

ETUDE EXPERIMENTALE DE LA FERTILISATION PHOSPHATEE DANS LES CLAIRES A HUITRES

par Jean-Pierre DELTREIL, Michelle FEUILLET et Guy ARCHAMBEAU

Dès 1870, les frères de MONTAUGÉ faisaient procéder à des analyses physico-chimiques des « crassats » de la baie d'Arcachon dans l'idée d'améliorer les fonds ostréicoles. Ce n'est que beaucoup plus tard, au fur et à mesure que se précisaient nos connaissances sur la biologie des mollusques et du phytoplancton, que de véritables essais de fertilisation du milieu marin furent entrepris.

AUBERT (1965) rapporte qu'avant même que la culture du phytoplancton ne soit réussie par ALLEN et NELSON en 1910, de tels essais avaient été tentés en Norvège à l'aide de chlorate d'ammonium.

En 1932, GAARDER et SPARCK s'attachèrent plus particulièrement à l'amendement des parcs à huîtres. Les expériences de GROSS, RAYMONT, NUTMAN et GAULD (1946), et celles de MARSHALL et ORR (1948), dans un loch d'Ecosse, démontrèrent que des apports de superphosphate de chaux et de sulfate d'ammoniaque favorisaient la production phytoplanctonique. Aux U.S.A., PRATT (1949, 1950) tenta la fertilisation d'un bras de mer en associant le superphosphate de chaux et le nitrate de sodium. En Australie, ROCHFORD (1951) entreprit des essais d'enrichissement des vases des parcs à huîtres. Citons enfin les expériences de BULJAN (1957) qui obtint une augmentation importante de la croissance des moules et des huîtres après fertilisation phosphatée des lacs de Mjlet en Yougoslavie.

En France, à la suite de quelques essais préliminaires de DANTAN dans les claires de la Seudre et les travaux de HINARD (1923) sur les fonds ostréicoles, de nombreuses expériences sur les effets de fertilisants minéraux sur les mollusques, ainsi qu'une étude sur la teneur en phosphore de la coquille et l'influence sur cette dernière de la composition des sols avec ou sans enrichissement phosphaté, furent entreprises (LAMBERT et LADOUCE, 1950 ; TROCHON, 1951 ; LADOUCE, 1953 ; GOUERE, 1953 ; CREACH, 1957 ; CREACH et LE DANTEC, 1958). De nouvelles expérimentations furent tentées de 1964 à 1969 dans les claires creusées dans les mattes alluvionnaires du bas-Médoc.

C'est dans les milieux semi-fermés et par l'emploi de superphosphate de chaux, que les meilleurs résultats ont été obtenus tant sur le plan de la croissance que sur celui du poids des huîtres. Ainsi, en 1965, le gain pondéral du lot testé dans une claire amendée pour la deuxième année était supérieur de 100 % à celui des lots suivis dans les claires-témoins. Toutefois, les avantages de la fumure sont restés aléatoires et irréguliers au cours des années suivantes.

En eaux libres, l'augmentation du rendement constaté ici ou là (expérience de GOUERE notamment) ne fut pas confirmée lors d'essais ultérieurs, plus rigoureux, qui mirent seulement en évidence la rétention d'une part importante du phosphore incorporé au sol et une diminution des attaques de l'annélide *Polydora* sur les valves des huîtres.

De 1970 à 1973, à l'occasion d'une reprise des essais d'amendements destinés à favoriser l'adaptation de nouveaux terrains à l'ostréiculture sur la rive gauche de la Gironde, nous avons abordé les problèmes de la dynamique des engrais phosphatés dans le système eau-sol des claires à huîtres. Des tests de croissance de l'huître en milieu fertilisé ont été poursuivis jusqu'en 1976.

1. Conditions expérimentales et problèmes posés.

Les claires de la région de Neyran, près de Soulac-sur-Mer, sont, dans leur principe et leur fonctionnement, identiques à celles de la Charente-Maritime. Elles sont le siège des mêmes séquences écologiques qui ont permis à MOREAU (1971) de définir la véritable entité de ces milieux semi-fermés à forte production primaire et de démontrer l'étroite dépendance qu'ils conservaient vis-à-vis des eaux libres pour l'apport des éléments biogènes, phosphore notamment.

Sur le plan pédologique, il faut préciser qu'il s'agit de claires en première année d'exploitation, creusées en 1970 dans les terrains de polders qui bordent l'estuaire girondin. A l'état naturel, ces sols d'alluvions fluvio-marins se caractérisent par :

- une double carence en phosphore (0,7 à 0,13 % de P_2O_5) et en azote (0,04 % d'N total) ;
- une capacité d'échange élevée due à la présence de bases Ca^{++} , Mg^{++} et Na^+ ;
- une certaine richesse en hydroxydes métalliques, Fe et surtout Al (20 à 22 %).

On se trouve initialement en présence d'un système eau-sol dans les claires dont l'une des phases au moins est déficitaire en phosphore et en azote ; au cours des amendements opérés, nous avons agi simultanément sur l'une et l'autre de ces phases suivant les deux voies possibles.

Voie indirecte.

Le fond des claires est amendé comme un sol agricole par une fumure de printemps avant la première mise en eau. Le principe consiste en un stockage des fertilisants dans les sédiments du fond pour être ensuite libérés dans les eaux de la claire et utilisés par le phytoplancton.

Le fonctionnement de ce système implique à la fois :

1) l'existence d'une réserve phosphorée ou, suivant l'expression utilisée par les agronomes, d'un pool alimentaire représenté par l'ensemble des formes facilement échangeables sous lesquelles les ions PO_4 sont mis en réserve ; la constitution de ce pool alimentaire est d'autant plus difficile à réaliser que le sol est carencé ;

2) la diffusion progressive de l'engrais. Les échanges de ce type ont fait l'objet de nombreuses recherches (MORTIMER, 1941 ; HAYES et PHILIPS, 1958 ; OLSEN, 1964 ; POMMEROY, SMITH et GRANT, 1965). L'un de nous (FEUILLET, 1971) a montré que cette diffusion était active dans les eaux conchylicoles à partir du sol des parcs à huîtres.

Voie directe.

Les engrais sont apportés dans la masse d'eau sous la forme soluble ; l'enrichissement est immédiat et peut être renouvelé à volonté pendant la saison d'exploitation des claires, de mai à décembre. Cette formule, *a priori* plus simple, doit tenir compte des phénomènes de sédimentation des engrais qui sont adsorbés par le fond et plus ou moins bloqués à ce niveau. De nombreux exemples apportent la preuve d'une disparition rapide, parfois en quelques heures seulement, des fertilisants minéraux ainsi introduits dans le milieu, limitant la possibilité d'un enrichissement durable (ORR, 1947 ; BROOK et HOLDEN, 1957 ; HOLDEN, 1959 ; SCHINDLER *et al.*, 1971).

