau de l'hypolimnion est de 3,2 mg/l et la période où la présence de sulfures pose un problème réel pour l'exploitation de la station de traitement peut être estimée à environ 4 mois par an au maximum.

La présence de l'hydrogène sulfuré dans l'eau augmente le risque de corrosion dans les constructions, pompes etc. Par conséquent, un dispositif d'aération doit être situé aussi près que possible du point où l'eau est prise. Comme la préchloration de l'eau doit être effectuée après l'aération, il faut aussi protéger la galerie et la station de pompage de la croissance de microbes, en réduisant la distance du transport de l'eau non chlorée. De même, il faut maintenir un temps de contact assez long pour assurer la protection de la station de traitement. Finalement, il faut éviter les problèmes sanitaires et les nuisances provoqués par la dégazification de l'hydrogène sulfuré dans les endroits très peuplés comme ceux situés près de la station de traitement.

La réduction des sulfures dans l'eau brute ne doit être portée qu'à un niveau techniquement et économiquement raisonnable. Ceci veut dire qu'on ne devra pas porter la réduction en-dessous du seuil d'odourat des sulfures, ce qui signifierait un degré de

réduction de 99,995 %. Un degré de réduction raisonnable dans l'étape d'aération serait de 90 %, étant donné un pH de l'eau de 7,5 - 7,8. L'élimination totale des sulfures pourra ainsi se faire facilement par chloration, surtout comme l'aération provoque une augmentation sensible du potentiel red-ox de l'eau, ce qui entraîne d'une part une oxydation spontanée des sulfures et, d'autre part, une diminution du risque pour la formation des polysulfures à la chloration.

Les solutions techniques alternatives choisies pour effectuer l'aération ou la dégazification de l'hydrogène sulfuré sont les suivantes:

- une tour d'aération flottante sur l'eau de la retenue, juste à côté de la tour de prise;
- une tour d'aération localisée sur la berge à côté de la tour de prise;
- une tour d'aération à la fenêtre intermédiaire dans la galerie entre la tour de prise et la station de pompage.

Pour le dimensionnement des dispositifs d'aération nous avons sélectionné les valeurs suivantes:

- concentration totale des sulfures: 5 mg/l
- quantité d'eau prise: 9 m³/s
- période maximale d'aération: 4 mois/an

6.6.2.1 Tour d'aération flottante

L'avantage principal d'installer la tour d'aération sur une plate-forme flottante sur l'eau est que le dispositif suit les variations de cote de la surface de la retenue. Ainsi le niveau de levage des pompes est constant, ce qui diminue la consommation d'énergie. Dans la fig. 42 est donné un dessin montrant une conception possible de cet arrangement.

Des deux côtés de la tour de prise on construit des jetées, entre lesquelles sera tendue une paroi en plastique (4 mm d'épaisseur), munie de corps flottants, entre le fond et la thermocline. Cette paroi sert à délimiter l'eau aérée de l'eau hypolimnique contenant de l'hydrogène sulfuré. Une des jetées doit être munie d'une vanne près du fond. La vanne reste fermée pendant les

périodes, où l'eau de l'hypolimnion est contaminée par l'hydrogène sulfuré et le dispositif d'aération est en opération. Par contre, aux périodes où il n'y a pas d'hydrogène sulfuré, la vanne sera ouverte pour permettre de capter l'eau de l'hypolimnion. Au-dessus de la paroi sera ancrée la plate-forme, portant la tour d'aération. La plate-forme porte, en plus de la tour d'aération, des pompes, des tamiseuses et de l'équipement de manoeuvre.

Pendant l'exploitation du système, l'eau de l'hypolimnion, d'une profondeur de 20 m au moins, sera pompée au moyen de 6 pompes d'une capacité totale de $10 \text{ m}^3/\text{s}$ à un niveau de 5 m au-dessus de la plate-forme. L'eau sera d'abord tamisée à travers un tamis ayant des mailles de 5 mm. A partir de la station de tamisage, l'eau sera conduite à deux tours d'aération où elle sera dispersée. Chaque tour d'aération a une surface de $10 \times 20 \text{ m}$ et est munie d'un matériel de garnissage (p.e. du Plasdek S) d'une hauteur de 2,5 m. Le matériel de garnissage crée une surface de contact entre eau et air d'environ $100\ 000 \text{ m}^2$.

Comme matériel de construction lourde (piliers, barres, canaux) nous proposons de l'acier inoxydable, tandis que les cloisons, les plafonds etc. peuvent être réalisés en tôle d'aluminium, le tout pour résister au milieu corrosif créé par l'hydrogène sulfuré et ses produits d'oxydation. Aussi les ventilateurs au plafond doivent être fabriqués en matériel inoxydable. L'hydrogène sulfuré strompé sera évacué au-dessus de la tour d'aération par une cheminée pour assurer une dilution et dispersion rapide.

L'eau aérée est refoulée du côté intérieur de la paroi en plastique, où cette eau, ayant une densité plus élevée que l'eau de la surface, tombe vers les couches profondes. Ce système permet d'utiliser la tour de prise exactement comme actuellement -- l'eau brute pour la station de traitement sera captée par le pertuis inférieur de la tour de prise.

Pour faciliter la construction et la mise en place du système d'aération flottant, aussi bien que son entretien, nous proposons qu'une des deux jetées soit munie d'un chemin d'accès aux véhicules (camions, grue etc.). La construction des jetées peut être facilitée si on utilise la plate-forme flottante, munie d'une grue. Après que les jetées et la paroi aient été mises en place,

l'équipement d'aération sera monté sur la plate-forme.

Le système d'aération flottant (pompes, ventilateurs etc.) doit être alimenté en énergie électrique avec l'effet de 1,5 MW. D'après les renseignements obtenus, cet effet n'est pas accessible actuellement. Par conséquent, une nouvelle station de transformateur doit être installée et alimentée à partir de la ligne de haute tension (22 kV) qui passe à côté.

Le coût d'investissement a été estimé à 31 millions de Dirhams, taxes et frais de douane exclus. Les calculs sont basés sur le niveau actuel de la cote maximale de la retenue (+ 50 m NGM). Avec une surélévation du barrage les jetées doivent aussi être surélevées et dimensionnées autrement.

Le coût d'exploitation pendant une période de 4 mois par an est calculé à 3 millions Dirhams/an. Ce coût inclut l'énergie électrique (0,38 Dh/kWh), les salaires (surveillance jour et nuit pendant la période d'opération) et entretien (10 ans de temps de décompte pour les pièces mécaniques).

6.6.2.2 Tour d'aération fixe à la retenue

L'alternative à la solution de placer un dispositif d'aération sur une plate-forme flottante, tout en gardant l'idée d'effectuer l'aération en amont de la tour de prise, serait de construire une tour d'aération fixe sur la berge de la retenue, 50 m au sud de la tour de prise. Dans l'exemple présenté ci-après, on présume que la cote maximale de la retenue est + 50 m NGM.

Une esquisse de la conception de cette alternative est montrée dans la figure 13. Trois conduites d'un diamètre de 2 m chacune servent à monter de l'eau de l'hypolimnion de la retenue jusqu'à une station de pompage sur la berge. Le matériel proposé pour les conduites est du béton, mais d'autres matériaux peuvent aussi être envisagés. La station de pompage doit être placée de façon que la surface de l'eau puisse varier entre + 30 et + 50 m NGM. Le nombre de pompes proposé est 4 et celles-ci sont dimensionnées pour une hauteur de levage de 30 m. L'effet installé doit être environ 5 MW.

La tour d'aération avec le dispositif de tamisage sera installée au niveau de + 55 m NGM. Le tamisage et l'aération seront effectués de la même façon que dans l'alternative précédente (plateforme flottante). Le refoulement de l'eau aérée se fera par 3 conduites d'un diamètre de 2 m, qui seront dirigées vers la tour de prise. Cette alternative prévoit aussi la construction des deux jetées avec une paroi interposée, qui servent à empêcher l'eau aérée de se mélanger avec l'eau non-traitée de la retenue. La solution alternative, de refouler l'eau aérée directement dans la tour de prise ou dans la galerie d'adduction a été considérée comme techniquement trop compliquée, surtout parce que l'approvisionnement de la station de traitement ne peut pas être interrompu pendant l'exécution des travaux nécessaires.

Le coût d'investissement a été estimé à 40 millions de Dirhams, taxes et frais de douane exclus. Le coût d'exploitation sera environ 5 millions de Dirhams/an.

Si la surélévation de la retenue est effectuée, la tour d'aération doit être déplacée et la station de pompage dimensionnée pour une hauteur de levage plus importante.

6.6.2.3 Tour d'aération dans la galerie en aval de la tour de prise

L'accessibilité à la galerie et la qualité des rochers dans les environs de la fenêtre intermédiaire donnent à penser que cet endroit pourrait convenir à la construction d'une tour d'aération. De plus, les communications routières pour atteindre ce lieu sont relativement bonnes.

Une inspection de l'intérieur de la galerie a montré qu'il n'y avait pas de fissures visibles au niveau de la fenêtre intermédiaire. La conception d'une tour d'aération à cet endroit pourrait suivre l'esquisse montrée en figure 14.

Or, un sondage supplémentaire de la qualité du rocher doit être effectué avant de prendre des décisions sur l'emplacement exact de la tour d'aération et de l'équipement supplémentaire. Le problème principal, soulevé par cette solution, provient du fait qu'il faudra installer une vanne dans la galerie. Ceci implique, d'une part, qu'il faut vider la galerie pendant un temps limité et, d'autre part, qu'il faut effectuer des travaux d'écla-

tement très près de la galerie. Il est évident que ces travaux seront très délicats, bien que loin d'être impossibles, étant donné que des mesures de sécurité extrêmement poussées doivent être observées. Par conséquent, ces travaux provoquent des coûts très élevés.

En dehors des tours d'aération, qui devraient être installées à deux niveaux pour pouvoir mieux utiliser l'énergie potentielle de l'eau suivant le niveau de la retenue, il faudra installer une cheminée d'équilibre. Les vannes d'entrée et de sortie de la tour d'aération doivent être réglées automatiquement depuis la station de pompage, de façon que ces vannes s'ouvrent en fonction du débit de pompage. Une vanne de sécurité doit être installée pour assurer que la station de pompage ne pourra jamais manquer de l'eau, si le système automatique tombe en panne. Les deux tours d'aération et la station de tamisage sont conçues de la même façon que dans les alternatives précédentes, à l'exception des ventilateurs qui sont placés dans une cheminée au-dessus du sol.

L'avantage d'une tour d'aération dans la galerie réside dans le fait qu'on n'aura pas besoin de monter l'eau et, par conséquent, la consommation d'énergie au niveau du dispositif d'aération sera relativement basse. Par contre, il y aura des pertes d'énergie au niveau de la station de pompage existante, bien que ces pertes aient été minimisées.

Les inconvénients de cette alternative sont tout d'abord les travaux d'éclatement difficiles, les difficultés de surveillance (loin des installations actuelles), les problèmes d'alimentation en énergie et le fait qu'on doit installer une nouvelle station de préchloration, puisque celle qui existe à la tour de prise ne peut plus servir. Pour l'alimentation en énergie, une ligne de haute tension et une station de transformateurs doivent être construites.

Le coût d'investissement a été estimé à 60 millions de Dirhams et le coût d'exploitation à 2 millions de Dh. par an. A ceci il faut ajouter le coût des pertes d'énergie dans la Station de Pompage.

6.6.2.4 Sélection du système optimal d'aération

Il est bien évident que toutes les solutions techniques présentées d'un système d'aération visent uniquement à éliminer les problèmes de qualité de l'eau de consommation, liés à son potentiel red-ox périodiquement très bas. Ces problèmes sont du genre: présence d'hydrogène sulfuré, de fer et de manganèse en état réduit et des composés azotés sauf les nitrates.

L'aération de cette eau captée pour la production de l'eau potable n'a, bien entendu, aucun effet sur l'eau de la retenue. De même, ce traitement n'améliore pas les problèmes liés à l'apparition de mauvais goûts et d'odeurs directement provoqués par des algues et bactéries diverses. Par conséquent, on peut conclure qu'un dispositif d'aération ne résoud qu'une partie des problèmes créés par l'eutrophisation de la retenue Sidi Mohammed Ben Abdellah, et obtient ceci à un coût relativement élevé.

L'avantage principal d'une aération serait que c'est un système techniquement bien connu et contrôlable, dont l'efficacité peut être prévue avec plus de certitude que celle d'une solution qui met en jeu tous les facteurs dans un écosystème d'une complexité largement plus élevée.

Si on envisage un système d'aération, il nous semble que la solution de choix serait la tour d'aération placée sur une plateforme flottante, pour les raisons suivantes:

- flexibilité pour suivre les fluctuations de la cote de la retenue, même dues à la surélévation du barrage
- demande en énergie globale la plus faible
- emplacement favorable pour la surveillance, l'alimentation d'énergie et possibilité d'utiliser la station de préchloration existante.

6.7. Traitement des eaux usées de la ville de Rommani

La ville de Rommani a actuellement entre 11 000 et 12 000 habitants dont les eaux usées sont déversées directement dans un petit ruisseau qui se jette dans l'oued Mechraa. Le débit normal est de 800 - 900 m³ par jour avec une DBO₅ d'environ 800 mg/l et une concentration de phosphore total d'environ 10 mg/l. Etant donné que la ville est en fort accroissement, on peut s'attendre à une augmentation rapide du volume d'eau polluée.

La charge en phosphore sur la retenue provenant de Rommani est actuellement tout à fait marginale, si on compare avec la charge totale. Tout de même, ce phosphore de provenance urbaine est vraisemblablement beaucoup plus accessible aux algues que le phosphore transporté par les grandes crues. Aussi, les eaux usées, stockées dans le lit de l'oued pendant la période sèche, peuvent être rapidement transportées à la retenue avec les premières pluies de l'automne, tant qu'il y a toujours un risque d'une floraison des Cyanophycées.

Par conséquent, et conformément à la recommandation exprimée à la Table Ronde, il y a des raisons de concevoir un dispositif simple pour le traitement des eaux usées de Rommani. Un plan préliminaire d'une telle station de traitement consisterait en un bassin d'oxydation dimensionné pour un débit de 1 300 m³/j et une charge en DBO₅ de 1 200 kg/j.

Le but principal du traitement, qui est une réduction du phosphore, pourrait s'effectuer, soit par une floculation classique (par sels de fer ou d'aluminium) suivie d'une décantation simple, soit à l'aide de jacinthes d'eau introduites directement dans le bassin d'oxydation. Ces plantes flottantes possèdent une très forte capacité d'absorption des phosphates et la biomasse produite peut être ramassée et utilisée comme fourrage ou comme matière première pour la production de biogaz. Or, une utilisation de jacinthes d'eau dans le bassin versant de la retenue doit être accompagnée de mesures de sécurité draconiennes pour éviter une propagation vers la retenue.

6.8. Introduction de nitrate

L'introduction des nitrates dans l'hypolimnion de la retenue doit être considérée comme une solution extrême. Par conséquent, cette mesure ne sera pas planifiée à l'avance, mais la constitution d'une réserve de nitrates doit être envisagée comme une assurance, dont l'utilisation sera faite en dernière instance si le besoin s'en fait sentir.

Donc, nous proposons qu'un stock de 300 tonnes de nitrate de calcium ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) soit établi dans deux silos de 150 tonnes chacun près de la retenue. Juste avant la disparition totale de nitrate dans l'hypolimnion, on procède à une dispersion de ce produit dans l'eau du fond de la retenue. L'introduction du nitrate se fera sous forme de "slurry" de 10 %, qui sera pompé jusqu'au fond et dispersé soit au moyen des générateurs de courants, placés près du fond, soit au moyen d'un bac muni du dispositif de pompage.

Le coût d'investissement (silos, équipement de dissolution et de pompage, tuyaux etc.) est pour les deux solutions techniques estimé à environ 700 000 Dirhams, taxes et frais de douane exclus. Le prix de nitrate de calcium, livré sur place, est d'environ 1 000 Dirhams par tonne, taxes et frais de douane exclus.

7. RECOMMANDATIONS

Tout en retenant les solutions citées dans le chapitre 6.2., d'une part les solutions à long terme (§ 1: "Réduction des apports d'éléments nutritifs") et d'autre part les solutions faisant part de la gestion rationnelle du barrage (§ 2), nous recommandons la stratégie suivante pour les solutions qui demandent des investissements nouveaux de la part de l'ONEP:

- En premier lieu nous recommandons une combinaison de
 - (1) des mesures biologiques, c'est-à-dire le transvasement des alevins de mulets et l'implantation des carpes argentées;
 - (2) l'installation des générateurs de courants pour effectuer une circulation totale de la masse d'eau à l'automne et une circulation de l'épilimnion pendant l'été;
 - (3) l'établissement d'un stock de nitrate, qui peut être utilisé comme recours final, si les autres mesures ne sont pas suffisantes pour résoudre le problème de la qualité de l'eau.
- En deuxième lieu nous proposons l'élimination par aération de l'hydrogène sulfuré dans l'eau brute captée pour la station de traitement de l'eau potable. Parmi les différentes solutions techniques discutées nous recommandons la tour d'aération flottante sur la retenue.

La solution recommandée en premier lieu est très flexible; elle a un caractère séquentiel - on peut ajouter les efforts si besoin est. En plus, cette solution est facile à adapter à la situation qui existera après la surélévation du barrage. Finalement, le coût d'investissement total dans l'immédiat est relativement bas, il s'élève à environ 5 500 000 Dirhams (taxes et frais de douane exclus). Le coût d'exploitation de cette solution ne dépasse pas 500 000 Dh/an; même si on doit introduire 300 tonnes de nitrate de calcium dans l'hypolimnion.

La solution proposée en deuxième lieu est plus difficile à adapter à une surélévation du barrage, bien que ce ne soit pas impossible. Elle est aussi plus coûteuse: coût d'investissement de 31 millions de Dirhams et coût d'exploitation de 3 millions de Dirhams par an. Par contre, c'est une solution qui met en jeu une technologie mieux connue que celle de la solution préférée.

