

**ESTIMATION DE LA DYNAMIQUE DU PHOSPHORE
A PARTIR DE LA RELATION
PHOSPHORE-OXYGENE EN ZONE PROFONDE**

PAR

GUY BARROIN

INSTITUT DE LIMNOLOGIE (I.N.R.A.) THONON-LES-BAINS

RESUME

Etudier la relation $[P] = f[O_2]$ au fond du lac plutôt que chacun des paramètres séparément permet d'attribuer à la météorologie la part qui lui revient dans l'évolution des concentrations en phosphore qui, par ailleurs, dépend de celle des apports en provenance du bassin-versant. La météorologie intervient de façon sensible, d'une part en termes de rigueur hivernale, d'autre part en termes de pluviosité estivale. La rigueur hivernale détermine l'intensité de la réoxygénation des eaux de fond, donc le relargage brut du phosphore. Quant à la pluviosité estivale, c'est d'elle que dépendent en grande partie les apports de particules capables de fixer le phosphore, donc d'abattre la charge interne brute pour donner la charge interne nette, celle que l'on observe. A l'inverse des années 1981 et 1984 exceptionnelles par un faible abattement de la charge brute, l'année 1987 a été caractérisée par un abattement particulièrement élevé, sans doute en relation avec de fortes crues estivales. Bien que la réoxygénation ait été médiocre, inférieure à 6 mg/l, aussi bien en 1988 qu'en 1989, et que ces deux années n'aient pas bénéficié d'apports exceptionnels en particules fixatrices, elles manifestent un état trophique inférieur à celles de la décennie précédente, se rapprochant en cela des années 1973, 1974, 1975. Reste à savoir si une succession d'hivers doux ne conduirait pas à une situation identique à celle de 1978, année record en termes de charge interne.

1. INTRODUCTION

Au cours de la stagnation estivale, dans des lacs profonds comme le Léman, les eaux qui se trouvent au contact des sédiments les plus profonds voient augmenter leur concentration en phosphore dissous (orthophosphates) alors que celle de l'oxygène dissous y diminue. Etudier le phosphore tout seul ne permet pas, dans l'évolution des concentrations, de distinguer ce qui appartient aux apports de ce qui est dû à la météorologie et laisse toute facilité d'attribuer les améliorations à la maîtrise des apports et les détériorations à la trahison de la météorologie. A moins que ce ne soit le contraire, tout dépend du point de vue de l'expert. En étudiant la relation phosphore-oxygène on attribue à la météorologie la part qui lui revient : non seulement pour sa rigueur hivernale qui conditionne la réoxygénation, donc l'intensité de la charge interne brute mais aussi pour sa pluviosité estivale qui induit un flux de particules d'érosion capables de fixer le phosphore, donc de diminuer l'intensité de la charge brute pour donner la charge nette, celle qu'on observe.

Cette relation phosphore-oxygène a pour analogue algébrique une fonction puissance dont l'équation diffère d'un lac à l'autre et, pour un même lac, d'une année à l'autre selon son état trophique et le pouvoir de sédimentation qu'il exerce sur le phosphore. Mis au point sur les lacs de Sylans, de Nantua, d'Annecy et du Bourget (BARROIN, 1986) ce moyen synthétique de mettre en évidence la dynamique du phosphore d'un lac a été appliqué au Léman pour les années 1970 à 1986 (BARROIN, 1988). Après avoir rappelé l'essentiel de la méthode et de ses résultats, il est proposé de l'appliquer au Léman pour les années 1987-1988-1989 et d'interpréter l'évolution du lac dans cette perspective. Les données utilisées étant très exactement celles fournies par les campagnes CIPEL, le détail de l'échantillonnage et de l'analyse figure dans les chapitres traitant de l'"Evolution physico-chimique des eaux du Léman".