En claire, la faible importance du volume d'eau (90 m³) par rapport à la surface du fond (300 m²) favorise les phénomènes d'adsorption. Dans le cas de Neyran, il s'y ajoute la carence naturelle du sol et la présence d'un matériel particulière en suspension apporté par

les eaux de l'estuaire de la Gironde qui joue un rôle adsorbant non négligeable vis-à-vis des ions en solution.

Choix des engrais.

Le superphosphate de chaux associé ou non à des sels azotés tels que NO_3Na ou NO_3NH_4 a été utilisé largement par tous les expérimentateurs. En claire, l'abandon des engrais azotés au profit du seul superphosphate tient essentiellement au fait que l'azote a été tenu pour responsable de développements anarchiques de macrophytes indésirables en claires (*Enteromorpha*, *Cladophora*).

Nous avons testé comparativement le comportement et l'efficacité de deux types d'engrais du commerce :

superphosphate de chaux : engrais granulé titrant 25 % de P_2O_5 ; en amendement de printemps, nous l'avons utilisé par simple épandage à raison de 300 kg/ha ; en cours de saison, l'engrais a été apporté par doses successives de faible importance après mise en solution ;

phosphate d'ammoniaque : engrais liquide également connu sous l'appellation de 14-48-0 qui définit sa composition, 14 % d' NH_3 et 48 % de P_2O_5 . Outre l'apport d'azote ammoniacal directement utilisable par les diatomées des claires, cet engrais est un polyphosphate d'ammoniaque qui contient à l'état séquestré soluble des oligo-éléments tels que le fer provenant de l'acide sulfurique de préparation et du minéral d'origine. Il présente, à priori, une valeur fertilisante supérieure à celle du superphosphate de chaux, ce qui nous a amené à l'expérimenter pour la première fois dans le domaine ostréicole.

De 1970 à 1973, nous avons fait varier les quantités et les modalités de l'amendement, à la fois sur des sols « neufs » et des sols plus anciennement enrichis. L'étude de la dynamique du phosphore a été complétée par un bilan de la fertilisation au niveau du sol des claires. Des tests d'efficacité sur la production phytoplanctonique et la croissance des huîtres ont été menés simultanément puis poursuivis pendant trois années supplémentaires de façon à mieux apprécier les effets de l'amendement dans le temps.

2. Dynamique du phosphore des engrais superphosphatés.

Cette partie de l'étude a porté sur les fluctuations du phosphore inorganique dissous dosé selon la méthode de MURPHY et RILEY (STRICKLAND et PARSONS, 1968) dans l'eau des claires et dans l'eau interstitielle des sédiments du fond.

La disponibilité du phosphore a été estimée au terme de chaque période de « fermeture » des claires, c'est-à-dire en moyenne au 9^e jour après l'introduction des engrais, avant que la claire ne soit de nouveau mise en communication avec l'extérieur.

1. Emploi du superphosphate de chaux sur des sols neufs.

Dès la submersion qui suit l'épandage de l'engrais, la teneur en phosphore de l'eau de la claire s'élève immédiatement et atteint des valeurs excessives les premiers jours, jusqu'à 200 μ atg P/l pour ensuite décroître tout aussi rapidement sans que l'on puisse faire la part du phosphore adsorbé, consommé par le phytoplancton ou simplement perdu par entraînement vers l'extérieur. Cette dernière fraction est certainement très importante.

A l'issue du premier mois, on ne retrouve que 1,7 à 1,9 μ atg P/l dans l'eau de la claire.

La diffusion s'opère également, mais de façon plus progressive vers l'eau interstitielle, au fur et à mesure de l'imbibition du sol. Au bout du même laps de temps, on y dose la même quantité que dans l'eau sus-jacente : 1,8 μ atg P/l.

Cet état d'équilibre entre les deux phases du système-eau du sol-eau de la claire n'est que très momentané, il se modifie par la suite rapidement et dans tous les cas.

Si on se limite à la seule fumure de base, le phosphore continue à décroître dans la masse d'eau ; après deux mois de fonctionnement, la teneur s'abaisse à 0,55 μ atg P/l, dès le 3^e mois elle redevient identique à celle relevée dans une claire-témoin (0,1 à 0,2 μ atg P/l).

Par contre, dans l'eau interstitielle, la teneur acquise après l'apport du mois de mai demeure inchangée jusqu'en septembre. Il y a bien constitution d'une réserve dans la solution du sol, mais tout se passe comme si celle-ci n'était pas fonctionnelle. L'amendement par la voie indirecte n'apparaît pas susceptible de conduire à un enrichissement durable de la masse d'eau; nous verrons qu'il n'est toutefois pas sans importance.

Des amendements fractionnés en cours de saison, en complément de la fumure de printemps, permettent de pallier aux inconvénients précédents en maintenant la disponibilité du phosphore.

Chaque apport de 0,9 kg relève la teneur en phosphore inorganique dissous dans l'eau de la claire aux environs de 35μ atg P/l, mais plus de la moitié disparaît dans les 48 heures suivantes. Au 9^e jour, le taux de déperdition atteint 93 % en moyenne; le phosphore disponible fluctue alors autour de 2μ atg P/l.

Au niveau du sol, l'effet cumulatif des apports fractionnés entraîne une augmentation progressive de la teneur en phosphore de l'eau interstitielle: elle atteint 5μ atg P/l après le dernier apport de septembre. Dès lors, cette réserve s'épuise très rapidement et se stabilise à une valeur comparable à celle acquise au mois de juin précédent par la fumure de printemps. La figure 1 montre que le phosphore diminue parallèlement dans l'eau de la claire pour atteindre au mois de novembre des valeurs comparables à celles enregistrées dans une claire non amendée.

Dans les conditions de l'expérience, l'enrichissement observé au niveau de l'eau interstitielle nous paraît être un indice intéressant; en deçà de 2μ atg P/l, les phénomènes de diffusion sont trop ralentis pour que la réserve du sol puisse véritablement jouer un rôle dans la fertilisation de la masse d'eau de la claire.

En deuxième année d'amendement, nous avons sensiblement modifié la procédure d'apport des engrais. La fumure de printemps a été la même que l'année précédente, par contre la fréquence des doses fractionnées a été diminuée de moitié et la période d'apport étendue jusqu'au mois de novembre.

Une fois sur deux, l'alimentation a été réduite à une simple entrée d'eau suffisante pour ajuster le niveau, ceci afin de limiter les pertes par entraînement vers l'extérieur qui se produisent chaque fois que la claire « boit ».