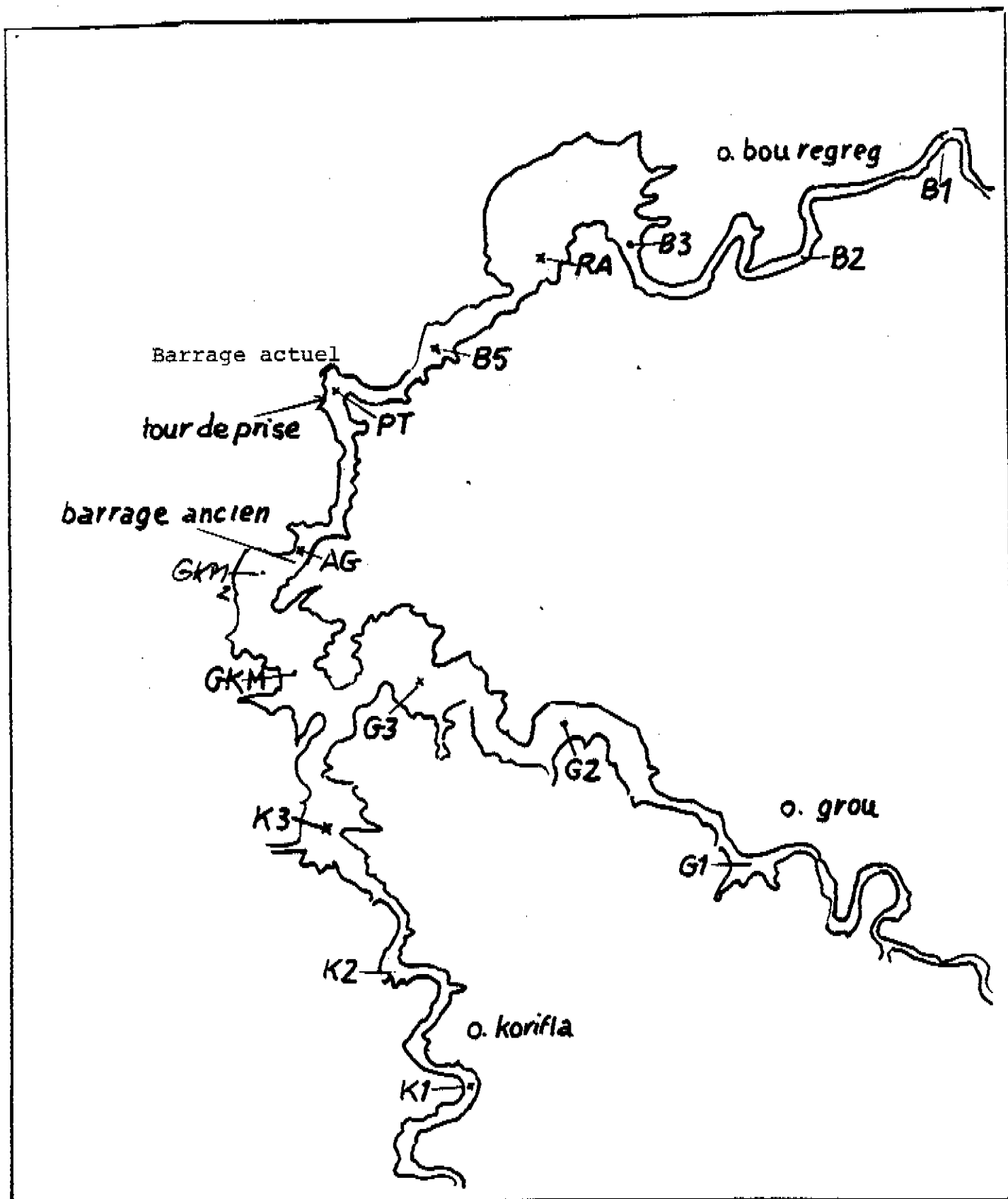


Fig. 1. Carte du Lac - Reservoir du Bou Regreg avec points de prélèvements

Figure 2. Relations entre débits des oueds et concentrations de quelques substances.

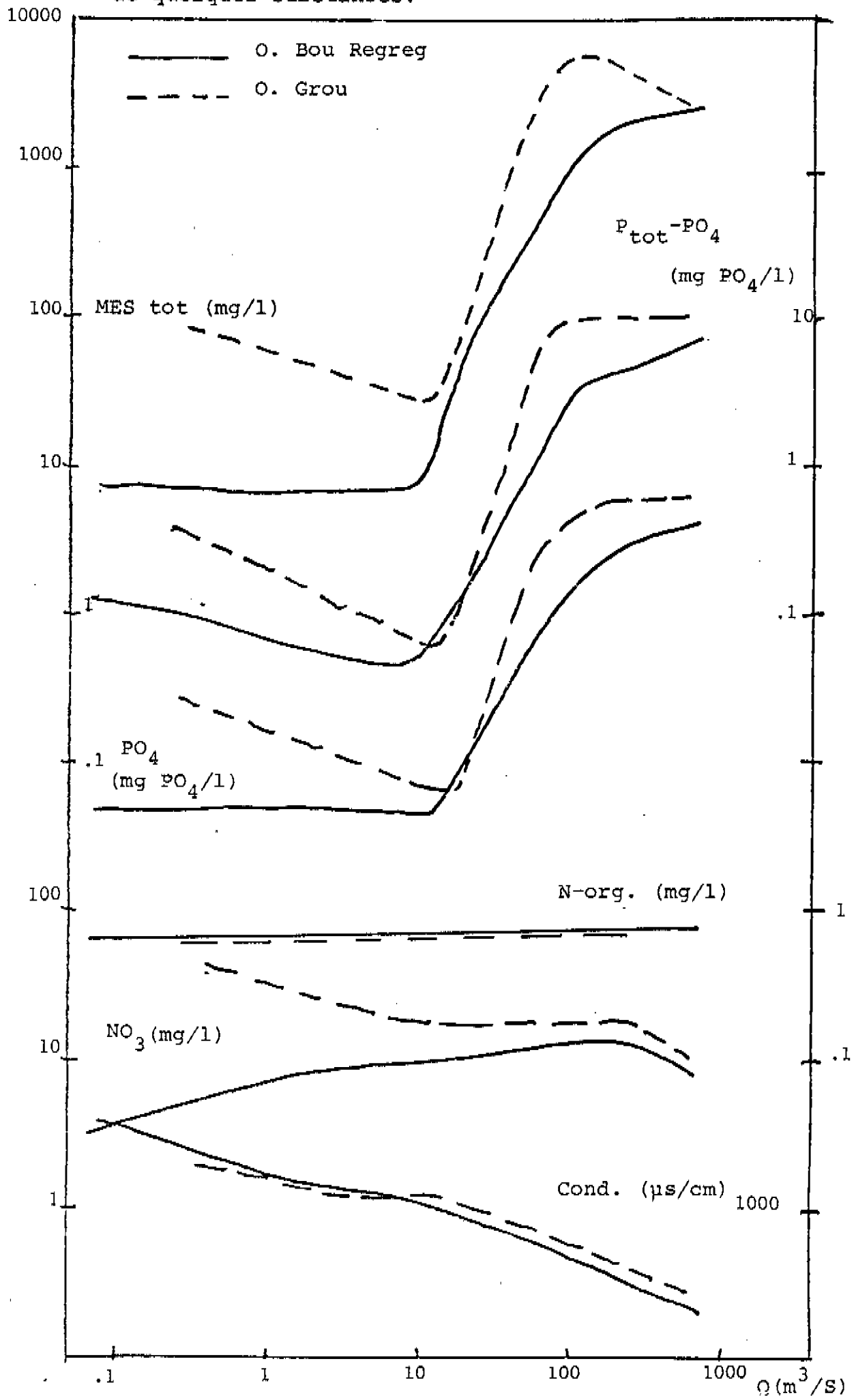
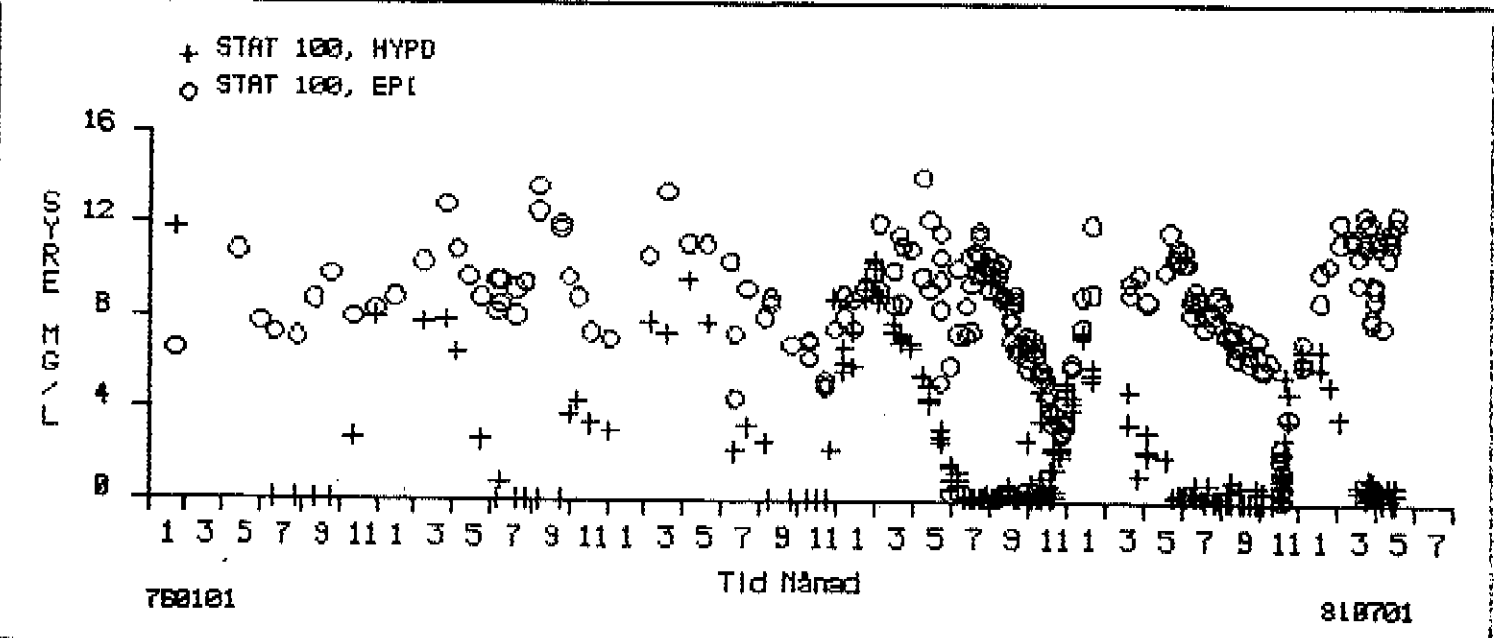
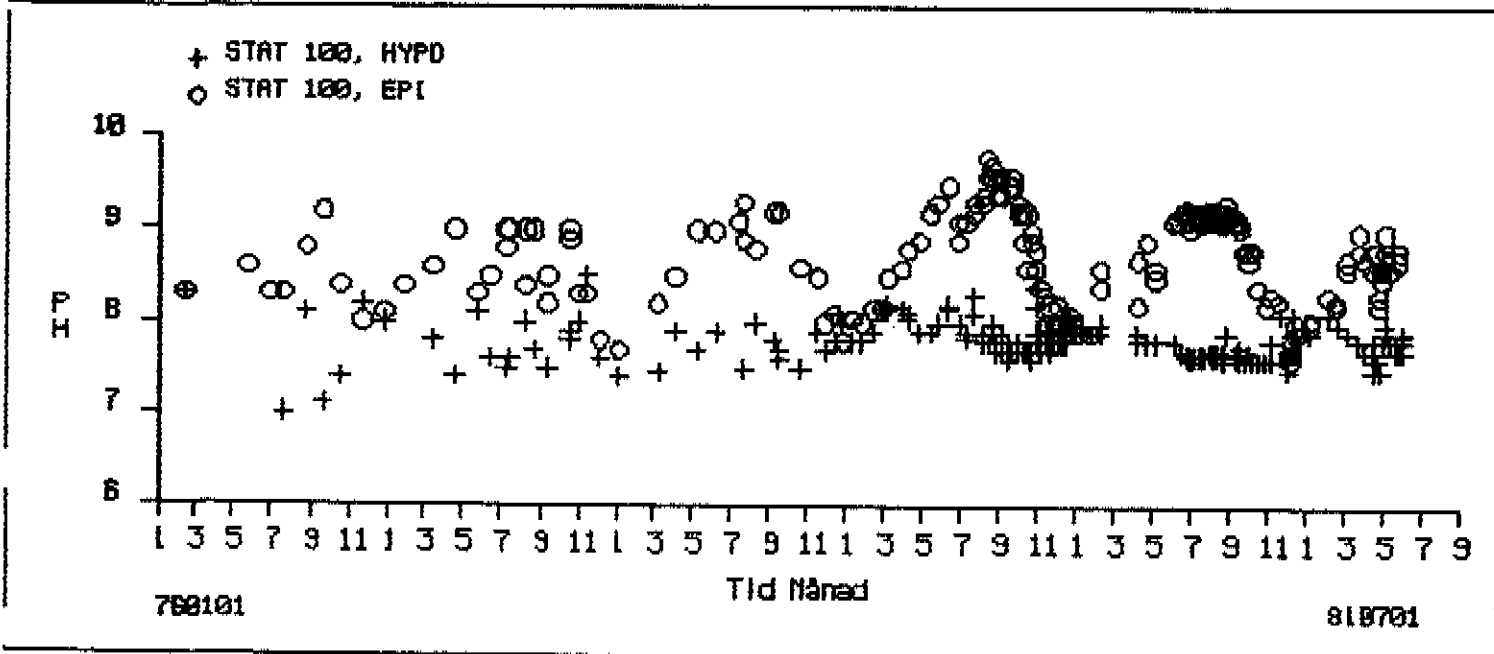
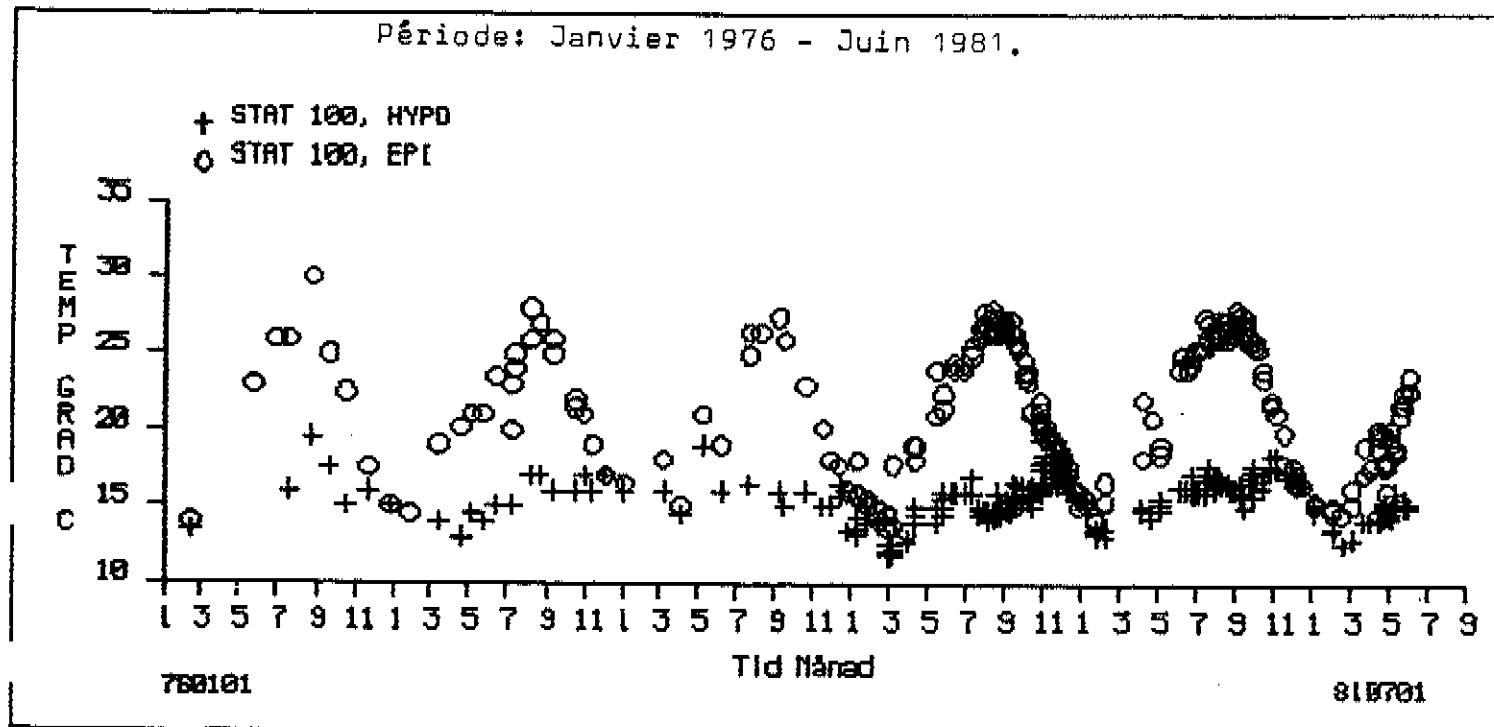


Figure 3. Evolution dans le temps de la température, du pH et de l'oxygène dissous, Près de la tour de prise.

Période: Janvier 1976 - Juin 1981.