2. METHODE

Les échantillons sont prélevés à station SHL 2 à environ 309 m de profondeur, à un mètre au-dessus du sédiment. Sur chaque échantillon sont dosés :

- les orthophosphates : concentration notée [P] exprimée en microgrammes par litre ($\mu\text{g P/l}$)
- l'oxygène dissous : concentration notée $[\text{O}_2]$ exprimée en milligrammes par litre (mg/l)

A chaque échantillon correspond un couple de valeurs ($[\text{P}]; [\text{O}_2]$) et chaque année regroupe un nombre de couples égal au nombre d'échantillons prélevés soit 21 pour chacune des années 1987, 1988, 1989. Pour chaque année la relation $[\text{P}] = f([\text{O}_2])$ est mise sous la forme $y = a \cdot x^b$ où $y = [\text{P}]$ et $x = [\text{O}_2]$ et fait l'objet de deux types d'interprétation :

- une interprétation géométrique qui porte sur les courbes d'équation $[\text{P}] = a \cdot [\text{O}_2]^b$ dans l'espace orthonormé pour les concentrations observées ($0 < [\text{P}] < 280 \mu\text{g P/l}$; $0 < [\text{O}_2] < 12 \text{ mg/l}$). Chaque courbe est limitée arbitrairement à une extrémité par la valeur maximale d'oxygène $[\text{O}_2]_{\text{max}}$ et la valeur de phosphore correspondant $[\text{P}] = a \cdot [\text{O}_2]_{\text{max}}^b$; à l'autre extrémité par la valeur maximale de phosphore $[\text{P}]_{\text{max}}$ et la valeur correspondante d'oxygène $[\text{O}_2] = ([\text{P}]_{\text{max}}/a)^{1/b}$. Cette interprétation met en oeuvre les éléments caractéristiques de la courbe théorique de la figure 1, éléments dont la signification est donnée par le tableau 1.
- une interprétation analytique qui porte sur les points de coordonnées (a; b) dans l'espace orthonormé ($0 < a < 600$; $0 < b < 1$). (a) représente l'état trophique déterminé par la fertilité potentielle résultant de la charge externe et de la charge interne. (a) est une fonction croissante de l'état trophique. (b) représente le pouvoir de sédimentation exercé sur le phosphore par les particules fixatrices, notamment celles amenées par les pluies d'été. (b) est une fonction décroissante du pouvoir de sédimentation.

ELEMENT	SIGNIFICATION	EN RELATION AVEC
X_A	Maximum d'oxygène observé (# valeur vraie)	-efficacité de la destratification -(fréquence des observations)
Y_A	Minimum de phosphore calculé d'après X_A Equivalent à une fertilité de base	-apports en phosphore -pertes en phosphore à l'exutoire et par sédimentation - X_A
AE	Droite de Redfield	-équation de minéralisation théorique
α	Relargage net du phosphore en début de stagnation	-efficacité du piégeage du phosphore -efficacité de la destratification
$Y_E - Y_A$	Phosphore minéralisé pour X_A d'oxygène consommé	- X_A
Y_D	Maximum de phosphore observé (<valeur réelle)	-fréquence des observations -intensité de la stratification -teneur en fer des particules sédimentaires
$Y_D - Y_E$	Minimum net de phosphore relargué en conditions anaérobies	- X_A - Y_D
$Y_D - Y_E > 0$ $Y_D - Y_E < 0$	Relargage de phosphore Piégeage de phosphore	

TABLEAU 1 : Signification des éléments caractéristiques de la courbe $[\text{P}] = a[\text{O}_2]^b$

3. RESULTATS

PERIODE 1970-1986 (RAPPELS)

Interprétation géométrique :

Deux familles de courbes se dessinent, l'une pour 1970-1978, l'autre pour 1979-1986.

La première famille (figure 2) débute à la suite des hivers 1970-1971 particulièrement rigoureux, qui ont engendré des circulations totales, voire brutales pour l'hiver 1971. Les cinq hivers qui suivent ont été plus doux, particulièrement en 1972 où la circulation semble ne pas avoir dépassé 50 m de profondeur, ce qui se traduit par une augmentation de l'ensemble des ordonnées d'environ 30 $\mu\text{g P/l}$ de phosphore. La désoxygénation va en s'accroissant d'année en année pour atteindre son paroxysme en 1978 où la quasi disparition de l'oxygène en fin de stagnation fait monter le phosphore à presque 300 $\mu\text{g P/l}$.