Comme en première année, on observe une diffusion rapide du phosphore des engrais apportés au sol en fumure de printemps. Le bilan du premier mois indique toutefois un enrichissement supérieur à celui de l'année précédente, tant au niveau de l'eau du sol ($4,62 \mu$ atg P/l) que dans l'eau de la claire ($2,32 \mu$ atg P/l).

Au cours de l'été, la disponibilité est également accrue, en moyenne il persiste $2,31 \mu$ atg P/l au 10^e jour et $1,35 \mu$ atg P/l au 24^e jour après l'apport. La diminution de la fréquence des doses fractionnées permet d'éviter l'effet cumulatif dans l'eau interstitielle, la teneur en phosphore s'y maintient relativement constante: 3 à $3,5 \mu$ atg P/l.

La continuation des apports en automne aboutit progressivement à un renversement de l'équilibre entre les deux phases, le phosphore devient excédentaire dans l'eau de la claire et tend à se déplacer vers l'eau interstitielle; au mois de novembre, on y dose respectivement 9 et 5μ atg P/l. La régression naturelle de la production phytoplanktonique à cette époque de l'année explique le sens de cette évolution, l'intérêt de la fumure tardive est surtout d'accroître la réserve du sol.

En résumé, la combinaison d'un amendement du sol qui redresse le potentiel phosphoré et d'apports périodiques bien répartis qui assurent la fertilisation proprement dite nous paraît être la meilleure procédure à retenir pour des terrains carencés comme ceux de Neyran.

Dans l'éventualité d'apports répétés pendant plusieurs années consécutives, on pouvait alors s'attendre à une modification sensible de la dynamique du phosphore en claire.

2. *Emploi du superphosphate de chaux sur des sols déjà enrichis.*

Nos observations ont porté sur une claire qui, entre 1964 et 1969, avait régulièrement reçu chaque année 30 kg de superphosphate en amendement de printemps au sol, soit au total 150 kg d'engrais. En 1970, cette claire a été traitée comme précédemment par 9 kg de superphosphate de chaux au sol et 9 doses de 0,9 kg.

La figure 1 montre que la fumure de base conduit très rapidement à une distribution du phosphore inorganique dissous différente de celle observée en première année dans des claires « neuves », les teneurs sont cinq fois supérieures dans l'eau interstitielle et près de quatre fois dans l'eau de la claire.

La charge phosphorée augmente ensuite régulièrement chaque fois que de l'engrais est apporté, l'effet cumulatif se manifeste aux deux niveaux et aboutit à des teneurs excessives. Le redressement opéré dans le sol par plusieurs années d'amendement tend à réduire le pouvoir adsorbant des sédiments du fond au point que la dynamique du phosphore apporté paraît se limiter à de simples échanges entre l'eau interstitielle et l'eau sus-jacente. Le tracé des courbes de la figure 1 serait très nettement accentué si l'on pouvait tenir compte de l'importante quantité d'engrais qui est perdue lors de chaque période d'alimentation de la claire.

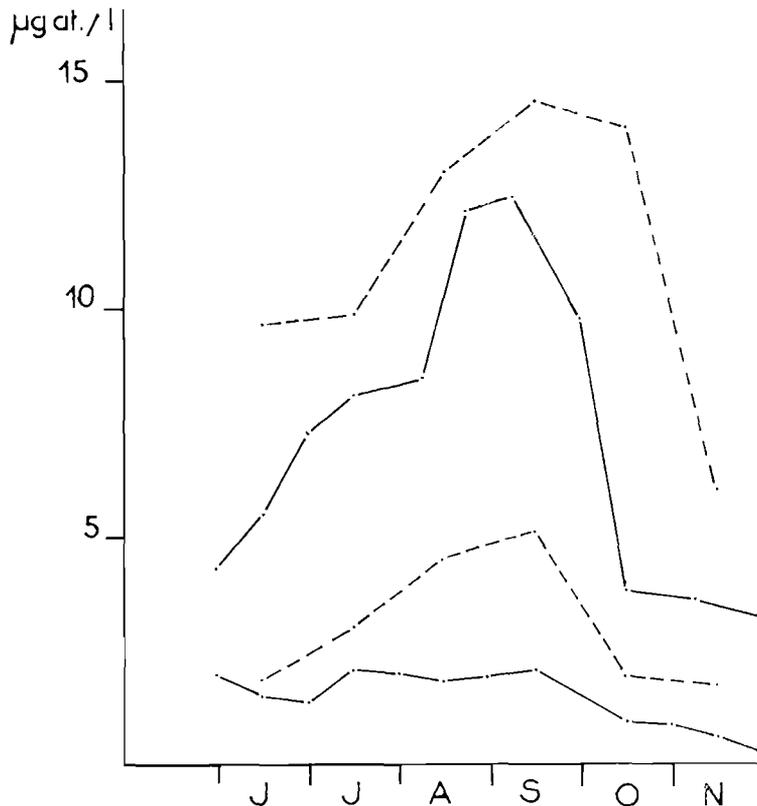


FIG. 1. — Evolution de la teneur en phosphore inorganique dissous dans deux claires amendées au superphosphate de chaux ; En haut : claire anciennement amendée, en bas : claire neuve (trait plein : eau de la claire, tirets : eau interstitielle du sol).

L'arrêt des apports en automne est par contre suivi d'un appauvrissement rapide dans les deux phases du système confirmant ainsi la très grande mobilité du phosphore fixé par l'eau du sol. A la fin du mois de novembre, la disponibilité se maintient encore supérieure à 3 µ atg P/l alors qu'elle n'excédait pas 0,2 µ atg P/l dans l'essai sur sol neuf.

Ces résultats expliquent les difficultés rencontrées dans la fertilisation des claires à fond carencé, mais démontrent aussi qu'en sol redressé l'amendement peut devenir excessif et inutile. A ce stade, on peut se demander dans quelle mesure la réserve du fond ne peut pas constituer une source de phosphore suffisante pour assurer indirectement la fertilisation de la masse d'eau sus-jacente. C'est ce que nous avons voulu vérifier en privant la claire la plus anciennement amendée de tout apport d'engrais pendant deux années consécutives.

3. *Fonctionnement de la réserve du fond des claires.*

Au printemps, un mois après la submersion, la présence de phosphore inorganique dissous ($1,9 \mu \text{ atg P/l}$) dans l'eau interstitielle et dans l'eau de la claire est un premier indice de l'activité de la réserve. L'état physique du sol après les opérations de parage ne favorise pas la mobilisation rapide des phosphates adsorbés, elle s'intensifie au fur et à mesure de l'imbibition des sédiments du fond ainsi que le démontre l'accroissement de la teneur en phosphore au cours des mois suivants : $2,1$ à $3,3 \mu \text{ atg P/l}$ dans l'eau de la claire et 3 à $4,7 \mu \text{ atg P/l}$ dans l'eau interstitielle.