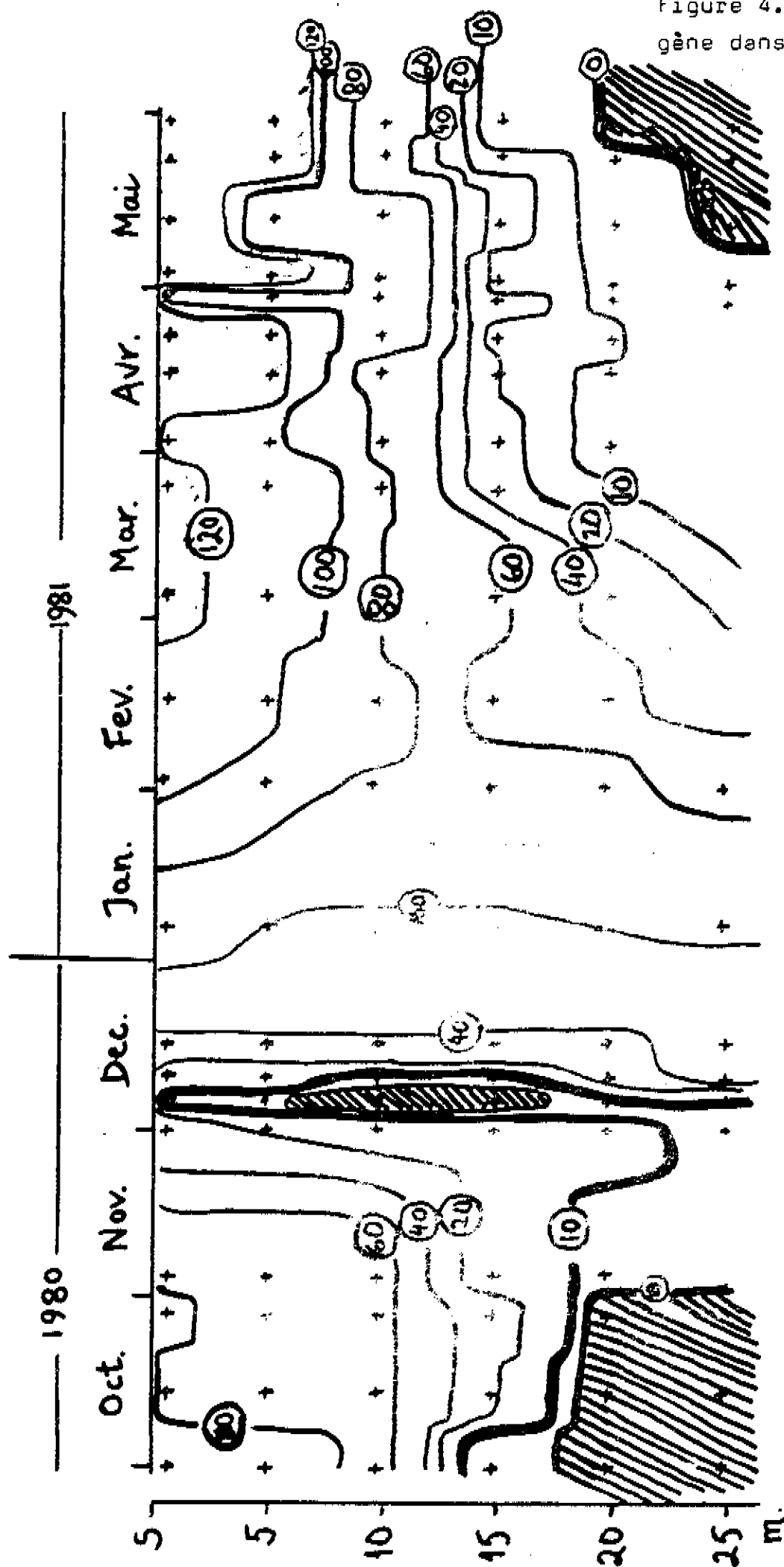
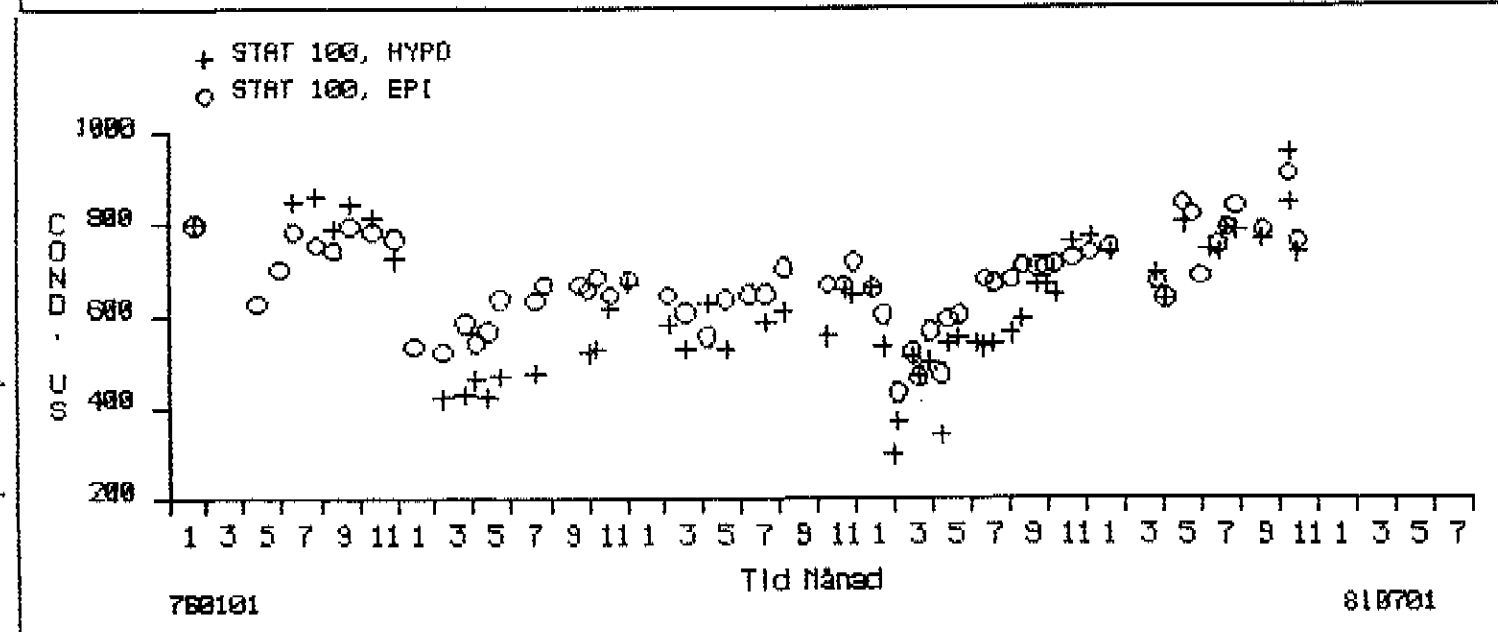
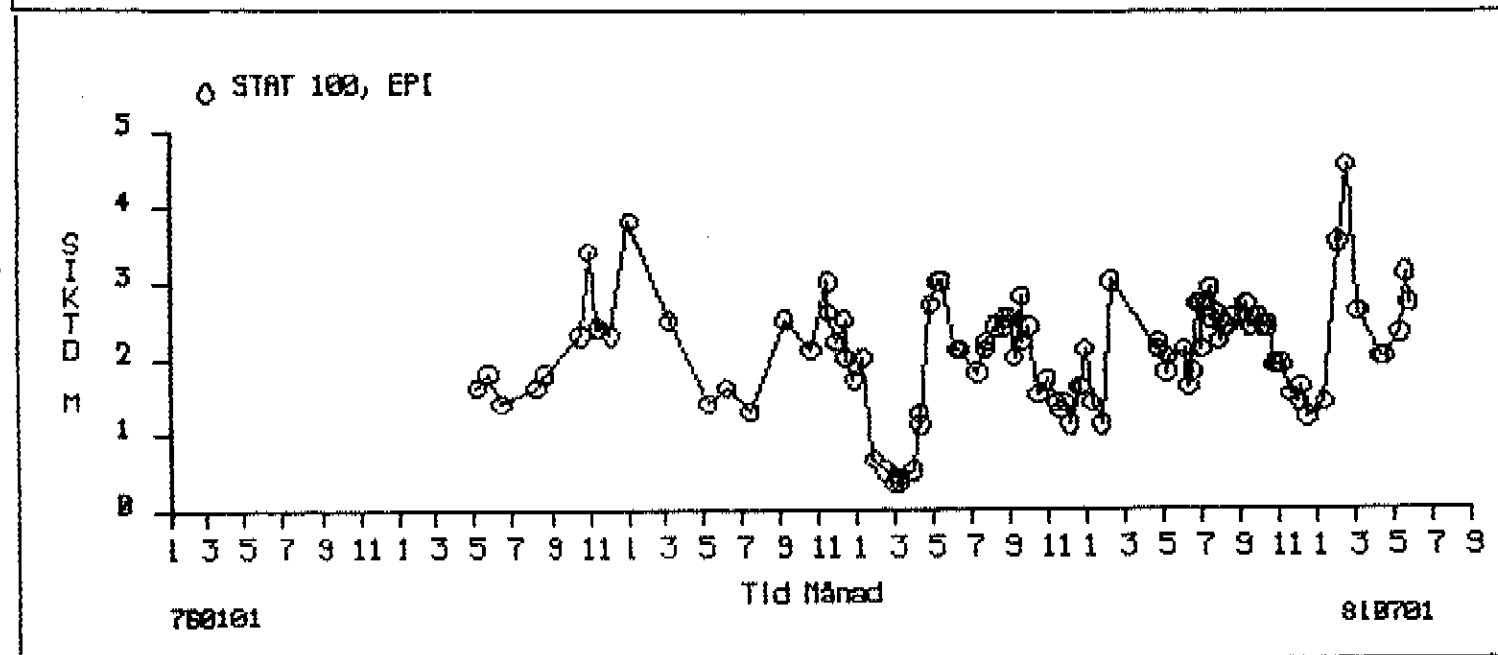
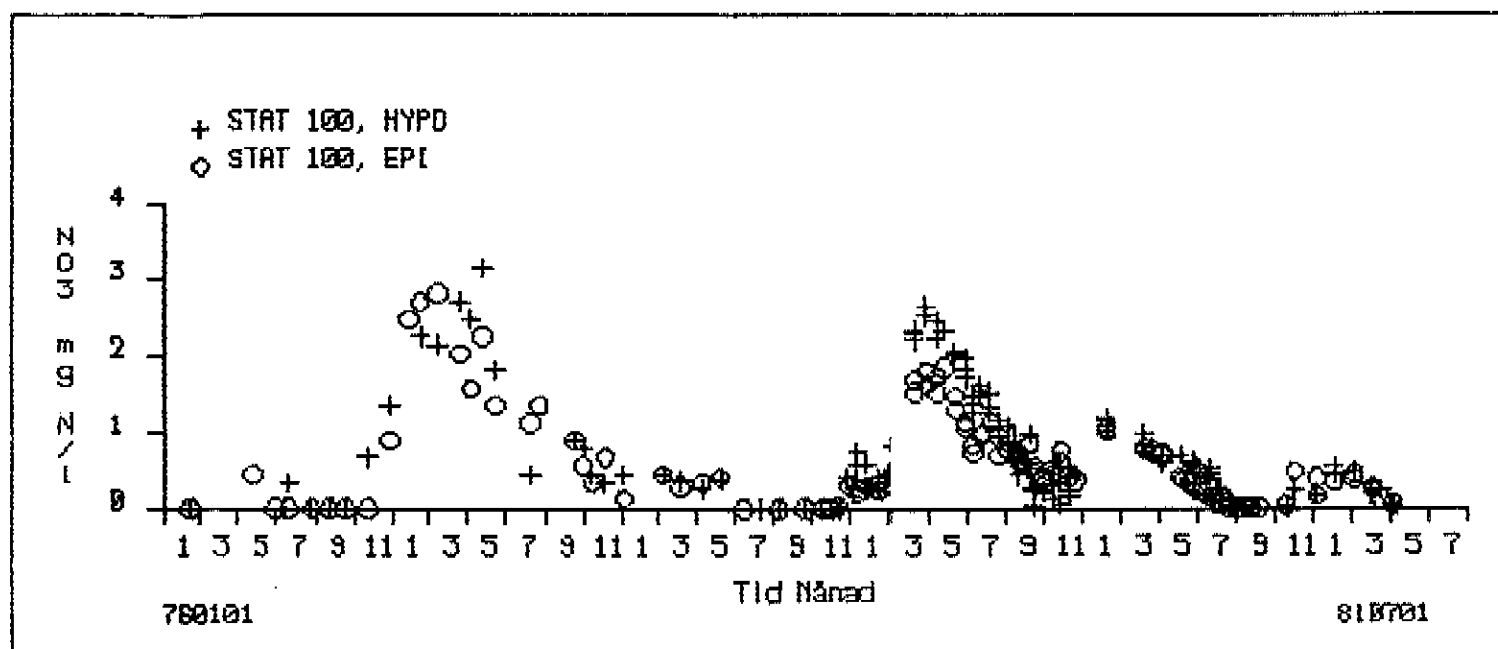


Figure 4. Saturation d'oxygène dans l'eau. Près de la Tour de Prise.

%O₂ Octobre 1980 - Mai 1981 (Près de la Tour)

Figure 5. Evolution dans le temps des nitrates, de la transparence (Secchi disc) et de la conductivité, Près de la Tour de Prise. Période: Janvier 1976 - Juin 1981.



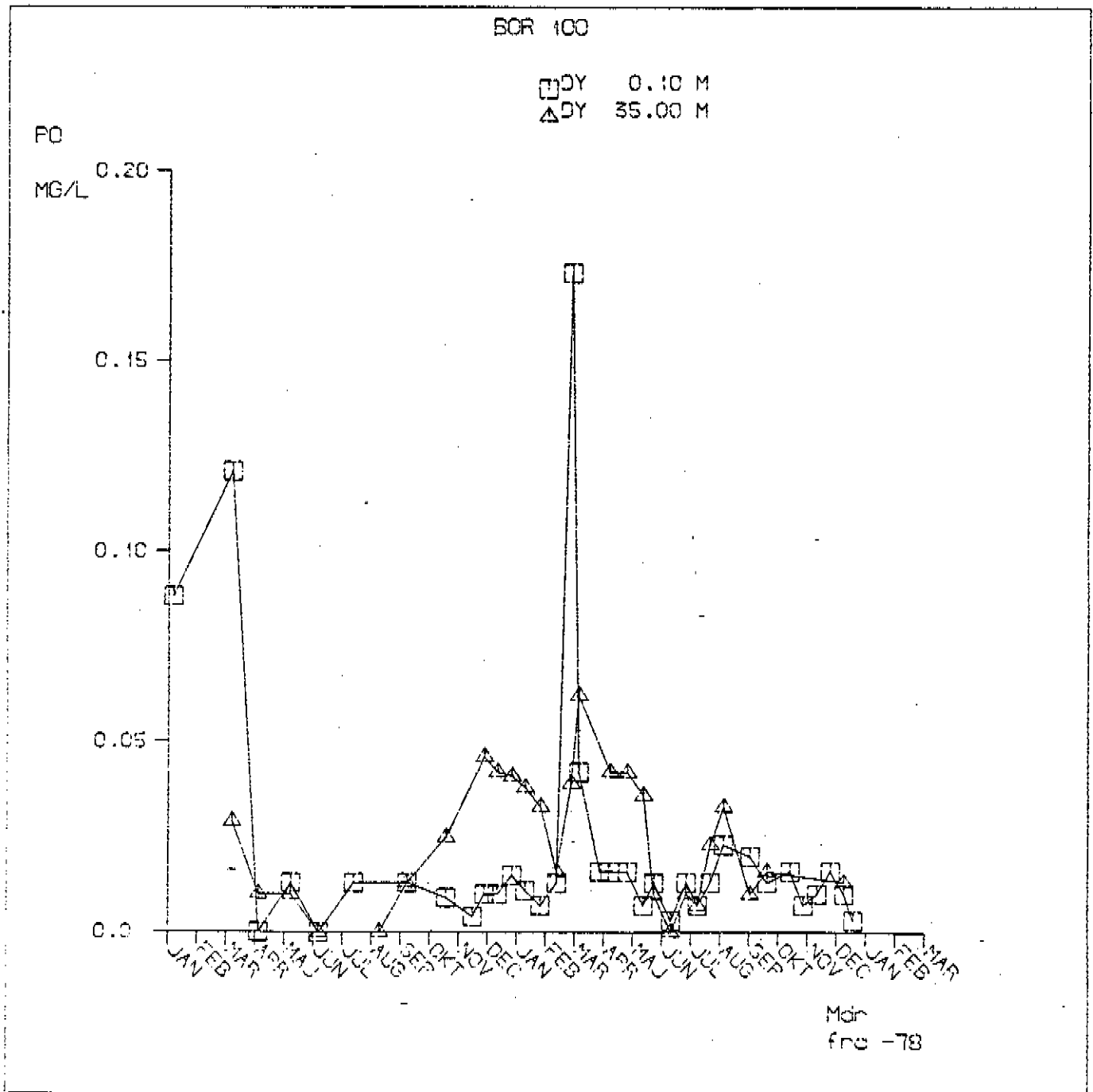
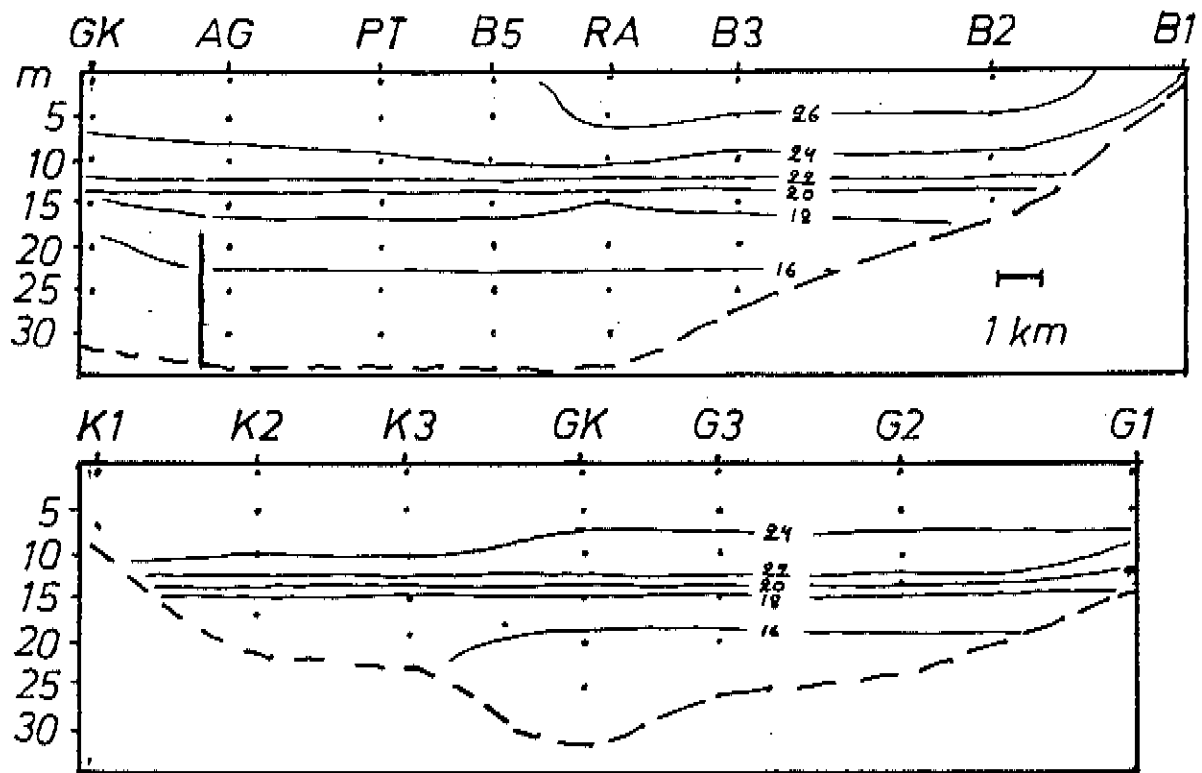
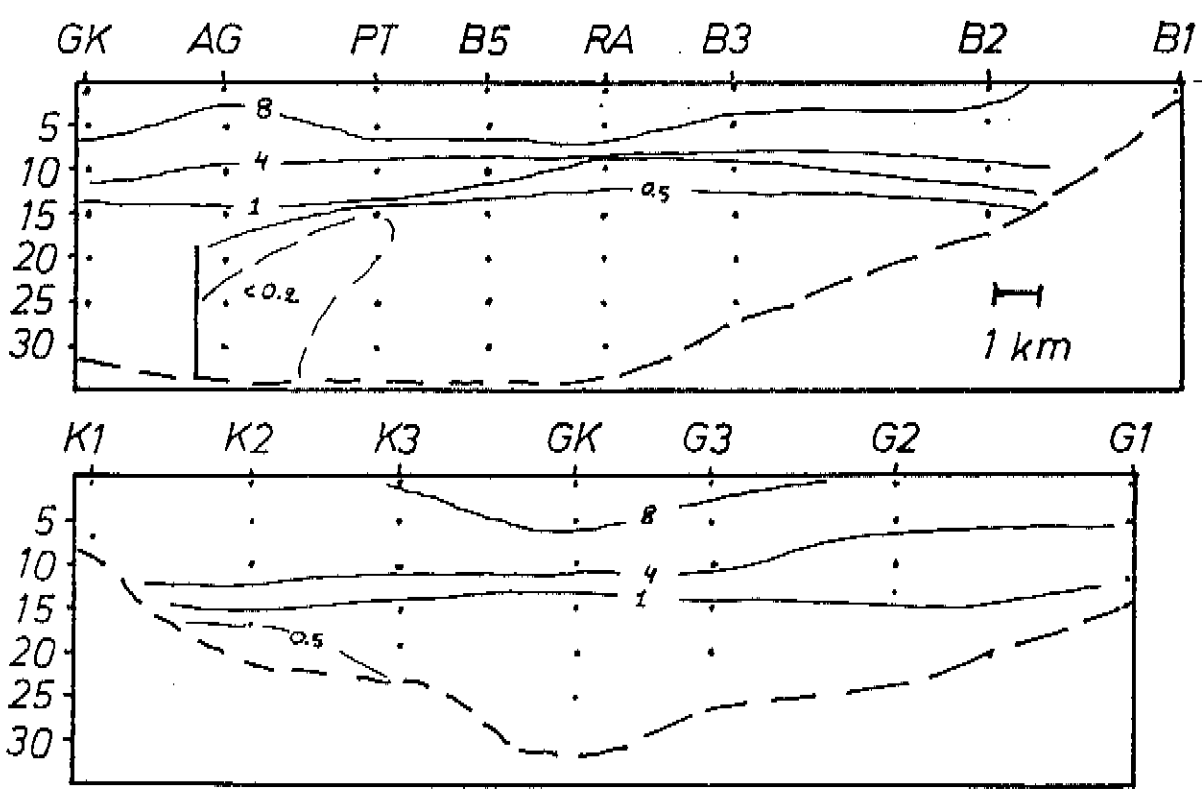


Figure 7. Orthophosphate, PO₄ - P, station PT, jan 1978 - dec 1979



Température (°C).