A partir de 1980 les hivers sont plus rigoureux, notamment en 1981 où la concentration en oxygène est portée à plus de 10 mg/l à la suite d'une circulation particulièrement efficace. Simultanément le phosphore est dispersé dans l'ensemble de la masse d'eau, ce qui a pour effet certes d'en réduire les concentrations hypolimniques mais malheureusement pas au point que la nouvelle famille de courbes recouvre celle des années 70 (figure 3) : elle en diffère d'environ + 50 $\mu\text{g P/l}$, ce qui, en supposant l'homogénéisation parfaite et le volume du lac égal à 89 km^3 , correspond à une recharge nette proche de 4'000 tonnes. De 1981 à 1986, sans être très violents, les hivers sont suffisamment rigoureux pour éviter une désoxygénation équivalente à celle de 1978. En 1986 la réoxygénation frôle même les 11 mg/l d'oxygène. Au cours de cette période faste, les concentrations en phosphore diminuent régulièrement d'environ 25 $\mu\text{g P/l}$ au total, ce qui place quand même 1986 encore à 20 $\mu\text{g P/l}$ au-dessus de 1970. Pour BLANC et al. (1987), "il ne fait aucun doute que ces diminutions sont en relation avec les mesures d'assainissement prises jusqu'à maintenant, notamment la déphosphatation des eaux usées dans les stations d'épuration". Certes, mais il ne faut pas oublier que le contexte météorologique est favorable : les hivers sont suffisamment rigoureux pour régénérer un stock d'oxygène qui tient jusqu'en fin de stagnation. Il ne faut pas non plus négliger l'action de la sédimentation dont le pouvoir est loin d'être saturé comme en témoigne la valeur relativement faible de (α) malgré une valeur relativement élevée de (Y_A) , proche de 80 $\mu\text{g/l}$ de phosphore.