S'il y a bien diffusion d'ions à partir de la réserve du sol, celle-ci n'est toutefois pas immédiate dès la première submersion du fond, à une époque où précisément, ainsi que l'a montré MOREAU, les claires sont le siège d'une intense activité photo-chimique. Le principe d'un amendement de base reste donc valable même dans le cas de fonds de claires riches en phosphore.

La diminution de la quantité d'ions diffusée à partir du mois d'octobre peut être interprétée comme un début d'épuisement de la réserve ou comme une perte de mobilité du phosphore du sol. L'année suivante, la disponibilité n'a jamais dépassé $1,9 \mu \text{ atg P/l}$ dans l'eau de la claire, les teneurs observées dans l'eau interstitielle ont été à peine plus élevées.

Le phosphore du superphosphate stocké dans le sol par plusieurs années d'amendement n'y est pas irréversiblement bloqué mais au contraire peut diffuser activement vers la masse d'eau sus-jacente. Nous verrons que l'estimation du pool alimentaire traduit une diminution du potentiel de la réserve lorsque celle-ci est sollicitée sans être entretenue.

3. **Emploi du phosphate d'ammoniaque liquide 14-48-0.**

Nous nous sommes moins attachés que précédemment à l'aspect dynamique du problème, le but principal était en effet de tester l'efficacité de cet engrais binaire sur la production phytoplanctonique et la croissance des huîtres.

La fertilisation a été conduite de la façon suivante :

- 1 apport de printemps de 4,7 litres,
- 11 apports de 0,47 litre de juin à décembre.

On retrouve à peu de choses près les mêmes phénomènes qu'avec le superphosphate de chaux.

Le bilan de la première opération confirme que l'enrichissement de la masse d'eau n'est que très momentané. Du fait de sa forme soluble, le phosphore disparaît encore plus rapidement qu'après l'apport du superphosphate de chaux. Après un mois, il ne subsiste que $1,28 \mu \text{ atg P/l}$ dans l'eau de la claire et près de $3 \mu \text{ atg P/l}$ dans l'eau interstitielle, la fixation à ce niveau est plus importante qu'avec le superphosphate.

Pendant l'été, les doses fractionnées assurent une disponibilité du phosphore variant de $1,3 \mu \text{ atg P/l}$ au 10^e jour à $0,4 \mu \text{ atg P/l}$ au 24^e jour de l'apport. Dans ces conditions, la réserve liée à l'eau du sol ne s'accroît que faiblement, elle atteint $4 \mu \text{ atg P/l}$ seulement au mois de septembre.

À partir du mois d'octobre, ainsi que nous l'avons déjà constaté avec le superphosphate de chaux, la teneur en phosphore ne cesse de croître pour atteindre des valeurs élevées en novembre après le dernier apport d'engrais : $12,5 \mu \text{ atg P/l}$ dans l'eau de la claire et $9 \mu \text{ atg P/l}$ dans l'eau interstitielle.

On vérifie également avec le phosphate d'ammoniaque que le redressement du sol opéré en première année est bénéfique par la suite. En deuxième année, nous avons supprimé la fumure de base et réduit de moitié les apports en cours de saison, au total 1/4 seulement de la quantité d'engrais a été utilisée par rapport à l'année précédente. Malgré cet allègement, la disponibilité se maintient entre $1,2$ et $3,8 \mu \text{ atg P/l}$ dans l'eau de la claire ; elle ne dépasse jamais $0,5 \mu \text{ atg P/l}$ dans une claire voisine amendée pour la première année.

Nous verrons qu'au niveau du sédiment, le phosphate d'ammoniaque liquide conduit à un enrichissement du pool alimentaire supérieur à celui obtenu avec le superphosphate de chaux.

4. Effets de la fertilisation phosphatée sur le sol.

1. Evolution des quantités de phosphore total.

Les différentes quantités de phosphore total déterminées colorimétriquement par la méthode de MISSON, après attaque perchlorique, sont données dans le tableau 1. Nous avons noté les quantités totales retrouvées dans les échantillons pour chacune des parcelles aux différentes époques de prélèvements et tenté de calculer les enrichissements correspondants (colonne 6). On observe des fluctuations importantes qui, selon nous, doivent être attribuées, d'une part, aux difficultés de l'échantillonnage dans un tel milieu et, d'autre part, au fait que l'eau n'étant pas stagnante, il a pu se produire lors des alimentations successives des claires des entraînements préférentiels en surface. Ces conditions sont encore plus défavorables qu'en agriculture. Comme le signale GACHON (1973), l'apport d'engrais provoque d'importantes hétérogénéités malgré un brassage du sol sur 25 cm du fait du labour; en claire, ce mélange n'intervient pas.

Claires	Période considérée	P total initial en ppm	P apporté en kg/ha	Nature de l'engrais	Δ P total	P final en ppm	P apporté mg/kg de terre	Profondeur calculée en répartition homogène (en cm)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
C 8	1964-1969	640	545	Super-phosphate	370	1 010	2 545	15
	1970		65,4			880		
	1971-1973		240					
D 4	1970-1973	640	301,5	Super-phosphate	200	840	1 255	12
D 2	1971-1973	640	158,2	14-48-0	300	940	659	4,5

TABLE. 1. — Bilan du phosphore total de 1970 à 1974.

Il n'en reste pas moins vrai que tous les échantillons traités correspondant à des prélèvements dans la zone 0-2 cm sont enrichis en phosphore total.

L'accroissement semble plus important en présence de l'engrais liquide 14-48-0 (claire D 2) : 300 ppm contre 200 ppm dans la claire D 4 qui a reçu du phosphore en quantité supérieure. Ceci confirme une adsorption supérieure avec le phosphate d'ammoniaque.

Quant à la claire C 8 qui a reçu du superphosphate depuis 1964, elle s'est enrichie jusqu'en 1970 et atteint 1010 ppm de phosphore total. L'arrêt des apports s'est traduit par une diminution dans la couche 0-2 cm sans que l'on puisse assurer que le phosphore ait été entraîné en profondeur ou bien dissous dans les eaux de surface puis éliminé au cours des alimentations.