Oxygène dissous (mg O₂/l).

Fig. 8. Températures et oxygène dissous dans la retenue, 20-26 septembre 1979

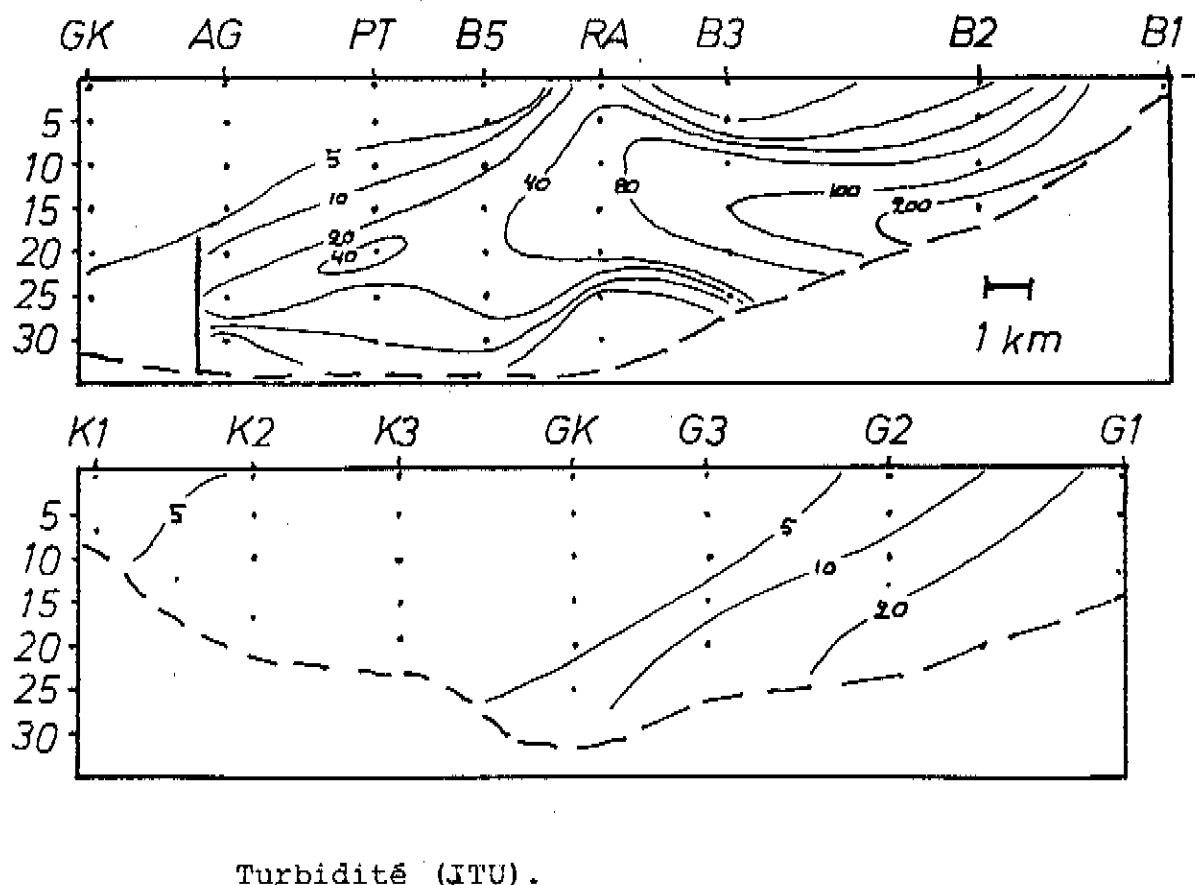
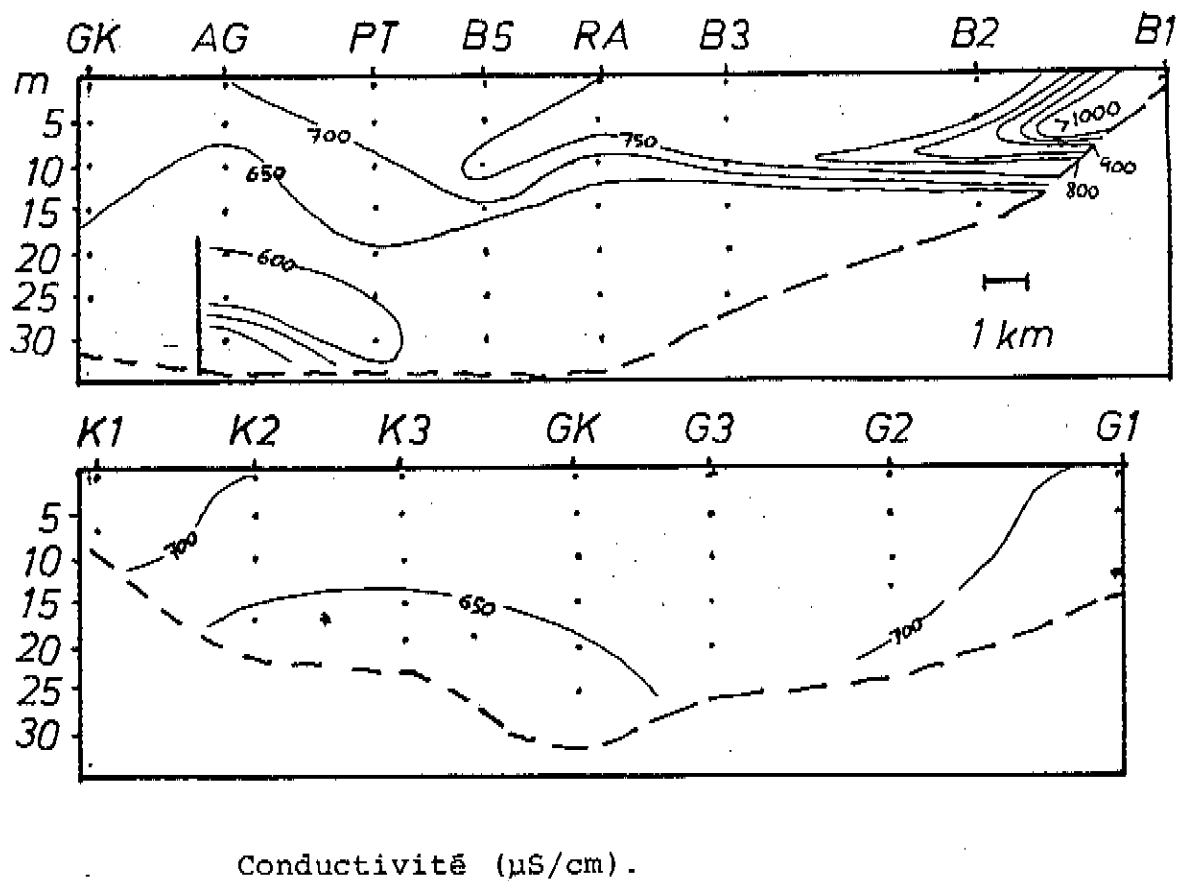


Fig. 9. Conductivité et turbidité dans la retenue, 20-26 septembre 1979

4500



Teknisk specifikation

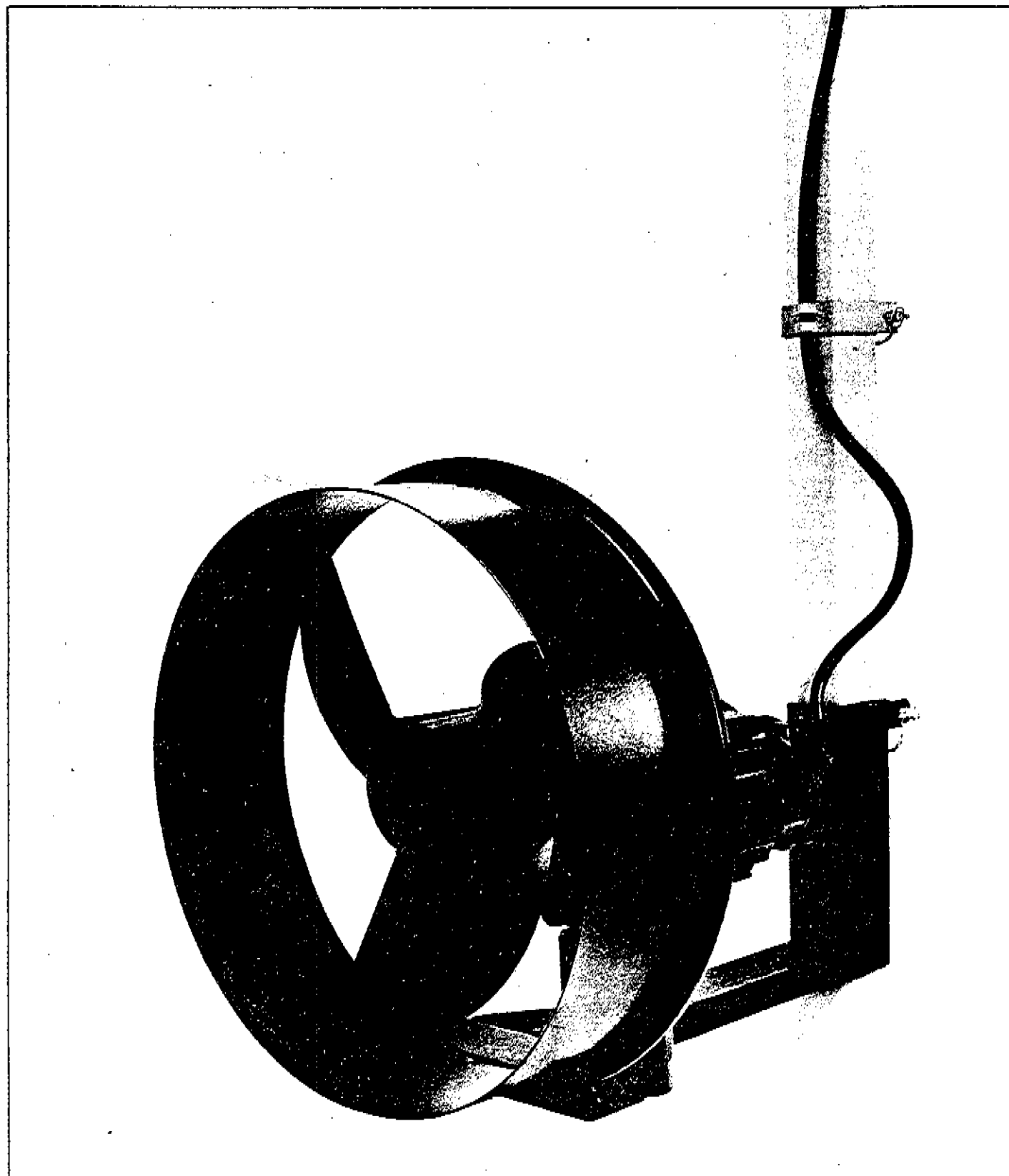
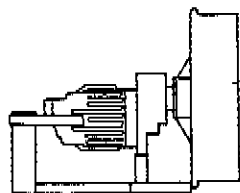


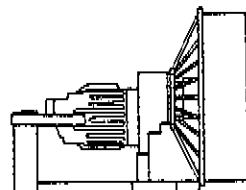
Figure 10.
4500 Teknisk specifikation

Flygts dränkbara omrörare 4500 är konstruerad för suspensionshållning av vätskor och tjockflytande slam. Omröraren är t.ex. avsedd att användas i behållare där flytslam eller bottenavlagringar förhindrar en fullgod tömning.

Olika installationsalternativ



SR 4500 för fast installation. Lyft- och gejdordningen har konstruerats med hänsyn till praktisk installation och hantering.



TR/TS 4500 för strömbildning i vatten och andra vätskor. TR = fast installation med gejdorr TS = transportabel installation, t.ex. under flotte.

Tekniska data

3-fas växelströmsmotor

Märkeffekt		Märkström		
kW	r/min	220V	380V	500V
13,5	1450	48A	27,5A	21 A
5,5	950	22,5A	13,1 A	10A

Motorsladd: RDOT 4x4 mm² alternativt 4x6 mm²

Vikt: 275 kg

Max. nedsänkingsdjup: 40 m

Propeller

Trebladig propeller med en diameter av 780 mm; två versioner med en stigning av 520 mm respektive 640 mm.

För att propellern ej skall sättas igen, inte ens i kraftigt förorenade vätskor, har den bakåtsvepta framkanter och är av skjutande typ.

Växel

Växel med 3 alternativa spiralkugg

Motor 13,5 kW: Propellervarvtal 360, 340 eller 315 r/min.

Motor 5,5 kW: Propellervarvtal 235, 225 eller 205 r/min.

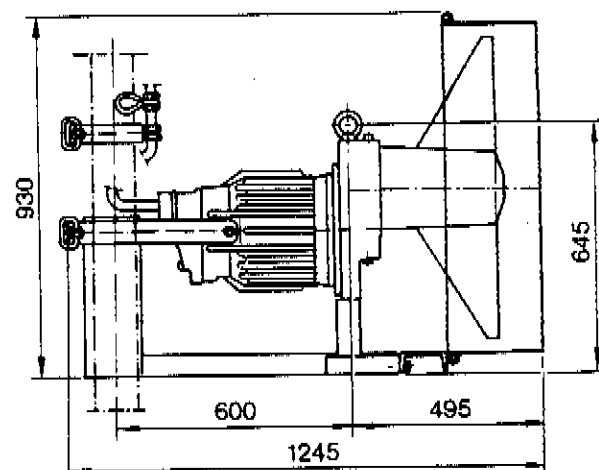
Min. flöde: 0,6 m³/s (3,6 m³/min)

Max. flöde: 1,4 m³/s (8,4 m³/min)

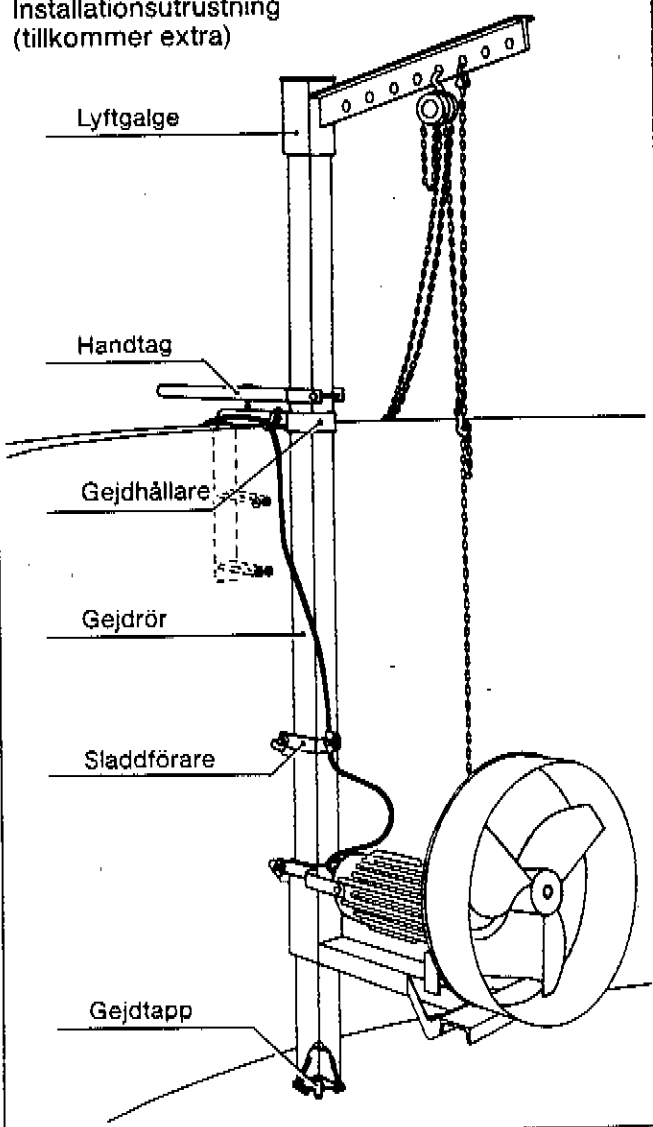
Material

		SIS
Gjutna delar:	Gjutjärn	14 01 20
(propeller, lagerhus, oljehus, statorhus)		
Propelleraxel:	Rostfritt stål	14 23 21
Stativ, skyddsring, lyftkätting:	Galvaniserat stål	14 13 11
Skravar, muttrar och brickor:	Rostfritt stål	14 23 32
Mekanisk axeltätning:	Hårdmetall/hårdmetall	

Mått i mm



Installationsutrustning (tillkommer extra)



Rätt till ändringar i utförande och specifikationer förbehålls.