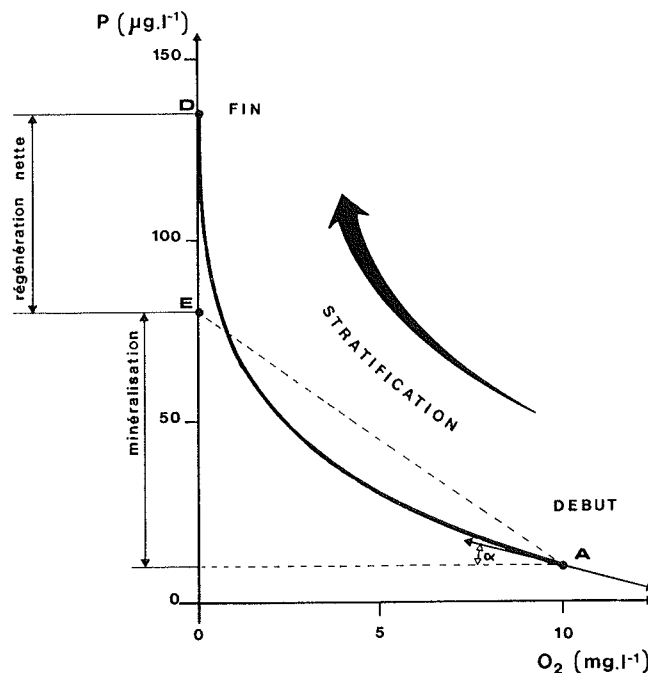


Figure 1 : Courbe théorique $[P] = a[O_2]^b$

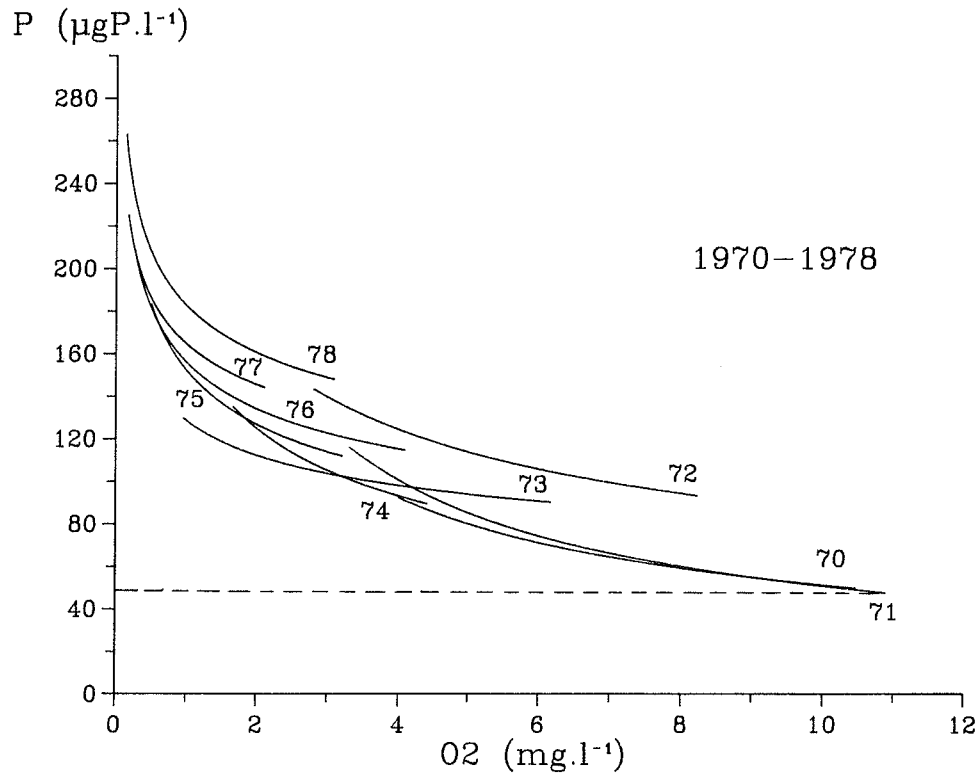


Figure 2 : Evolution de la courbe $[P] = a[O_2]^b$ de 1970 à 1978

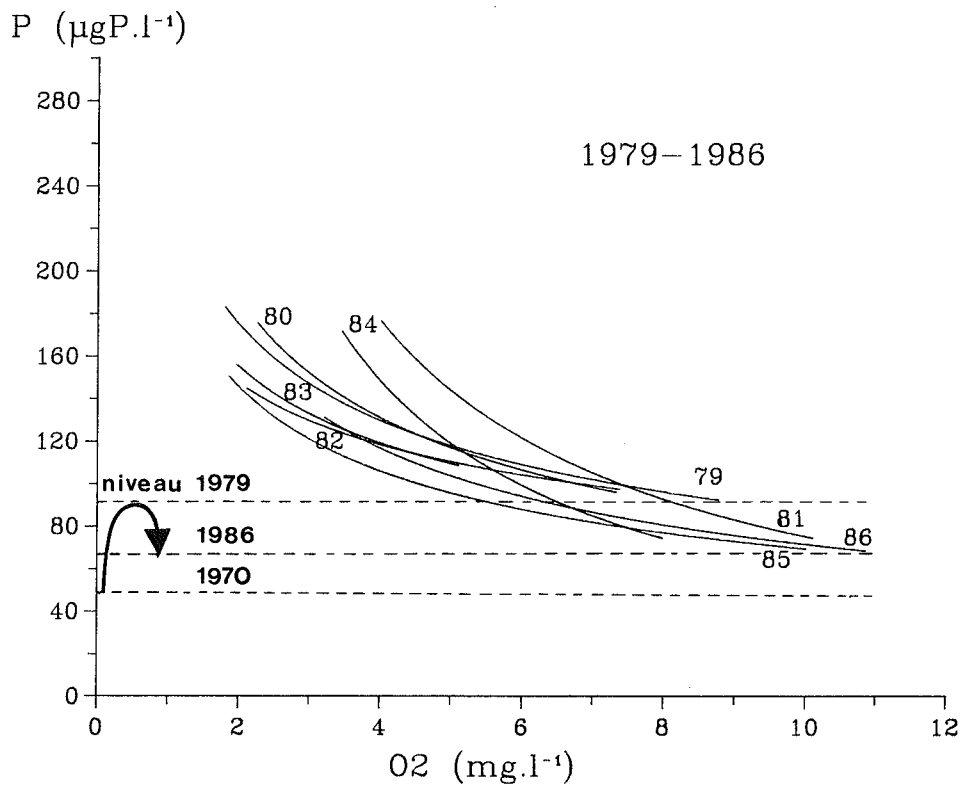


Figure 3 : Evolution de la courbe $[P] = a[O_2]^b$ de 1979 à 1986

Interprétation analytique :

L'ensemble des points reste groupé dans des limites assez serrées, à l'exception des années 1981 et 1984 (figure 4). Les valeurs de (a) comprises entre 100 et 300 témoignent d'un état trophique moyen. Quant aux valeurs de (b) comprises entre 0.1 et 0.8 elles témoignent d'un pouvoir de déphosphatation élevé. Les poussées d'eutrophie des années 1981 et 1984 résultent d'une moins bonne fixation aérobie du phosphore à mettre en relation soit à un excès de phosphore, soit à un défaut de matériaux fixateurs, soit aux deux. Au point SHL 2 les matériaux fixateurs sont essentiellement apportés par le Rhône. Si l'on se réfère au phosphore particulaire pour estimer ces apports (ORAND, 1986 et ORAND et COLON, 1987), on constate qu'effectivement 1981 et surtout 1984 sont des années remarquables : en 1984 les apports sont inférieurs de 30 % à ceux des années voisines, et en 1981 non seulement les apports sont relativement faibles mais le phosphore est relativement élevé (figure 3).