Nous avons comparé (colonne 8) l'enrichissement observé en P total aux quantités de phosphore réellement apportées. Lorsque le calcul est effectué sur 2 cm avec une densité de 1,2, on trouve les valeurs indiquées dans la colonne 8. Nous constatons alors un enrichissement théorique (BARBIER, 1965) supérieur à l'enrichissement réel. Comme tel ne peut être le cas, il paraît plus utile de calculer la profondeur nécessaire à l'obtention d'une distribution homogène correspondant à l'apport mesuré. Ces valeurs sont données dans la colonne 9.

Dans le cas du superphosphate, la migration en profondeur semble d'une manière générale beaucoup plus importante qu'en présence de 14-48-0. En fait, la comparaison des teneurs en phosphore d'un profil d'une claire-témoin à celui d'une claire enrichie permet d'observer que

la migration du phosphore se situe bien aux alentours d'une dizaine de centimètres (tabl. 2), profondeur à partir de laquelle on retrouve le sol typique des mattes.

	Claire amendée C 8	Claire-témoin C 1
0 — 2 cm	890 ppm	670 ppm
2 — 5	870	670
5 — 10	800	620
> 10	600	600

TABL. 2. — Phosphore total dans deux profils, amendé et témoin (résultats exprimés en ppm de P).

2. Evolution des formes de phosphore résultant des apports.

C'est la méthode Chang et Jackson qui a été utilisée dans cette partie du travail. Rappelons que cette technique permet en principe de distinguer le phosphore lié à Al, Fe et Ca, formes assimilables. Cette méthode est souvent utilisée par les agronomes pour étudier les variations à moyen terme de la distribution du phosphore apporté par divers engrais, les changements que sont susceptibles de subir ces engrais au cours du temps et leur efficacité (GACHON, 1973). Ce « vieillissement » a été étudié par d'autres auteurs tel que BLANCHET (1971).

Claires	NH ₄ F _{Al}	NaOH _{Fe}	H ₂ SO ₄ _{Ca}	$\frac{E}{1+2+3}$	Durée	Engrais
Témoin	51	26	133	210		
C 8	151 + 100	146 + 120	165 + 32	462 + 252	6 années	Super
D 4	127 + 76	109 + 83	168 + 35	404 + 194	2 années	Super
D 2	174 + 123	152 + 136	103 — 30	429 + 229	1 année	14-48-0

TABL. 3. — Fractionnement et accroissement des formes de phosphore extraites par la méthode Chang et Jackson en ppm.

Le tableau 3 indique le fractionnement du phosphore ainsi que les accroissements obtenus.

Dans une claire privée d'engrais, les différentes formes de phosphore se trouvent distribuées suivant l'inégalité : $(P_{Ca}) > (P_{Al}) > (P_{Fe})$.

Après application de superphosphate de chaux, la même inégalité subsiste; par contre, l'addition de 14-48-0 entraîne une modification de la relation précédente qui devient : $(P_{Al}) > (P_{Fe}) > (P_{Ca})$.

Cet enrichissement préférentiel de P_{Al} correspond à ceux provoqués par des apports d'engrais relativement solubles dans l'eau en terre haute (GACHON, 1973). Il faut aussi noter que dans tous les cas l'apport d'engrais modifie principalement les formes de phosphore liées au fer et à l'aluminium. Les écarts entre les témoins et les traitements représentent l'action de chaque engrais.

Que ce soit après un an d'enrichissement à l'engrais liquide ou plusieurs années d'enrichissement au superphosphate de chaux, la prédominance des ions liés au fer est très nette. Les accroissements donnent la relation suivante : $(P_{Fe}) > (P_{Al}) > (P_{Ca})$.

Pour une année de traitement au 14-48-0 (73,5 kg P/ha/an), l'accroissement de P_{Fe} est de 136, alors que deux années d'apport de superphosphate de chaux n'entraînent qu'une augmentation de 83. Cette différence peut en partie être due au pouvoir séquestrant de l'engrais liquide ; le fer et les oligo-éléments existant dans l'acide superphosphorique sont maintenus sous la forme soluble. D'autre part, ce déplacement vers P_{Fe} est favorisé par une plus grande solubilité du phosphore en sol submergé par suite de la libération des phosphates occlus dans les oxydes ferriques (MAHAPATRA, 1966). Le sol des claires présente des propriétés électro-chimiques et biologiques qui rappellent celles des rizières. La solubilisation a lieu par l'intermédiaire des composés organiques solubles qui complexent les oxydes de fer et libèrent les anions phosphoriques (FUJIWARA, 1959).

Par contre, l'application de superphosphate de chaux ne modifie que très peu la fraction P_{Ca} ; avec l'engrais liquide on enregistre une diminution de cette fraction. Ce résultat est analogue à ceux obtenus par FARDEAU et MARINI (1971) qui notent une baisse de la teneur des ions PO_4 liés au calcium dans un sol de limon traité au phosphate d'ammoniaque.

L'analyse de variance permet de s'assurer que l'action des traitements a un effet significativement bénéfique sur la distribution des éléments P_{Fe} et P_{Al} . Nous savions déjà que les engrais minéraux agissent particulièrement sur les anions PO_4 liés au fer et à l'aluminium. Pour ne pas masquer cet effet, l'analyse a porté sur ces deux formes.

Il faut également souligner que si P_{Fe} , P_{Al} et P_{Ca} sont consommés par les plantes (KITTRICK et JACKSON, 1955), plusieurs auteurs accordent la priorité aux deux premières formes (KITTERA et DATTA, 1969 ; ZUBRISKI, 1971 ; AL ABBAS et BARBER, 1964) ; SINGH *et al.* (1966) démontrent que P_{Fe} est la forme la plus utilisable.

Connaissant le rôle biologique du fer et du phosphore vis-à-vis du phytoplancton, la mise en circulation de cette dernière forme de phosphate prend tout son intérêt (HARVEY, 1938 ; MENZEL et RYTHER, 1961 ; AUBERT *et al.*, 1958).

3. Le phosphore organique.

Les mesures ont porté sur quelques échantillons différenciés du point de vue du phosphore total. On constate qu'il n'y a pas de variation significative, ni au cours du temps ni en fonction des traitements appliqués. Les teneurs oscillent autour du 200 μ /g P/g dans tous les cas considérés.

Les apports d'engrais minéraux n'ont aucune action sur l'accroissement ou la diminution des formes stables du phosphore organique dans les sols de claires.

4. Le phosphore isotopiquement diluable (1).

Le but essentiel est ici d'utiliser une technique susceptible de nous renseigner sur la fraction des ions phosphate contenus dans le sol qui diffuse facilement vers l'eau sus-jacente pour être assimilée par les organismes vivants. De nombreuses méthodes chimiques basées sur l'emploi de réactifs acides, basiques ou neutres permettent de semblables déterminations. Mais il faut bien noter que tous ces réactifs ont également la propriété de détruire le sol. C'est la raison pour laquelle nous avons utilisé la méthode de dilution isotopique des ions phosphate dans les systèmes sol-solution telle qu'elle a été décrite par FARDEAU et GUIRAUD (1974).