SOLNA
 GÖTEBORG
 MALMÖ
 SUNDSVALL

SVETSARVÄGEN 7
 FRÖFÄSTEGATAN 4
 HÖGERUDSGATAN 21
 NORRA VÄGEN 36

BOX 1309, 171 25 SOLNA
 421 31 VÄSTRA FRÖLUNDA
 BOX 30050, 200 81 MALMÖ 30
 852 54 SUNDSVALL

TELEFON 08-98 00 80
 TELEFON 031-49 06 70
 TELEFON 040-15 80 20
 TELEFON 080-10 18 10

Figure 11. Emplacement possible de cinq générateurs de courants dans la retenue.

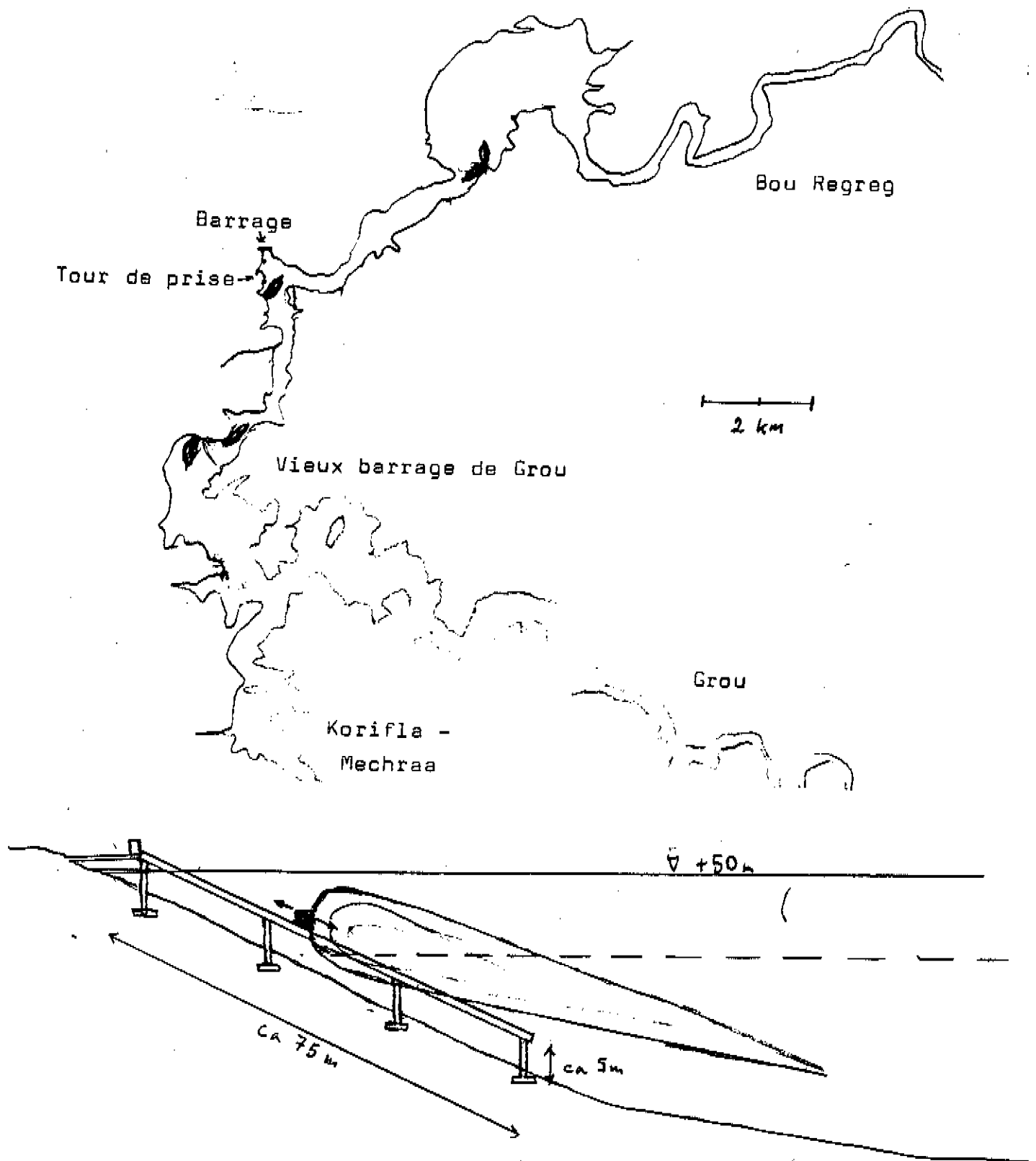
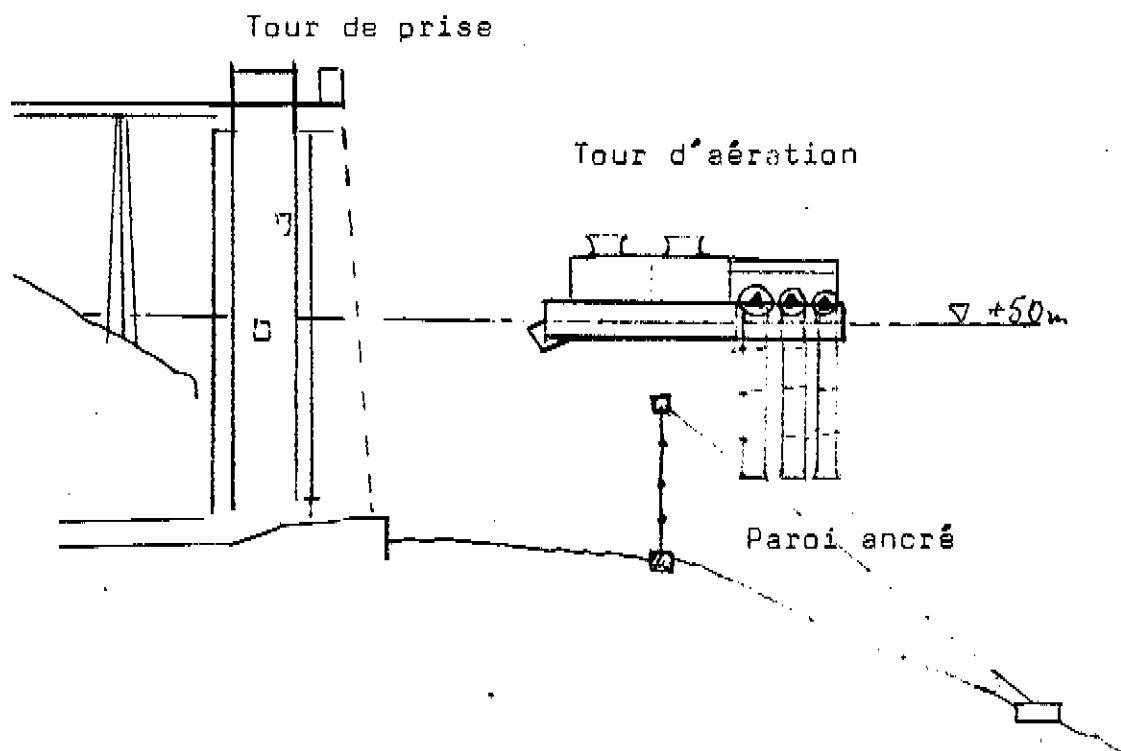
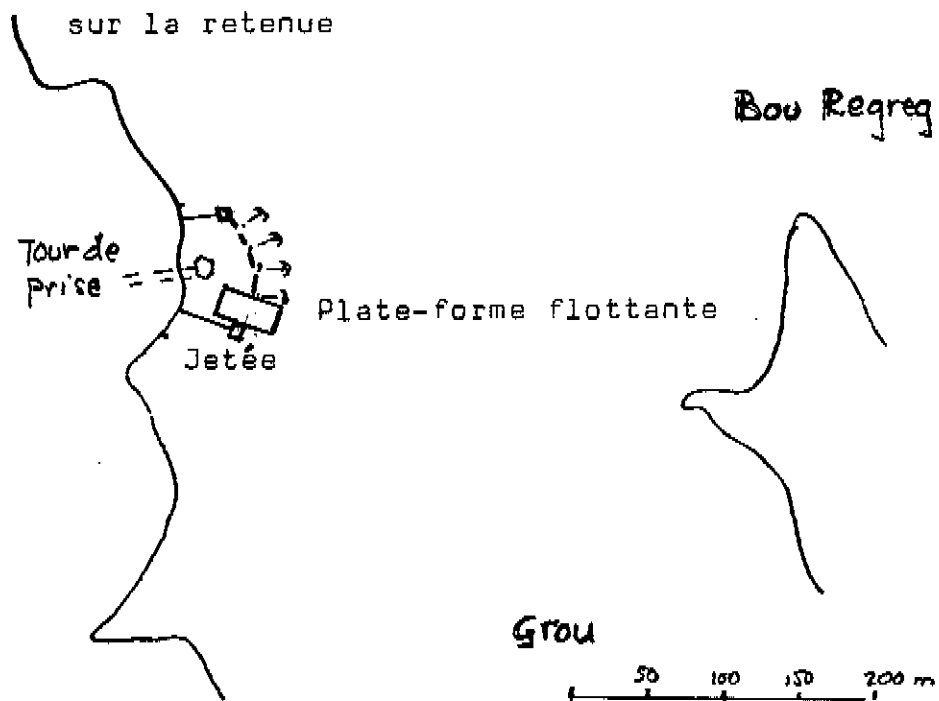


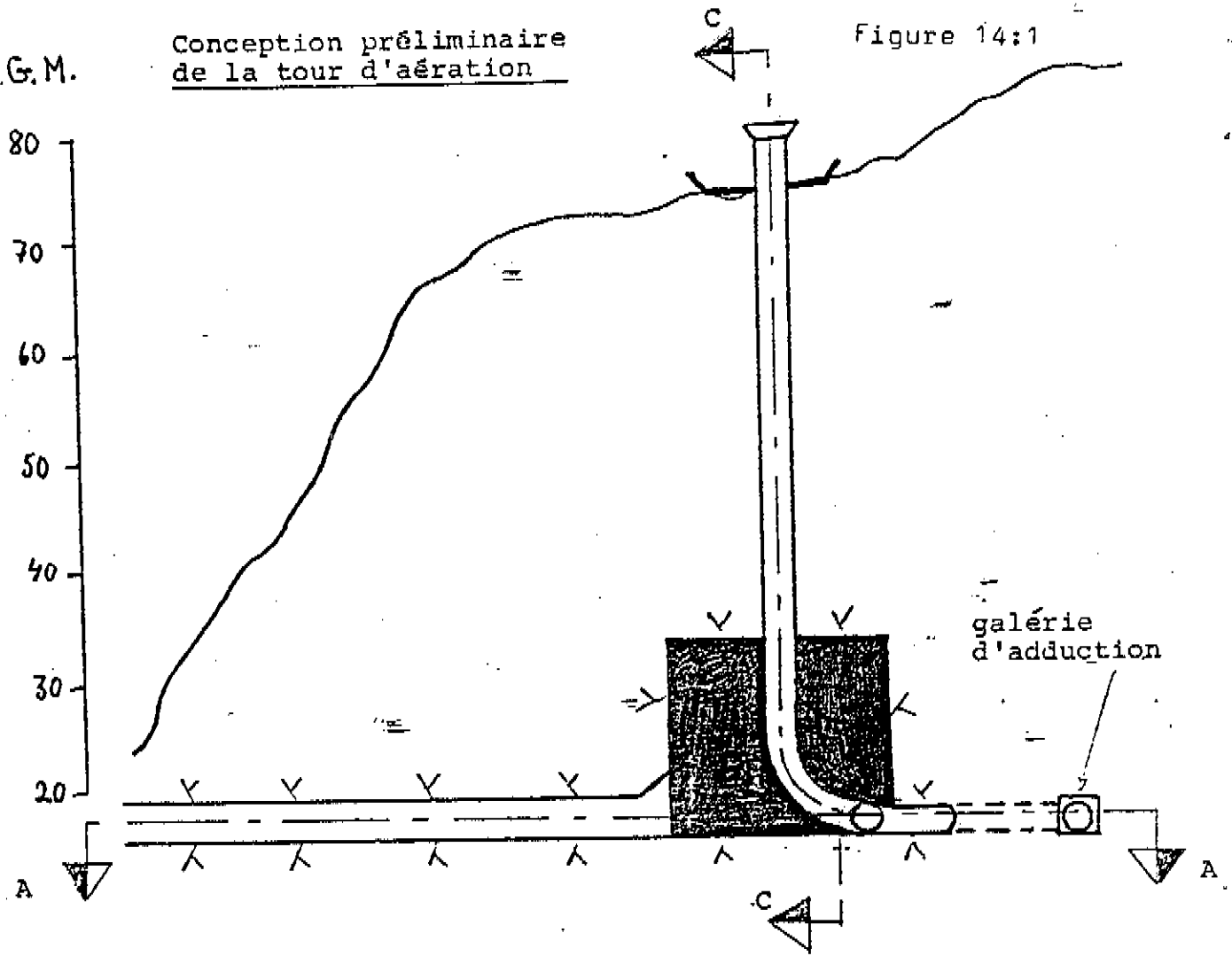
Figure 12. Tour d'aération flottante sur la retenue



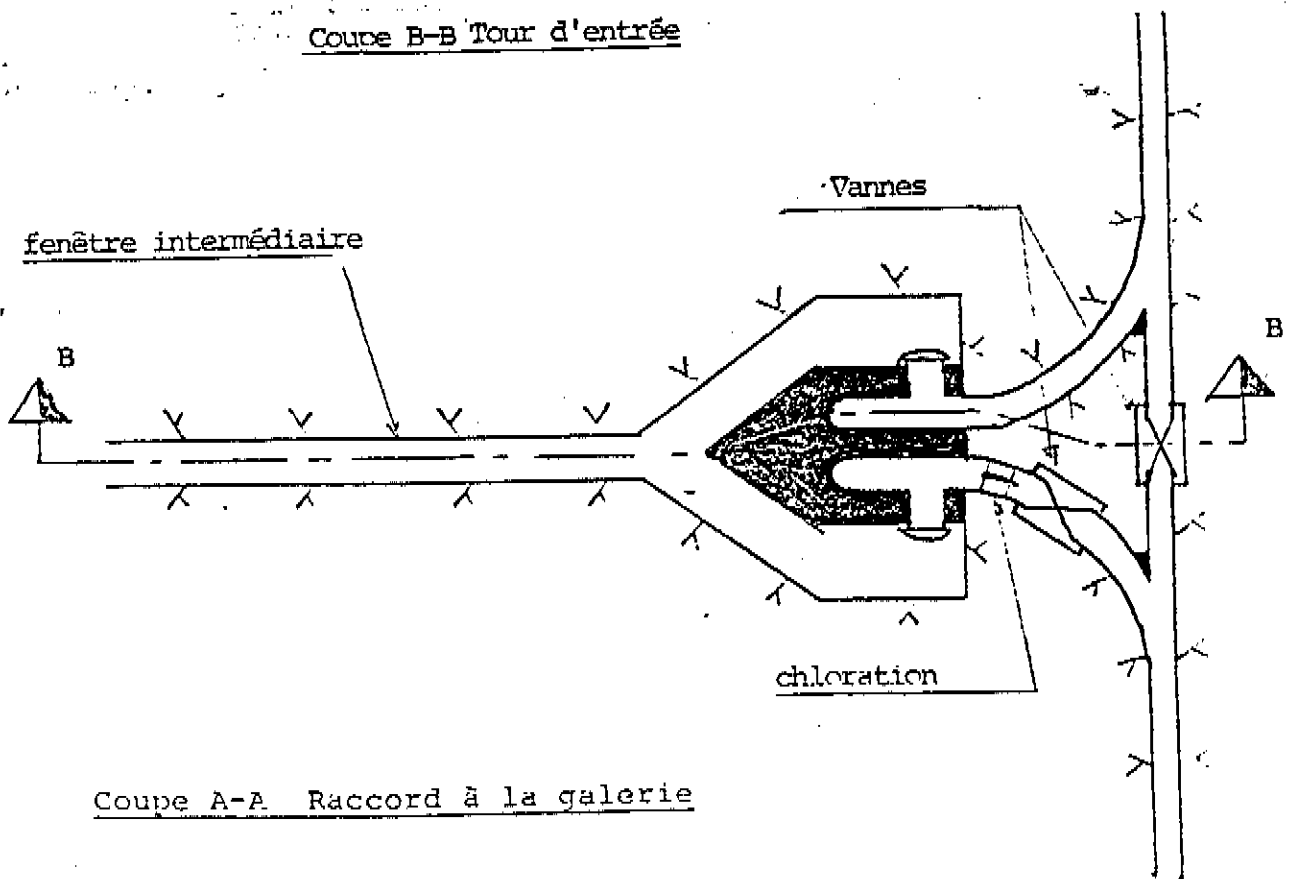
m N.G.M.