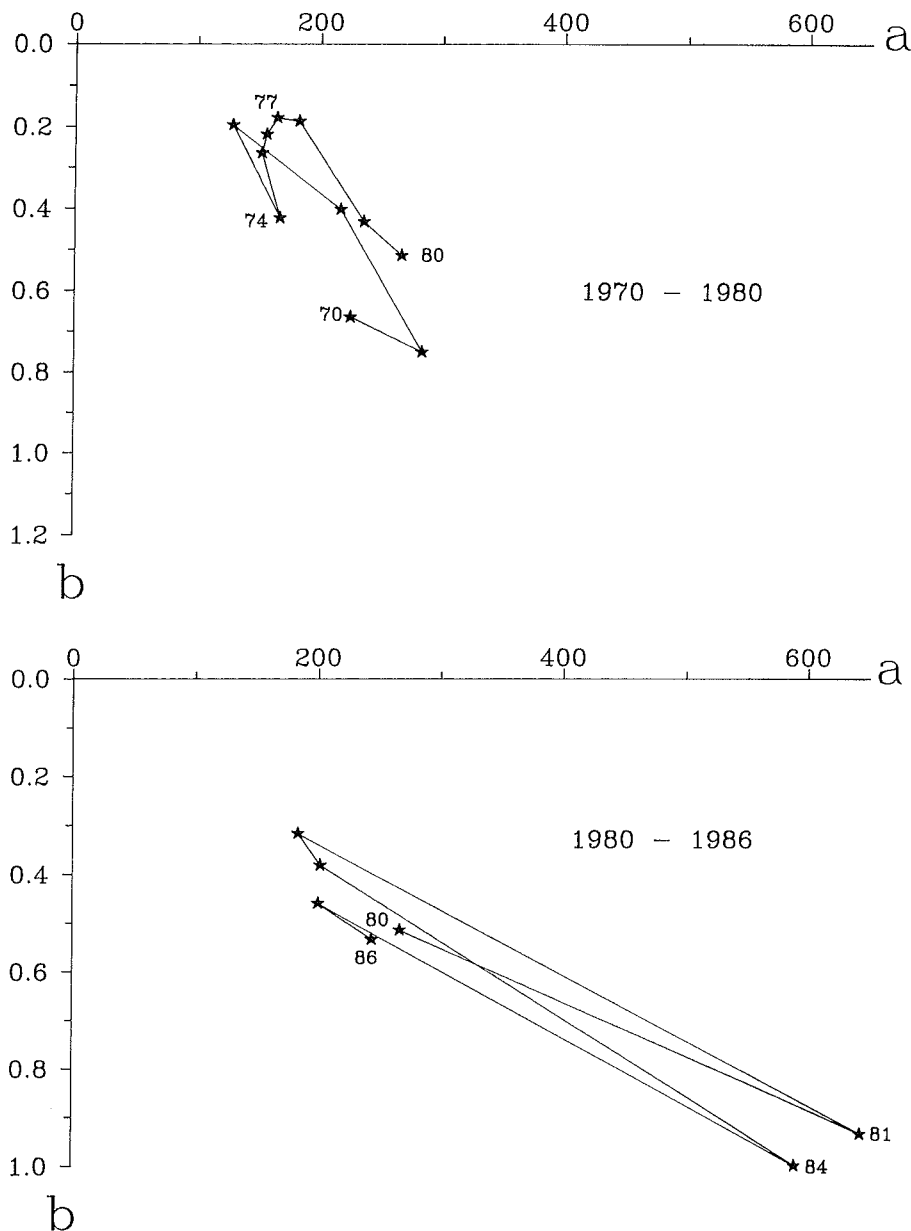


Figure 4 : Evolution des paramètres (a) et (b) de 1970 à 1980 et de 1980 à 1986

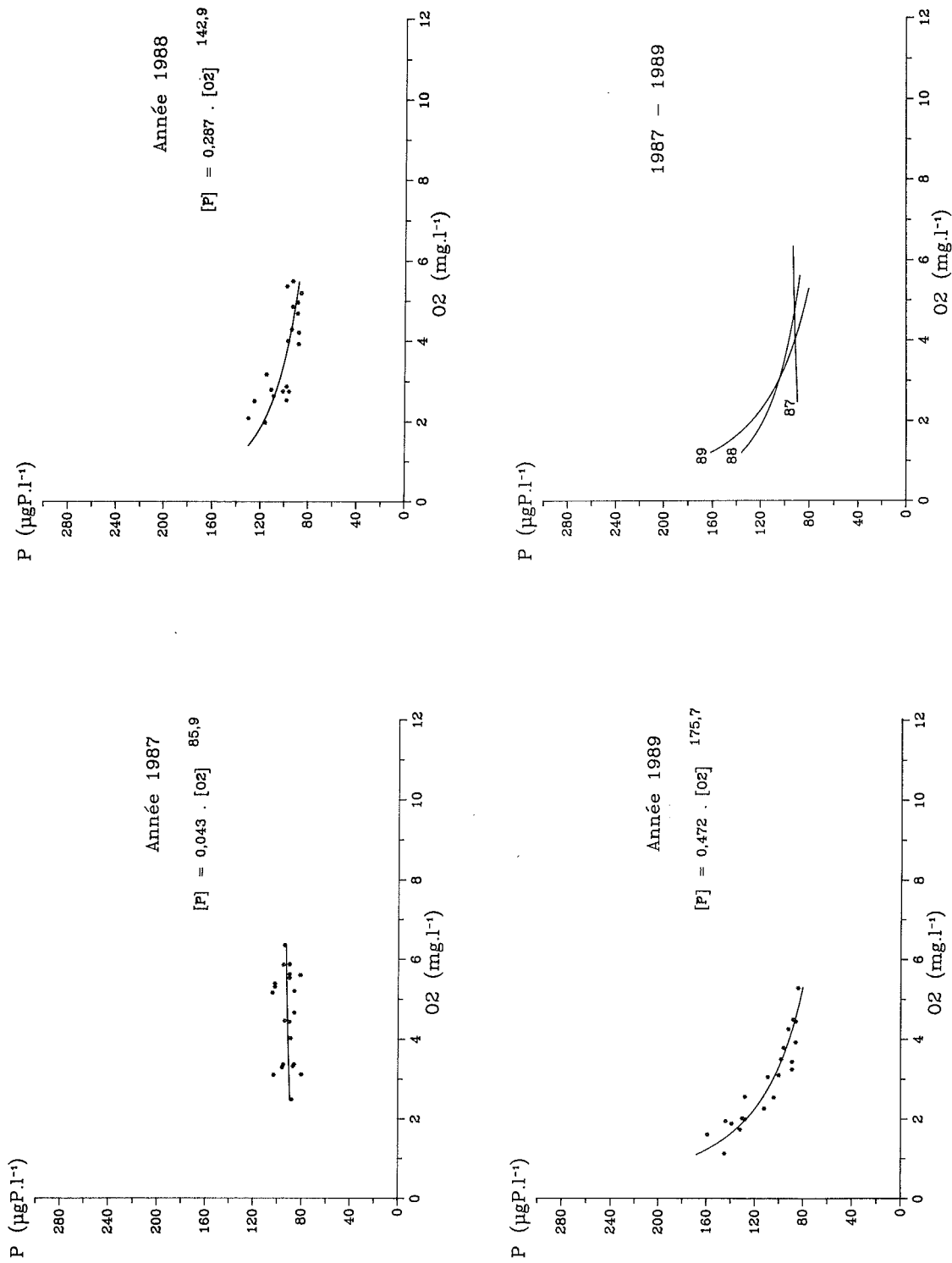


Figure 5 : Evolution de la courbe $[P] = a[O_2]^b$ de 1987 à 1989

Années 1987-1988-1989

Aucune de ces trois années n'a bénéficié d'une bonne oxygénation et aucune n'a manifesté non plus de désoxygénation catastrophique, l'amplitude des variations étant d'environ 4 mg/l d'oxygène (figure 5). Ce n'est donc pas sa très légère meilleure réoxygénation qui caractérise 1987, mais bien l'exceptionnelle stabilité de la concentration en phosphore, voire même une légère diminution au cours de la désoxygénation. Ce comportement exceptionnel de 1987, qui se traduit par un (b) extrêmement faible (figure 6) est sans doute à mettre en relation avec un important flux de particules fixatrices déversé à l'occasion de crues estivales (ORAND et COLON, 1988). Par contre les années 1988-1989 se comportent de façon classique : à pouvoir de sédimentation équivalent, mis à part 1981 et 1984, elles sont moins eutrophes que les autres années de la décennie et se rapprochent en cela des années 1973-1974-1975. Reste à savoir si justement une succession d'hivers doux ne provoquerait pas une augmentation de la charge interne équivalente à celle qui a abouti au record de 1978.