Comme l'a noté BARBIER *et al.* (1971) et plus récemment LARSEN (1974) cette méthode est la seule qui ne perturbe pas le milieu à étudier et qui peut rendre compte de la taille du pool des ions diffusibles.

Résultats obtenus.

Les quantités et les accroissements du phosphore isotopiquement échangeable pour les différents traitements sont indiqués dans le tableau 4. Les valeurs mentionnées représentent le bilan en phosphore des claires après les amendements de l'année 1973.

L'apport d'engrais, quel que soit sa nature, sa quantité et sa durée d'application, provoque un enrichissement en phosphore autodiffusible donc biologiquement utilisable.

(1) Nous remercions M. FARDEAU, du centre atomique de Cadarache, qui nous a permis d'obtenir ces résultats ainsi que pour les précieux conseils qu'il nous a donnés.

Le rapport des accroissements ΔP échangeable / ΔP total permet de comparer l'influence des deux types d'amendements sur la réserve en phosphore labile des sédiments. Notons l'efficacité de l'engrais 14-48-0, le pool atteint 103,11 γ P/g après trois années de traitement alors que pour des claires enrichies en superphosphate depuis quatre années il ne s'élève qu'à 50,61 γ P/g. Le phosphate d'ammoniaque liquide semble favoriser particulièrement le taux de labilité et ceci indépendamment des quantités apportées. L'enrichissement du pool labile est amélioré avec le plus faible apport de phosphore (tabl. 5) ; un tel accroissement correspond bien à l'effet séquestrant propre à l'engrais 14-48-0.

Nature du traitement	P échangeable en 100 mn	P total en ppm	P échang. % P total	Quantité de traitement apportée en mg de P/kg
Témoin	18,30	640	2,8	0
14-48-0 (D 2)	103,11	940	10,9	659
Super (D 4)	50,61	840	6	1 255
Super (C 8)	60,58	880	6,8	2 545

TABL. 4. — Bilan phosphoré.

Après un arrêt des apports en superphosphate de trois années le pool des ions échangeables a diminué : 60,58 γ P/g de sédiment tout en restant supérieur au témoin : 18,30 γ P/g. Cette diminution n'intervient qu'après trois années de repos ; jusque là le pool se maintient à un niveau

Formes	Période	Accroissement du P total ΔP_t	Accroissement du phosphore échangeable $\Delta P_{\text{éch.}}$	$\frac{\Delta P_{\text{éch.}}}{\Delta P_t}$ %	P apporté en mg/kg
Super (D 4)	1970-1973	200	32,31	16	1 255
Super (C 8)	1964-1970	320	132,5	41	2 545
	1970-1973	240	42,28	17	0
14-48-0 (D 2)	1971-1973	300	84,81	28	659

TABL. 5. — Evolution du phosphore au cours du temps.

relativement constant et élevé qui varie entre 103,54 et 147,97 γ P/g de sédiment. Après ce laps de temps le potentiel phosphorique diminue environ de moitié. Ces résultats sont à rapprocher de ceux de SUTTON et LARSEN (1969) qui estiment qu'il faut deux à trois ans pour que le phosphore du superphosphate perde 50 % de sa labilité initiale. Cette perte de mobilité se traduit dans les valeurs relevées dans l'eau interstitielle et dans l'eau de la claire. La vitesse d'échange ne permet pas de compenser les apports annuels d'engrais qui entretiennent et élèvent le pool des ions auto-diffusibles.

En sol neuf il semblerait que la teneur en phosphore assimilable soit faible par rapport à la teneur en phosphore total, la forme soluble du 14-48-0 est donc particulièrement adaptée à leur amendement.

5. Effets de la fertilisation sur la production phytoplanctonique.

1. Problèmes posés.

A des degrés divers et de façon plus ou moins régulière, la plupart des tentatives de fertilisation a permis de constater des effets stimulants sur le phytoplancton et plus généralement sur la biomasse végétale des milieux enrichis.

Ce n'est pas pour autant que les expérimentateurs ont pu conclure à la possibilité de contrôler à volonté la productivité des eaux. L'influence des apports minéraux est étroitement subordonnée à d'autres facteurs tels que les conditions naturelles du milieu et l'état physiologique des populations phytoplanctoniques, diatomées notamment. Certaines priorités dans la consommation des sels nutritifs par les macrophytes au détriment du phytoplancton ont été aussi mises en cause pour expliquer un manque de reproductibilité ou des effets différés.

D'où également les difficultés rencontrées dans des expériences en vraie grandeur visant à rechercher et à comparer l'efficacité de divers fertilisants azotés, phosphatés et de formules binaires NP.

A la suite d'amendements répétés (superphosphate et sels ammoniacaux) dans le loch Craighlingen, Ecosse, MARSHALL et ORR (1948) ont obtenu un accroissement des populations de diatomées (*Chaetoceros*, *Nitzschia*) et de dinoflagellées (*Gymnodinium*, *Exuviella*) vérifiant que l'azote pouvait être directement utilisé sous la forme ammoniacale par le phytoplancton. Plus récemment, les travaux de VINCE et VALIELA (1973) faisant suite à ceux de DINSTAN et MENZEL (1971), RYTHER et DUNSTAN (1971) et THOMAS (1966, 1970) ont abouti à la conclusion que l'azote était le principal facteur limitant ; le phosphore venant toutefois accroître les effets de l'azote ammoniacal dans le développement cellulaire et la production chlorophyllienne.

HOLDEN (1954) a par contre estimé que l'emploi de l'azote ne se justifiait pas suffisamment, le phosphore permettant à lui seul d'accroître considérablement la production de phytoplancton. Ce point de vue est également celui de SCHINDLER (1971, 1973) qui accorde au phosphore un rôle primordial dans le lac 227 tout en démontrant l'efficacité d'un double enrichissement en phosphore et en azote dans l'obtention d'un effet fertilisant maximum.

La technique de BULJAN exclut l'emploi d'azote mais implique un apport dû à la mobilisation des ressources naturelles du milieu. PUCHER-PETKOVIC (1960) a rendu compte de l'effet fertilisant obtenu sur le phytoplancton suivant cette méthode.

En claires l'effet recherché consiste en un accroissement à la fois rapide et intense des populations de diatomées en majorité benthiques. Trois objectifs peuvent être envisagés.

Au printemps : favoriser l'installation et la prolifération des diatomées après l'assèchement et le « parage » des claires. Nous avons vu que la mobilisation lente des réserves du sol justifiait alors la mise à disposition d'éléments minéraux immédiatement utilisables.