Conception préliminaire
de la tour d'aération

Figure 14:1

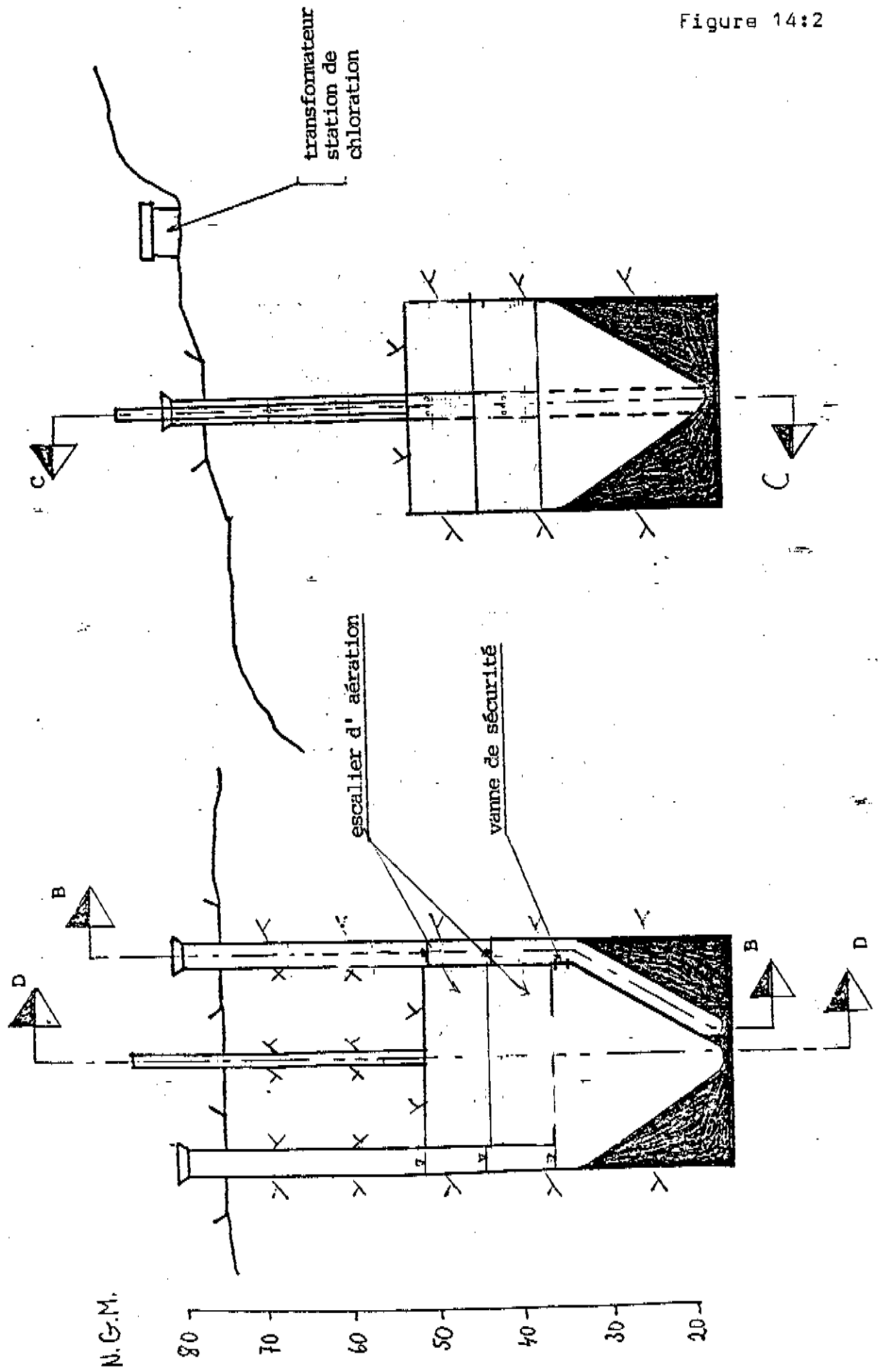


Coupe B-B Tour d'entrée



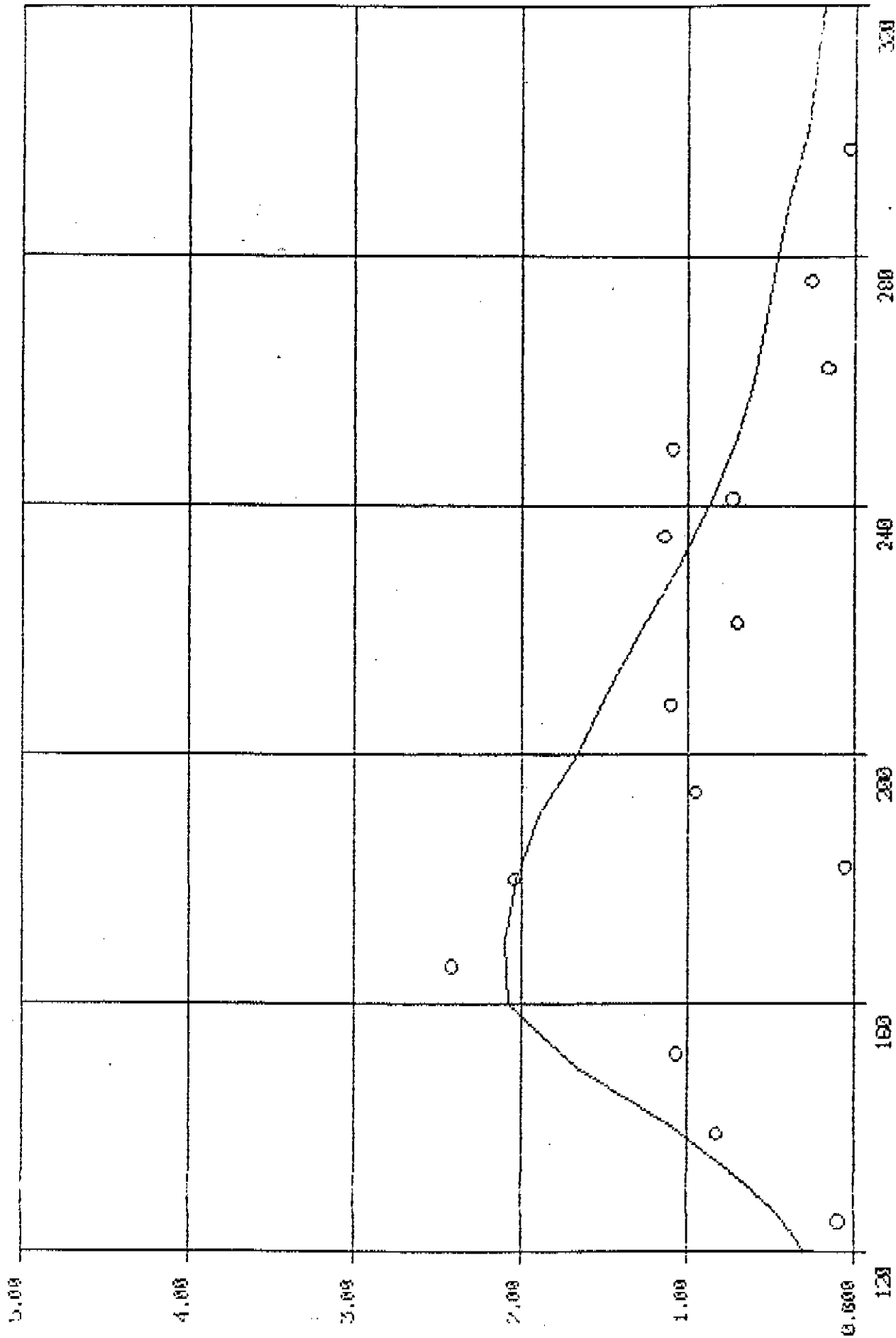
Coupe A-A Raccord à la galérie

Figure 14:2

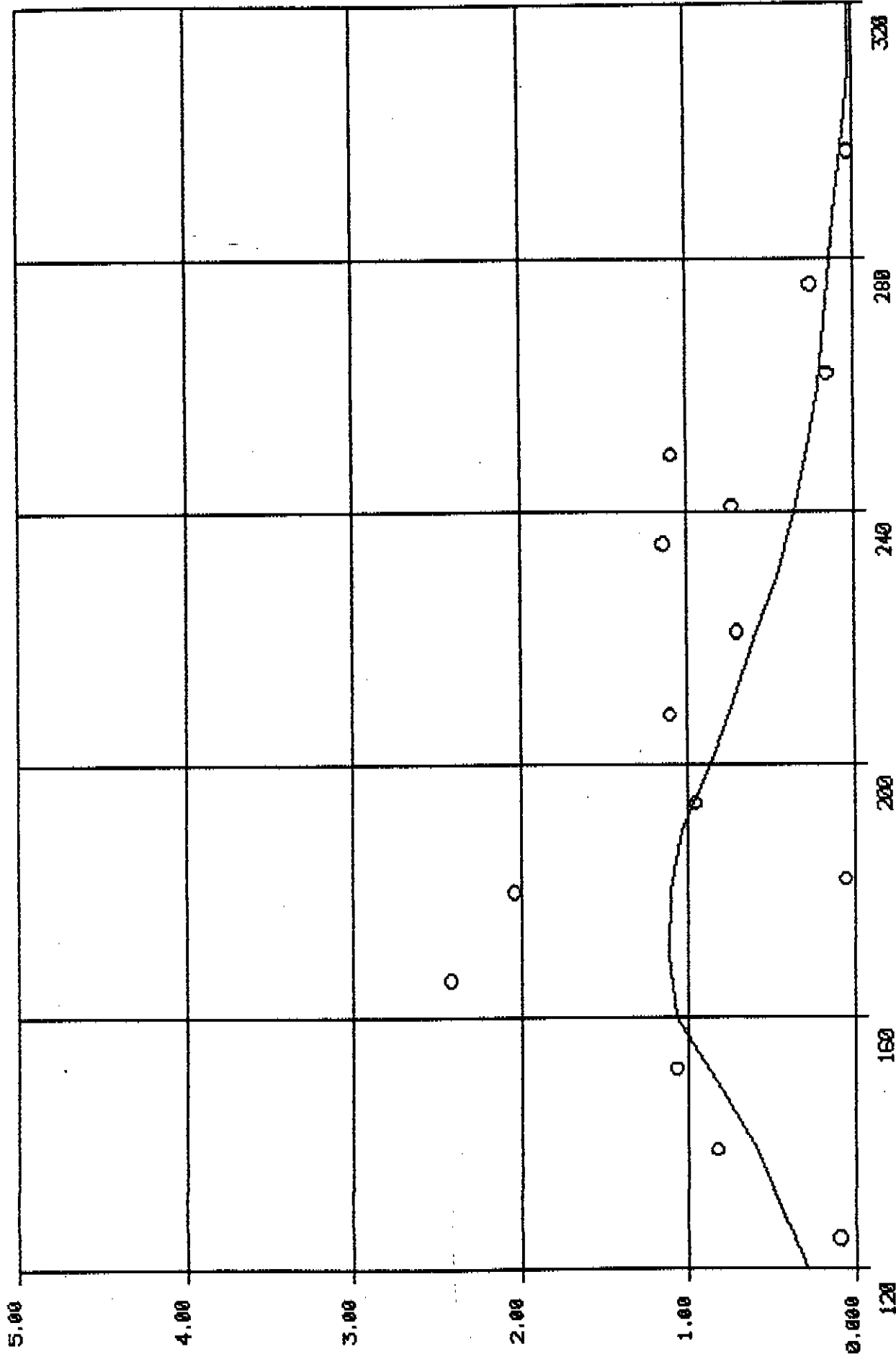


Coupe D-D Tour d'aération

Coupe C-C Tour d'aération

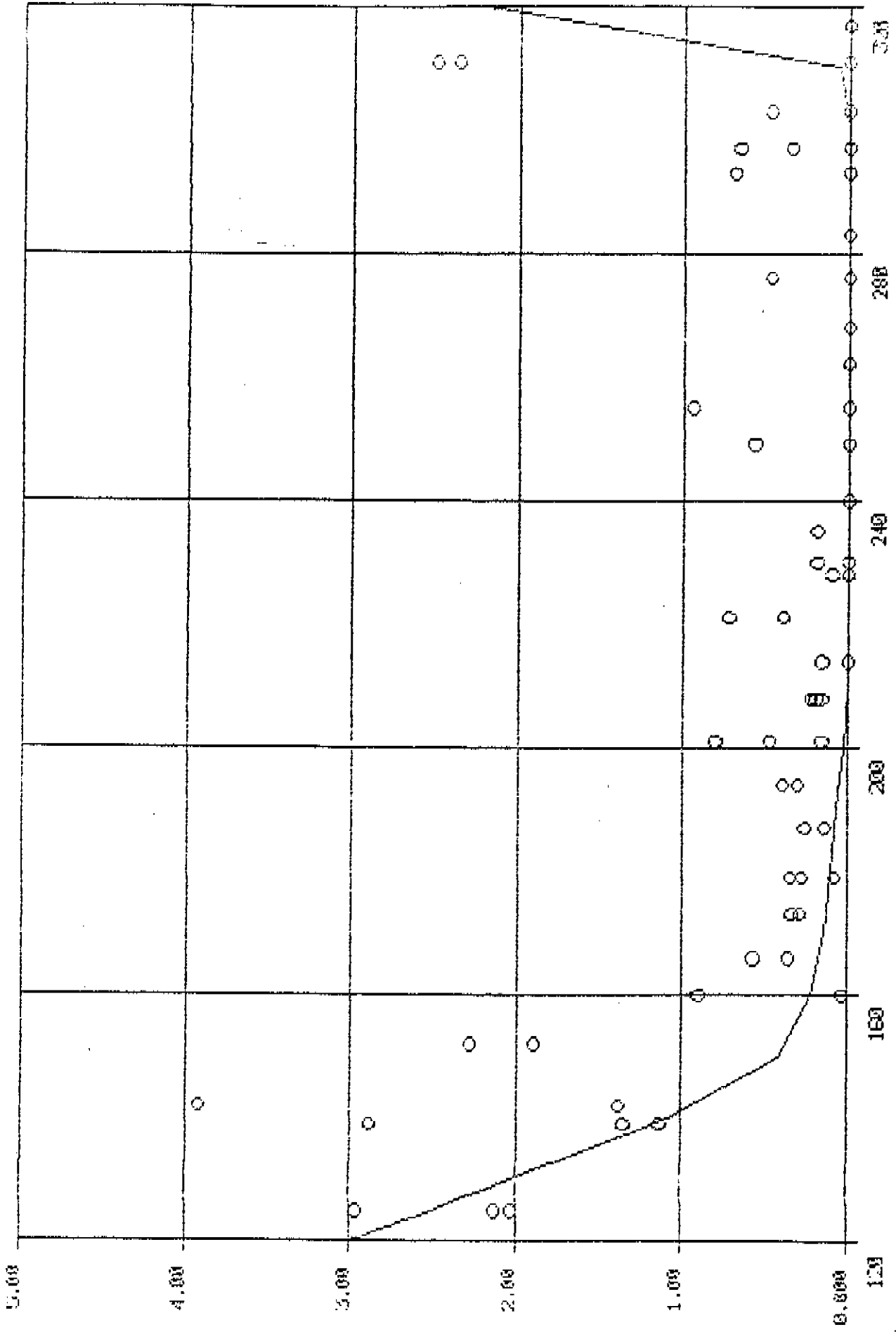


Annexe I. Simulation de l'évolution de la biomasse algale dans l'épéilimnion et de l'oxygène dissous dans l'hypolimnion après l'implantation de poissons algivores. Conditions: 500 tonnes de poissons ayant une efficacité de consommation journalière de 20 % de leur poids.