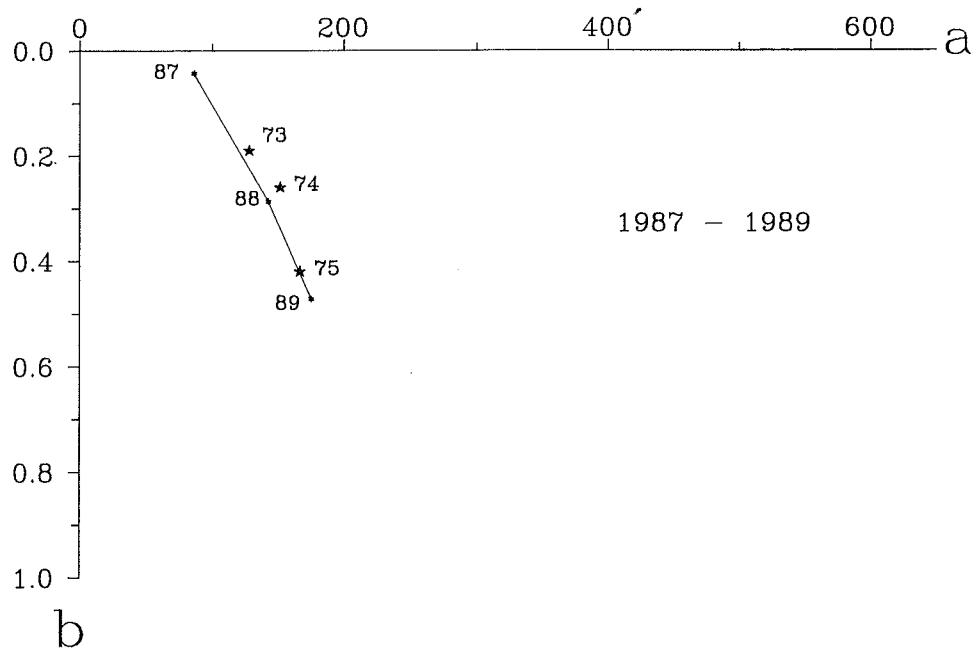


Figure 6 : Evolution des paramètres (a) et (b) de 1987 à 1989.

4. CONCLUSION

L'étude de la relation phosphore-oxygène ($P-O_2$) au fond du Léman montre que les concentrations en phosphore sont en nette régression et qu'il ne s'agit pas d'un artefact météorologique. Si 1981 et 1984 semblent n'avoir eu à subir les méfaits d'un déficit de particules fixatrices laissant la place à une charge interne nette relativement élevée et précoce, 1987 a bénéficié d'un important flux de ces particules, réalisant une véritable inactivation naturelle du phosphore. D'ailleurs quand on explique l'état trophique d'un lac sur la base d'un bilan de phosphore total, on attribue au phosphore particulaire un rôle eutrophisant alors que la particule support peut fort bien être sous-saturée en phosphore et jouer un rôle de piège donc oligotrophisant. L'existence d'un pouvoir de déphosphatation naturel relativement élevé devrait permettre au lac de se restaurer plus vite que ne le laisse prévoir un simple modèle hydraulique utilisant l'exponentielle de lessivage. Encore cette faculté n'est-elle valable que s'il y a assez d'oxygène. Tout peut être remis en question, si ce dernier vient à faire défaut, selon que le pouvoir de déphosphatation est capable ou non de neutraliser les apports résultant de l'anoxie : s'il est dépassé, le phosphore se retrouvera dans toute la colonne d'eau, comme au début des années 80, sinon l'ensemble de la courbe continuera à baisser, comme ce fut le cas pour le lac de Nantua après que les effluents aient été détournés en 1973. En ce sens une succession d'années sèches à hivers doux serait particulièrement défavorable et rendrait tout à fait adapté, du moins momentanément, la proposition de provoquer artificiellement un complément de circulation (FAHRNI et RAPIN, 1986).

BIBLIOGRAPHIE

- BARROIN, G. (1986) : Relation phosphore-oxygène : un outil mathématique pour caractériser le métabolisme phosphoré de lacs profonds. Sciences de l'Eau, 5, 29-42.
- BARROIN, G. (1988) : Estimation du métabolisme du phosphore dans le Léman à partir de la relation phosphore-oxygène en zone profonde. In Eutrophication and lake restoration. Water Quality and biological Impacts. BALVAY (Ed.), INRA Thonon-les-Bains, 63-78.
- BLANC, P., CORVI, C., et RAPIN, F. (1987) : Evolution physico-chimique des eaux du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 1986, 21-42.
- FAHRNI, H.P. et RAPIN, F. (1986) : Modélisation du cycle du phosphore dans le Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 1985, 153-190.
- ORAND, A. (1986) : Etude des affluents du Léman et de son émissaire. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 1985, 91-104.
- ORAND, A. (1987) : Etude des affluents du Léman et de son émissaire. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 1986, 77-90.
- ORAND, A. et COLON, M. (1988) : Etude des affluents du Léman et de son émissaire. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 1987, 141-154.