En été : stimuler le développement phytoplanctonique dans un milieu où l'intense production primaire s'accompagne d'une surconsommation d'éléments biogènes en même temps que s'accroissent les besoins alimentaires du zooplancton.

En automne : tenter de différer le plus longtemps possible la décroissance naturelle de la production primaire.

Nos observations ont porté sur les modifications qualitatives et quantitatives du phytoplancton des claires, induites par l'emploi du superphosphate de chaux et du phosphate d'ammoniaque liquide.

2. Variations qualitatives.

Les genres les plus communs des fonds de claires sont présents dans la région de Neyran : *Nitzschia*, *Pleurosigma*, *Navicula*, *Synedra*, *Amphora*, *Amphiprora*, *Tropidoneis*, *Surirella*. Du mois de mai au mois de décembre, la composition spécifique de cette flore de diatomées varie relativement peu. Les genres *Pleurosigma*, *Nitzschia* et *Synedra* sont les premiers à apparaître au printemps et demeurent les plus abondants par la suite. D'une façon générale, à l'exception de quelques brè-

ves floraisons de *Chaetoceros* pendant l'été, c'est sur leur densité que se manifeste l'effet des apports d'engrais.

Nous n'avons jamais obtenu de prolifération très nette de *N. ostrearia* en claires fertilisées contrairement à des espèces telles que *N. closterium* et *N. communis* qui ont le mieux répondu à l'apport d'engrais et à un degré moindre *Synedra investiens* et *Pleurosigma fasciola*.

Le phosphate d'ammoniaque a favorisé particulièrement la permanence de *N. communis* du printemps jusqu'à l'automne, plus rarement et toujours de façon brève la floraison de *Chaetoceros* pendant les mois de juillet et août. Quant au superphosphate de chaux, dont les effets sont toujours moins marqués, nous noterons son action spécifique sur une diatomée d'importance mineure, *Surirella fastuosa*; ce qui confirme les observations déjà faites par LAMBERT et LADOUCE.

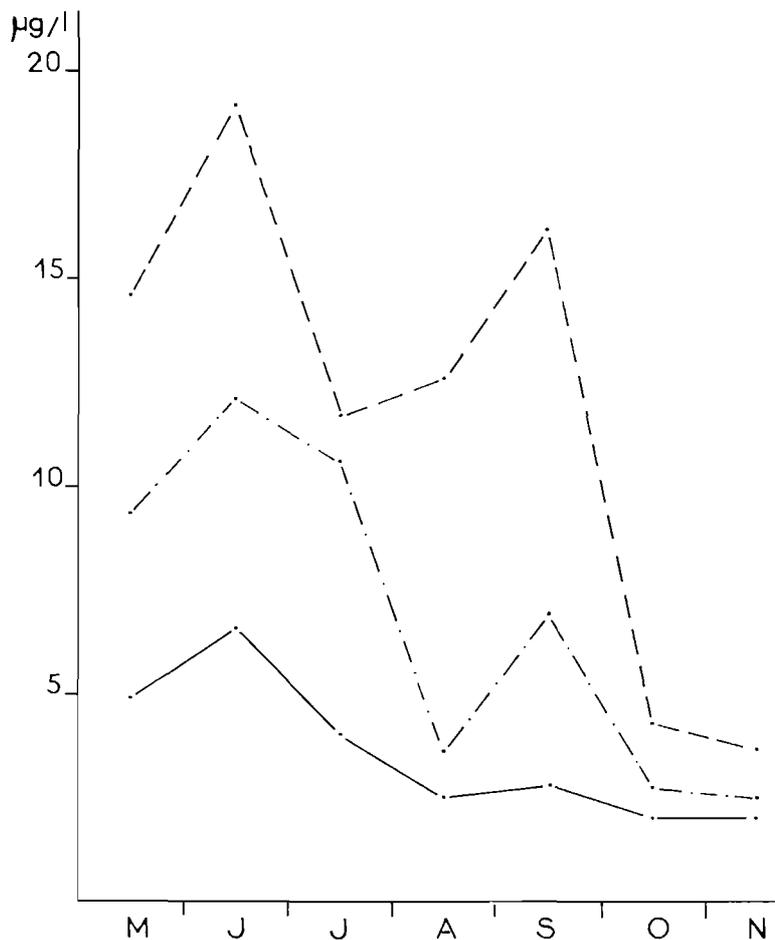


FIG. 2. — Evolution de la teneur moyenne en chlorophylle a dans des claires amendées au phosphate d'ammoniaque (tirets), au superphosphate de chaux (points tirets) et en claire-témoin (trait plein).

3. Variations quantitatives (fig. 2).

L'analyse des pigments chlorophylliens des claires a montré à MOREAU que dès la mise en eau du printemps celles-ci étaient le siège d'un développement végétal rapide portant sur quelques espèces de diatomées.

A Neyran les teneurs en chlorophylle a s'accroissent régulièrement au cours des deux premiers mois suivant la première submersion. Un maximum est atteint en juin. En milieu traité au

phosphate d'ammoniaque les valeurs moyennes sont alors voisines de 20 $\mu\text{g/l}$ contre 12 $\mu\text{g/l}$ en claire superphosphatée et 6 à 7 $\mu\text{g/l}$ en claire témoin.

Cet accroissement printanier dont nous avons observé la répétition pendant trois années consécutives est très nettement activé en milieu fertilisé. Le phosphate d'ammoniaque a une action à la fois plus rapide et plus intense que le superphosphate de chaux ; il apparaît comme l'engrais de « démarrage » de la production phytoplanctonique.

Faisant suite à ce premier maximum, la chlorophylle *a* est en diminution constante au cours des deux mois suivants. La figure 2 construite à partir des moyennes mensuelles des années 1971 et 1972 indique qu'un minimum est atteint au mois d'août dans toutes les claires. La fin de l'été est marquée par une brève augmentation en septembre. En octobre et novembre, alors que les fonds de claires sont encore riches en diatomées, la production chlorophyllienne diminue considérablement et tend à s'uniformiser dans toutes les claires ; les effets de la fertilisation ne sont pas perceptibles. Notons qu'à cette époque de l'année nous n'avons jamais observé une quelconque action favorable des engrais sur le verdissement.