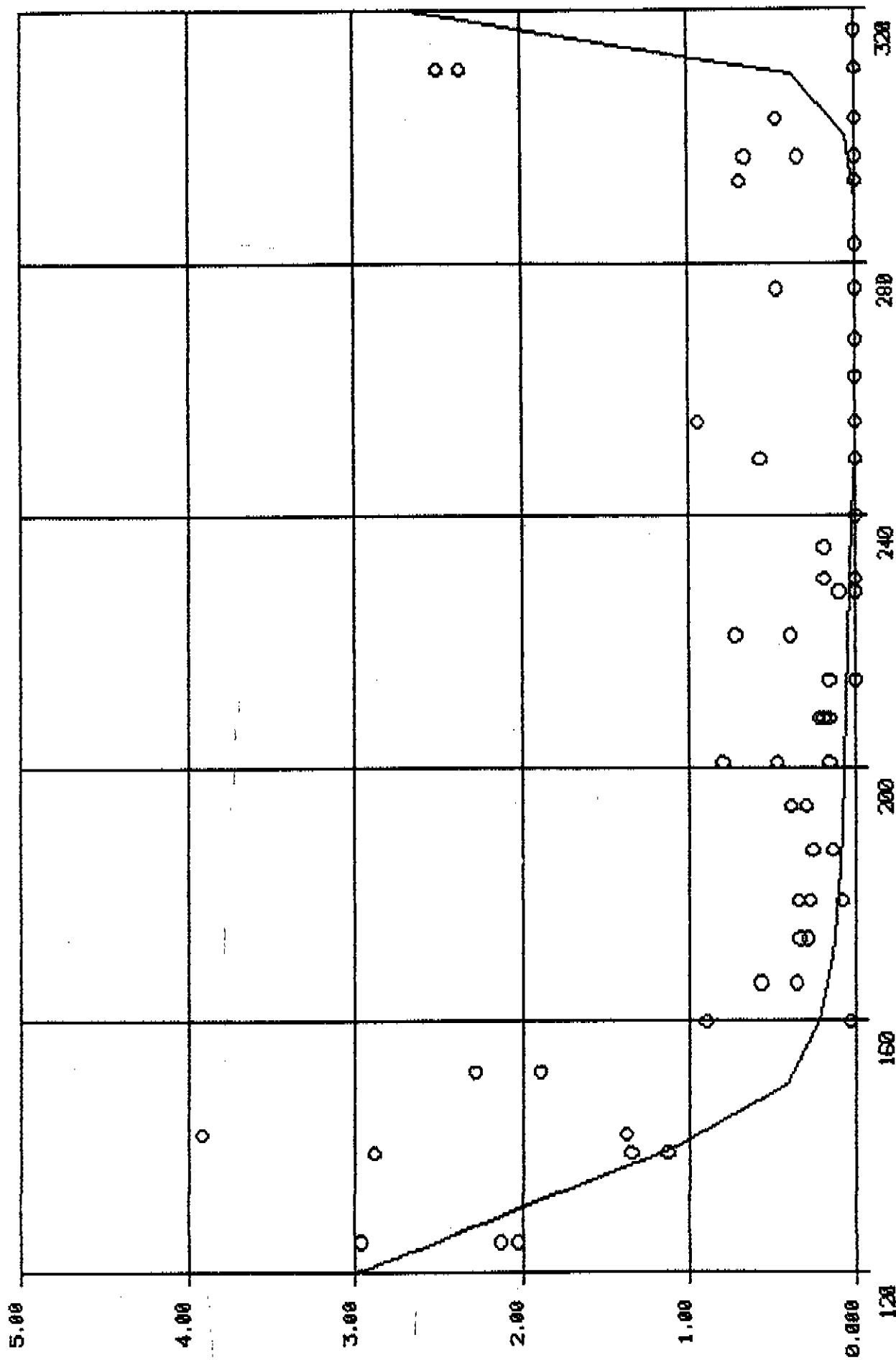
HEIGHT IN FEET

DAY



Annexe I - 3

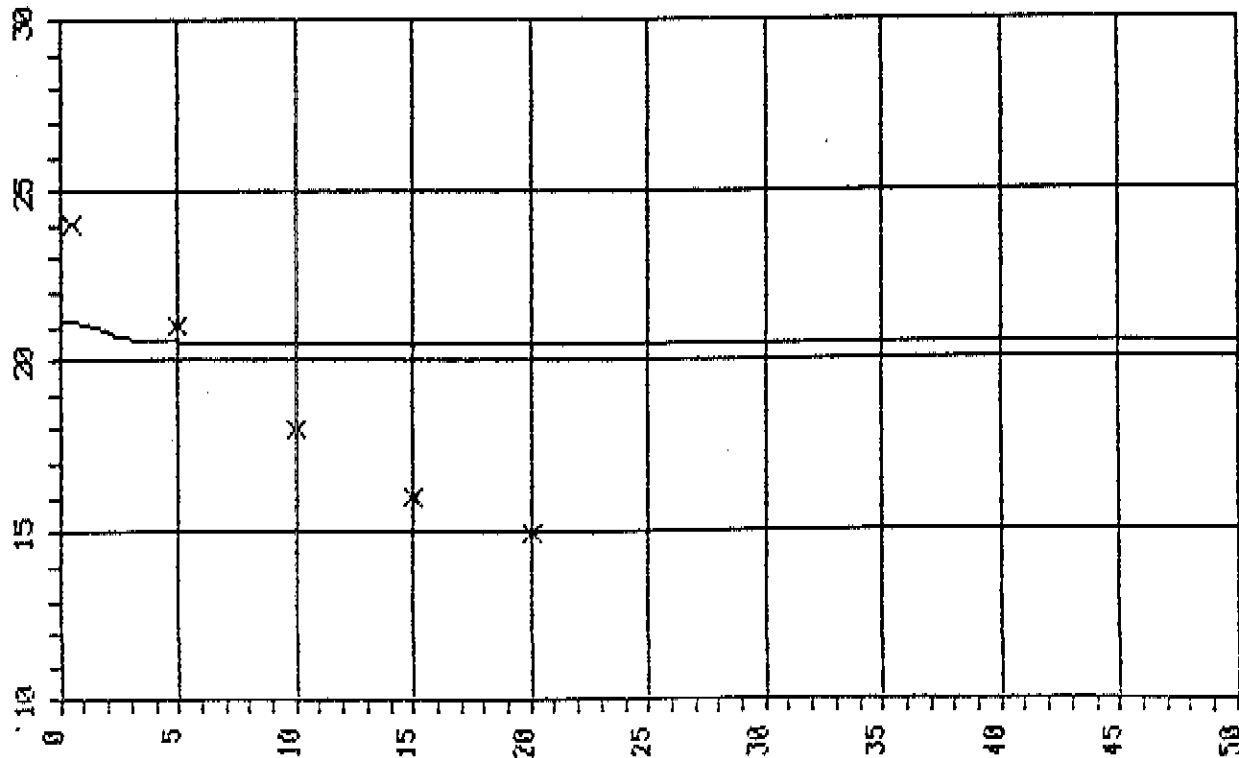
DPHY



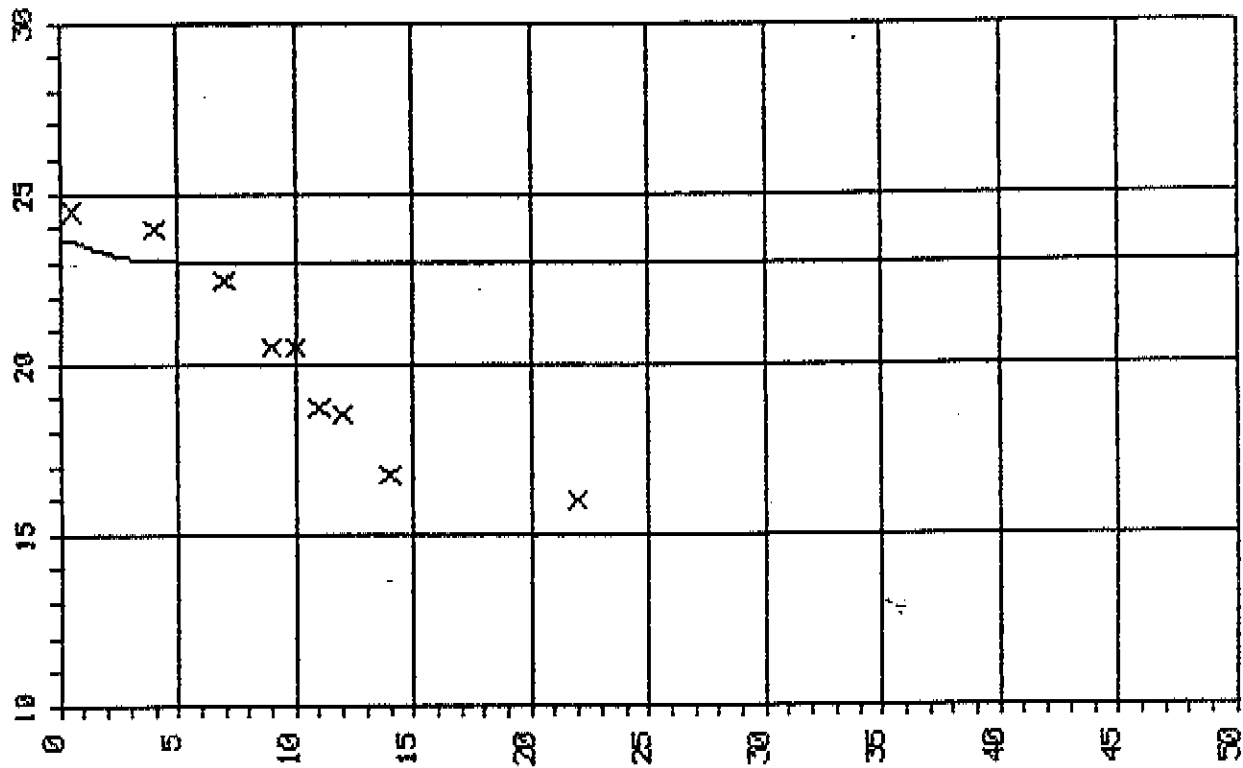
POSITION 2-4 SOUTHWEST

CD=0.200E-02, WIND=0.350E+01, AUV=0.200E-03

DAY NO 134 14 mai



DAY NO 164 13 juin

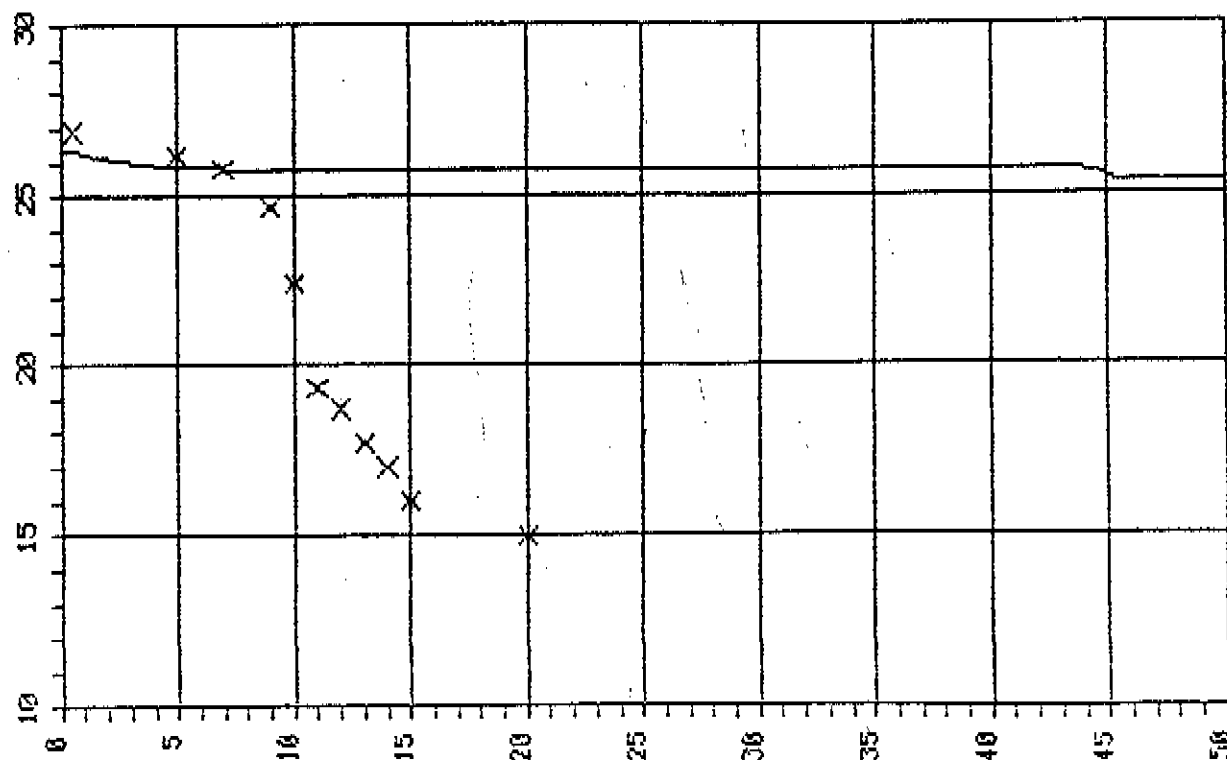


Annexe II. Simulation de l'évolution de la température dans l'eau au cours d'une circulation totale de la masse d'eau entre le 1er avril et fin novembre.

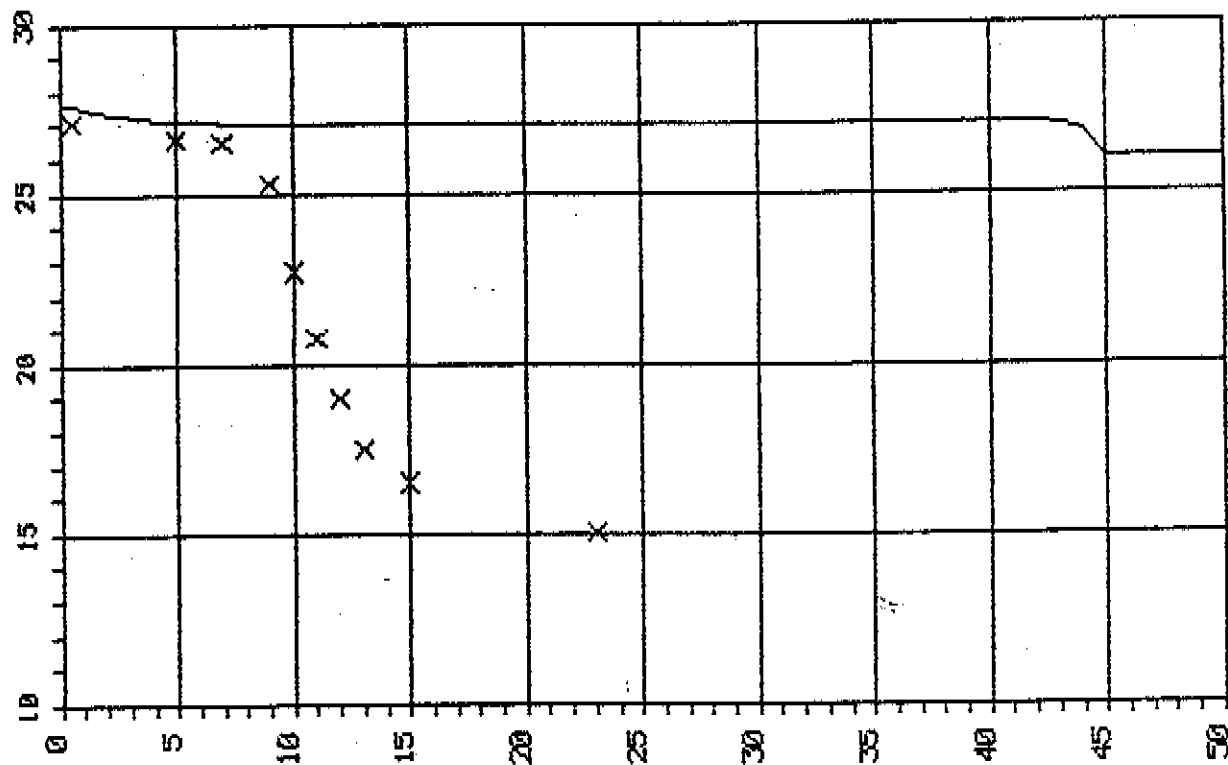
x = températures mesurées en 1979.

CD=0.200E-02, WIND=0.330E+01, AUV=0.200E-03

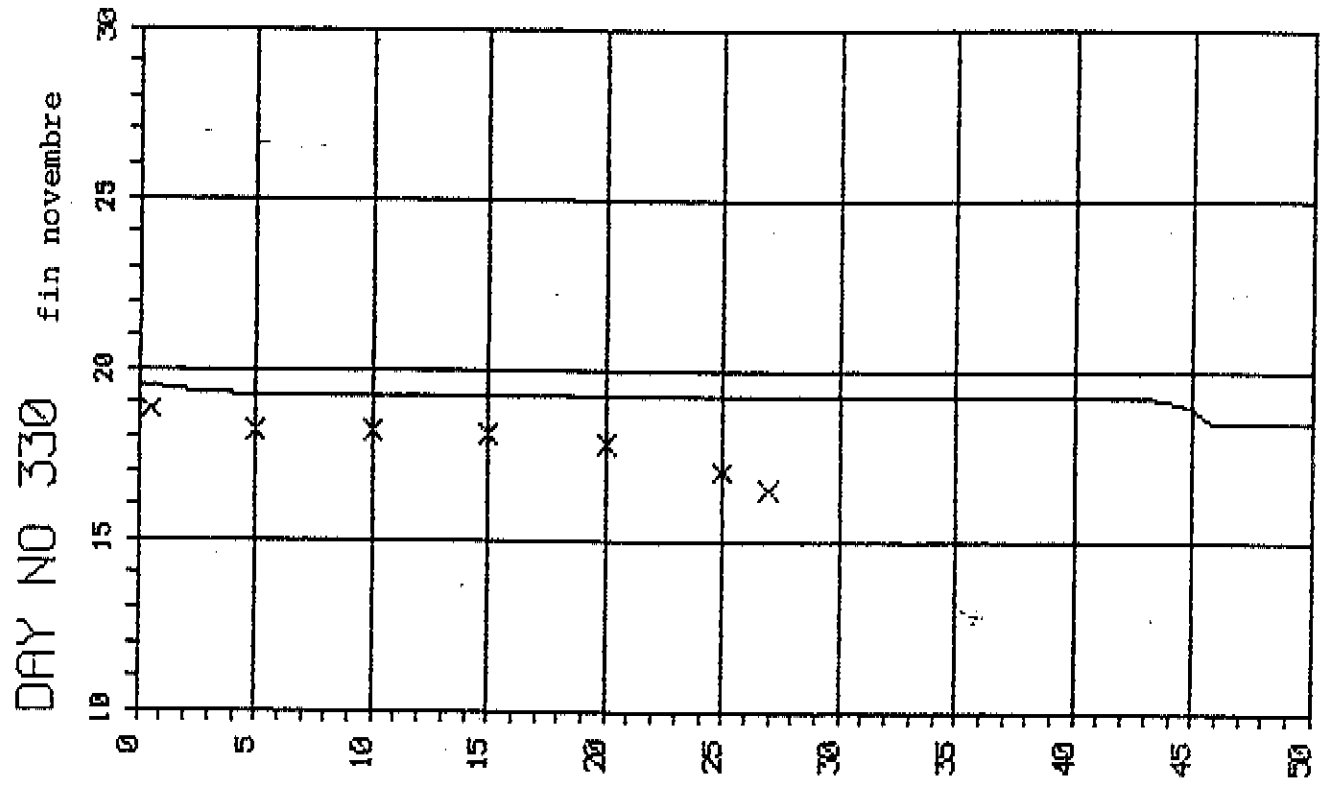
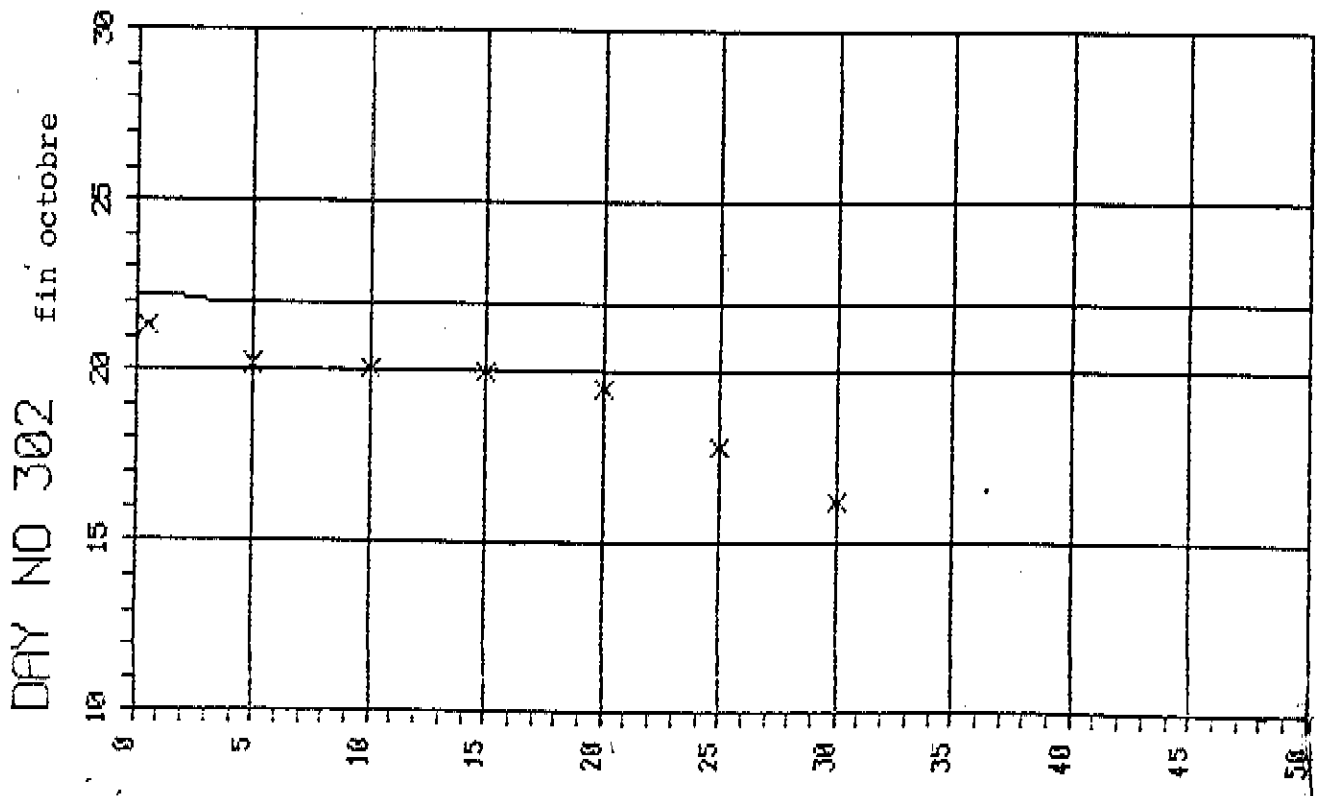
DAY NO 204 23 juillet

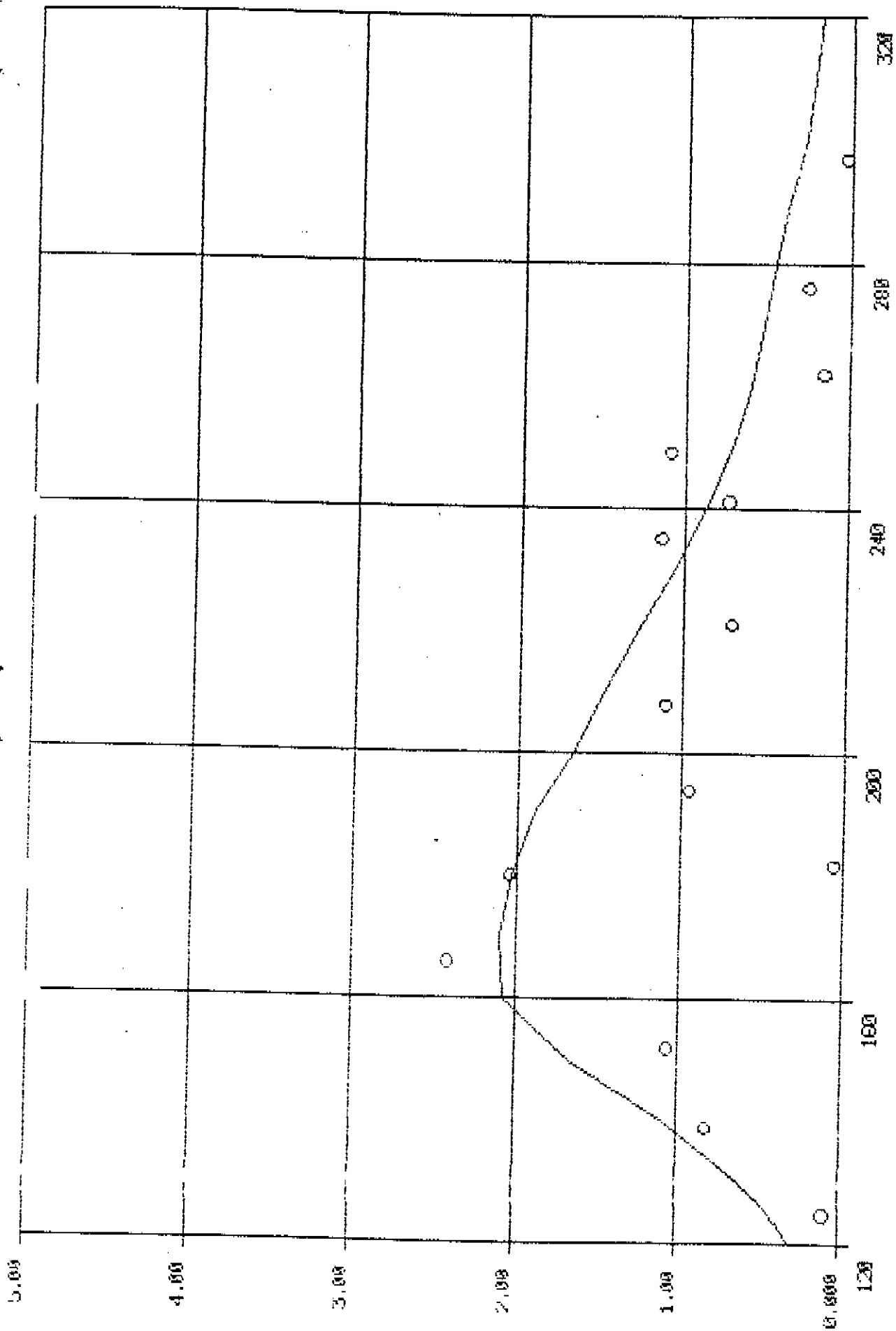


DAY NO 239 27 août

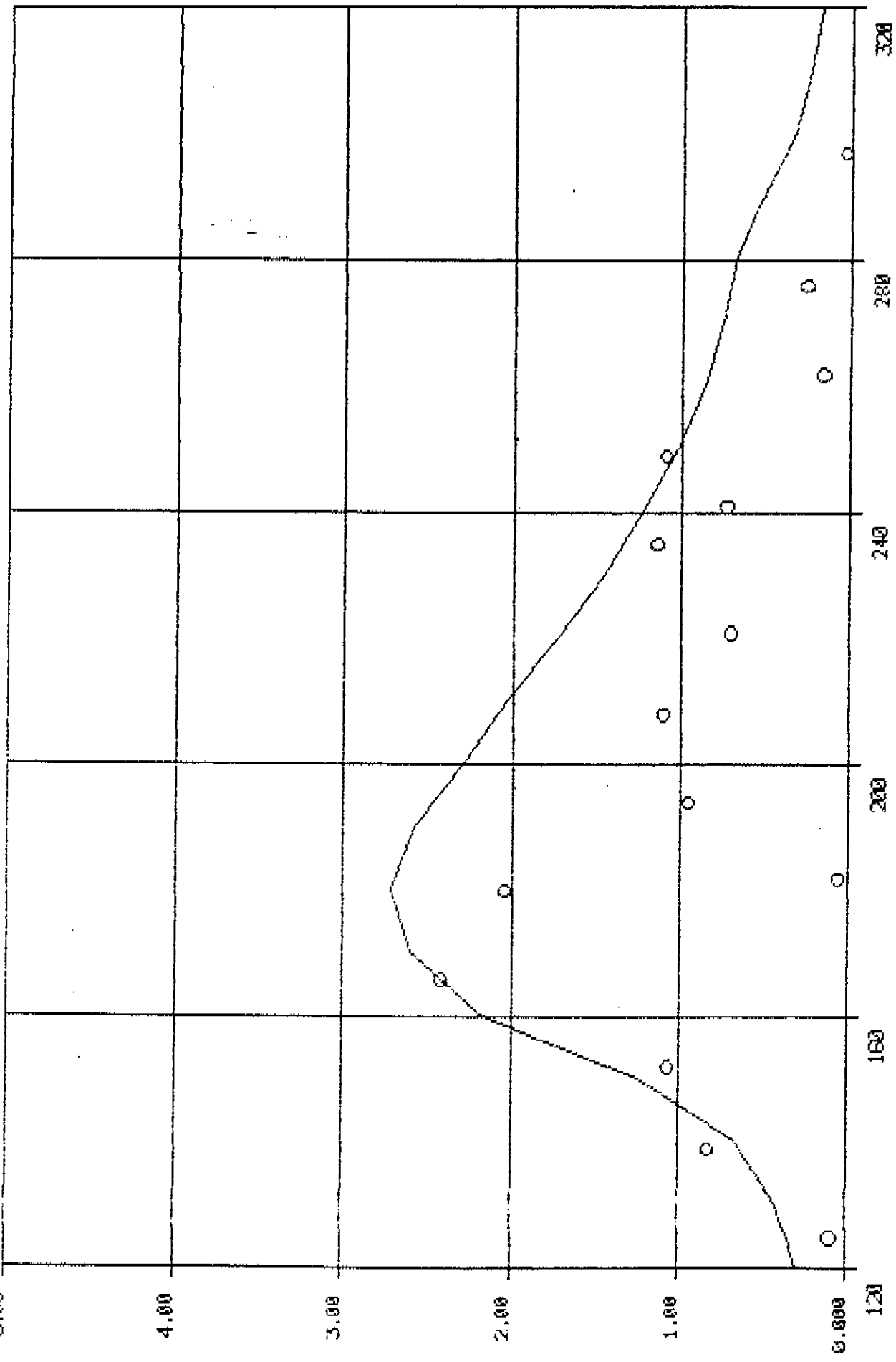


CD=0.200E-02, WIND=0.370E+01, AUV=0.200E-03



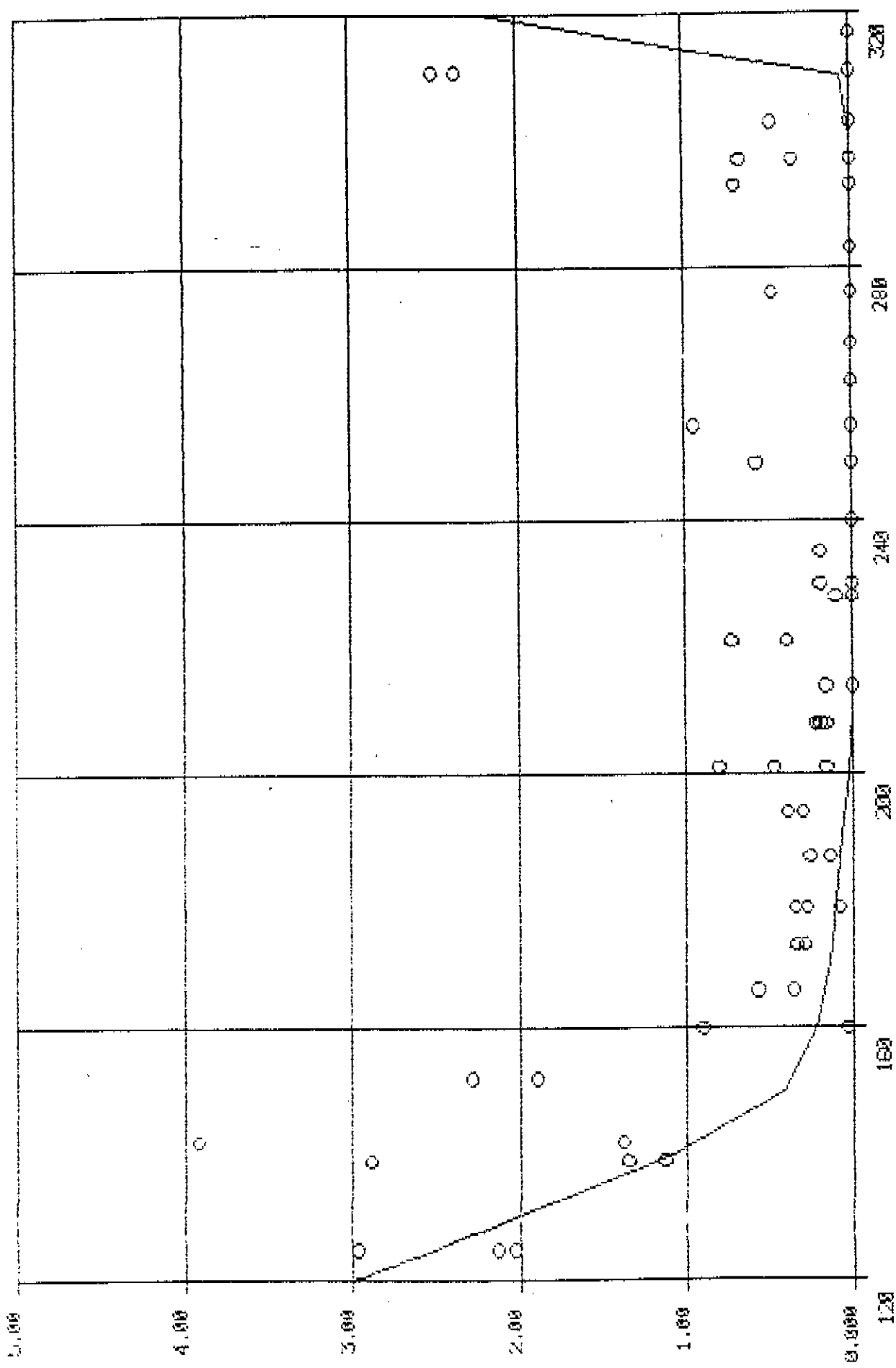


Annexe III. Simulation de l'évolution de la biomasse algale dans l'épilimnion et de l'oxygène dissous dans l'hypolimnion au cours d'une circulation totale entre le 1er mars et le 31 mai.
 o = valeurs mesurées en 1980.



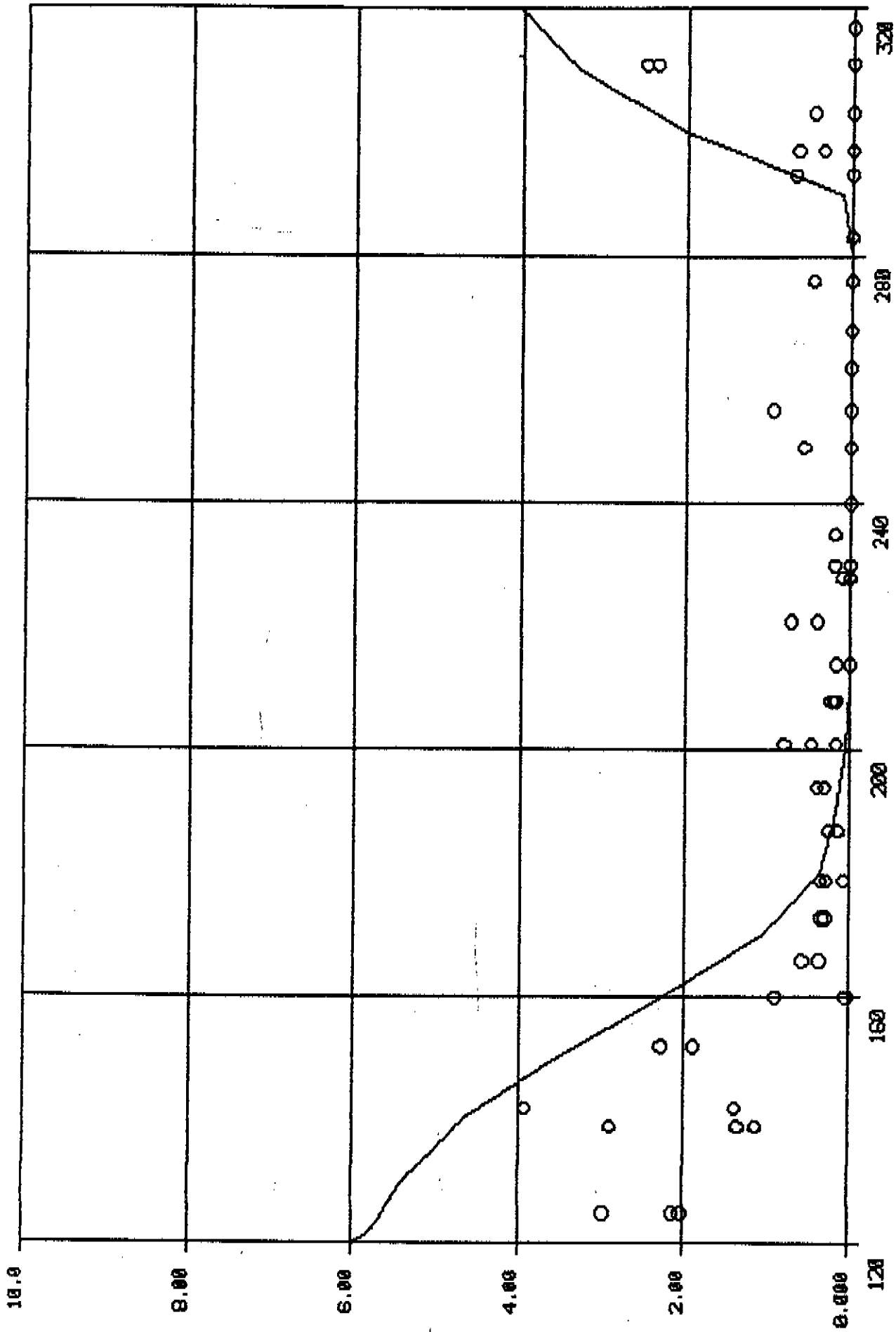
DAY

HEAVY METALS IN MPA SOCCLE



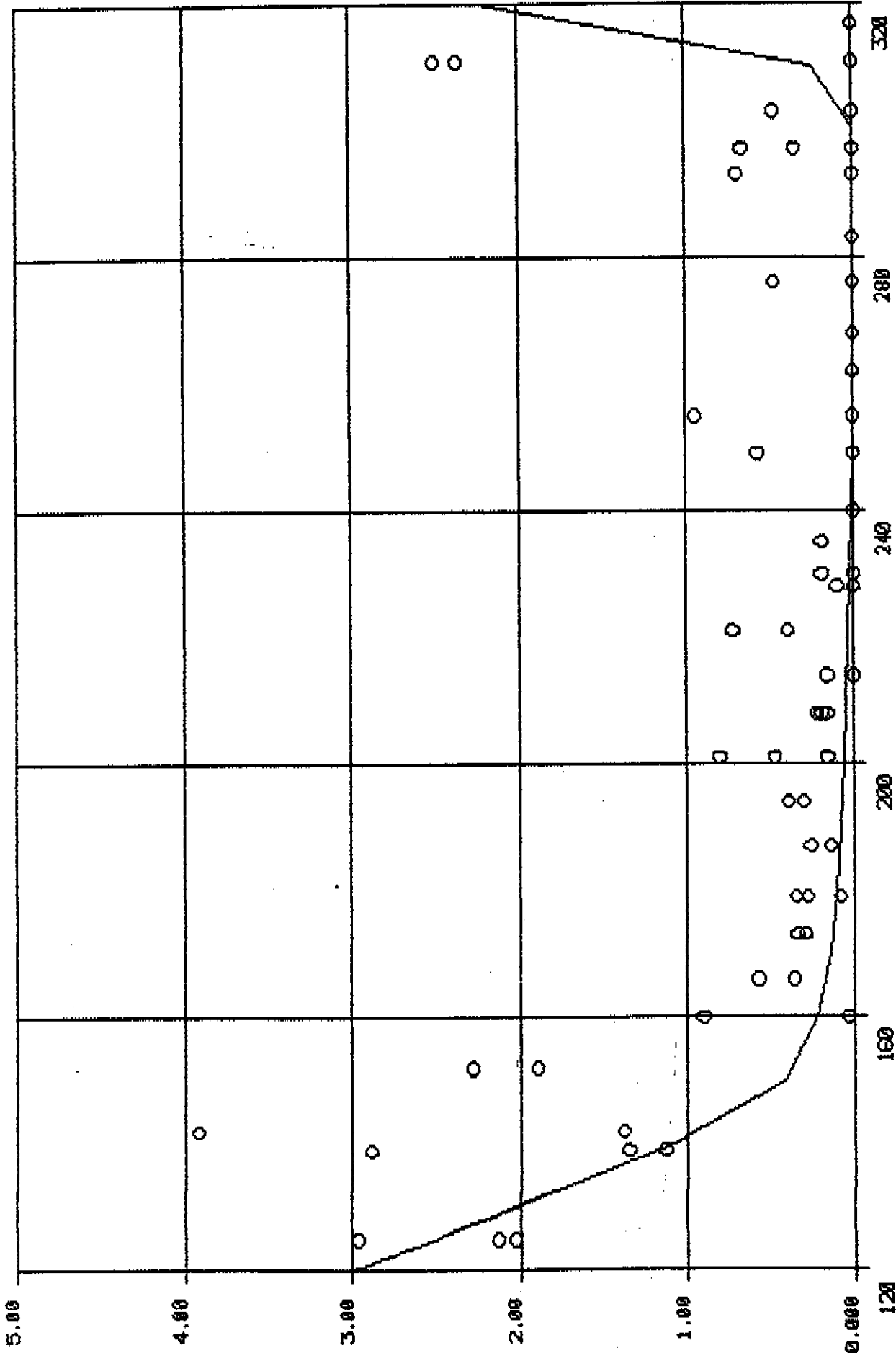
DAY

X-HZ OZ N-JA S006T-0-CXC



OXYGEN IN M-LA SOLUTION

DAY



OXYGÈNE DISSOUS EN MG/L

DAY

Annexe IV. Simulation de l'évolution de l'oxygène dissous dans l'hypolimnion après introduction de 500 tonnes de nitrates.
L'anaérobiose arrive le jour n:o 250 au lieu du jour n:o 210.