L'analyse des fluctuations de la chlorophylle *a* démontré que c'est surtout pendant la période juillet-août-septembre que l'effet fertilisant est le plus sujet à variations. Par exemple, dans le cas du traitement au phosphate d'ammoniaque qui est le plus efficace, le minimum estival a varié de 21,3 $\mu\text{g/l}$ en 1971 à 3,9 $\mu\text{g/l}$ en 1972. La poussée de septembre a atteint 6,3 $\mu\text{g/l}$ seulement cette dernière année, alors qu'elle avait été de 26 $\mu\text{g/l}$ l'année précédente. Les mauvaises conditions climatiques de l'été 1972 expliquent en grande partie l'échec enregistré cette année-là.

6. Effets sur la croissance des huîtres.

La réponse des mollusques à la fertilisation constitue le principal test d'efficacité des engrais en ostréiculture.

LADOUCE a estimé que l'amendement des claires au superphosphate de chaux permettait d'augmenter la croissance pondérale de *Crassostrea angulata* dans les limites de 4 à 9 kg pour 1 000 huîtres, en 9 à 10 mois d'élevage.

En Yougoslavie, la croissance de l'huître plate *Ostrea edulis* a été multipliée par 4,2 dès la première année de fertilisation des lacs de Mjlet (MOROVIC, 1958). Par contre dans le Limski Kanal, MARINKOVIC et NICOLIC (1963) ne font pas état de résultats très probants.

La mortalité qui a frappé *Crassostrea angulata* LMK au moment où était entreprise cette étude nous a privé d'une partie des résultats ; seuls les essais menés avec *C. gigas* à partir de 1972 ont pu être pris en compte. L'évaluation de la croissance a porté sur des lots de 1 200 huîtres de même origine, de même âge et de poids comparable (25 à 35 g). Les claires ont étéensemencées à raison de 4 huîtres par mètre carré suivant la technique d'exploitation la plus traditionnelle.

1. Résultats obtenus (tabl. 6).

Pour les années 1972 et 1973 au cours desquelles les deux types d'engrais ont été employés comparativement, le taux d'accroissement pondéral moyen passe de 66 % en claire témoin à 87 % en claire superphosphatée et à 120 % avec le phosphate d'ammoniaque. Les gains pondéraux varient respectivement de la façon suivante : 20,8, 27,2 et 37,1 kg pour 1 000 huîtres, faisant ainsi apparaître un bénéfice de croissance très appréciable en faveur de l'engrais 14-48-0.

Par rapport au témoin l'effet fertilisant se concrétise par une amélioration de la croissance qui est spectaculaire dans le cas du phosphate d'ammoniaque : + 18,4 à + 14,2 kg pour 1 000 huîtres au cours des deux premières années d'amendement.

Comparativement, le supplément de gain dû à l'emploi de superphosphate est beaucoup plus faible ; il varie de 5,9 à 6,9 kg pour 1 000 huîtres c'est-à-dire dans des limites assez comparables à celles indiquées par LADOUCE.

Les résultats acquis durant cinq années consécutives confirment l'efficacité de l'engrais 14-48-0. Ils démontrent aussi que le bénéfice acquis la première année tend à diminuer par la suite

au fur et à mesure que s'accroît naturellement la « fertilité » des claires non amendées, de 18,3 kg en 1972 il passe à 7,3 kg en 1976. Dans la pratique c'est donc dans des claires « jeunes » ou à fond carencé qu'un tel type d'engrais est susceptible de présenter le plus grand intérêt.

	1972		1973		1974		1975		1976	
	Δ kg	Δ %								
Claire-témoin	17,95	65	23,74	67	13,85	43	19,91	73	25,91	85
Superphosphate	23,88	87	30,60	87	26,18	81	31,36	115	33,23	109
14-48-0	36,32	132	37,95	108						

TABLE. 6. — Bilans annuels de la croissance de *C. gigas* élevée en claires amendées et témoin de 1972 à 1976. Δ kg : accroissement pondéral moyen en kg pour 1 000 huîtres; Δ % : pourcentage d'accroissement en fonction du poids initial.

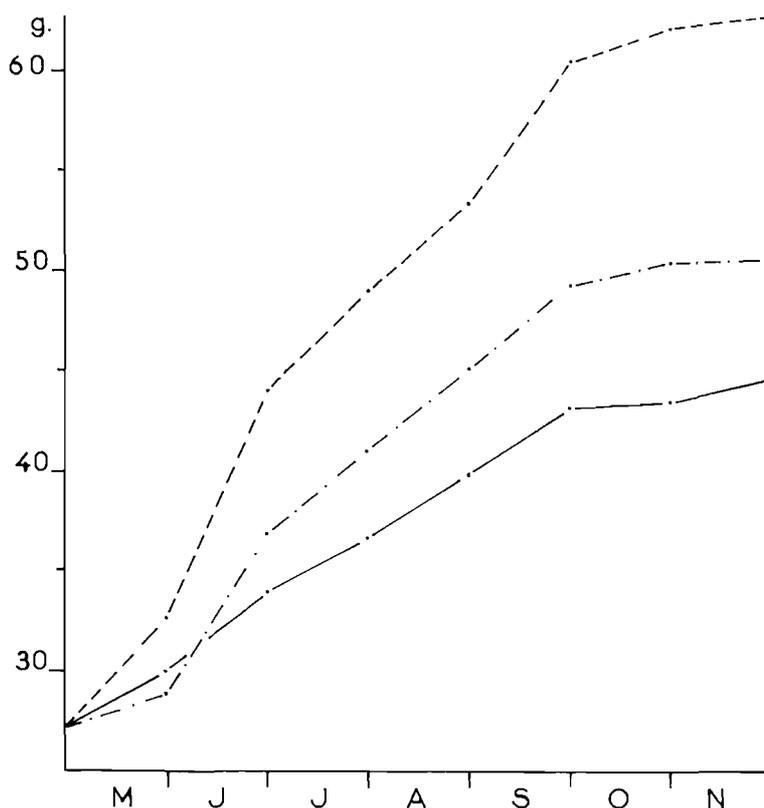


FIG. 3. — Progression mensuelle du poids moyen de *C. gigas* en claires amendées au phosphate d'ammoniaque (tirets), au superphosphate de chaux (points tirets) et en claire-témoin (trait plein).

2. Allure de croissance.

L'évolution de la croissance des huîtres pendant leur séjour en claires permet de préciser l'influence de l'effet fertilisant dans le temps.

La figure 3 montre qu'en claire témoin la croissance est linéaire du mois de mai au mois de

septembre, l'accroissement pondéral mensuel moyen est de l'ordre de 3,2 g pour des sujets pesant initialement 27 g au moment du semis.

La réponse des mollusques est immédiate en claire fertilisée au phosphate d'ammoniaque ; après deux mois d'élevage le taux d'accroissement atteint 62 % soit un gain individuel moyen de près de 17 g. En claire superphosphatée par contre le début du développement est pratiquement différé d'un mois et du fait de ce retard le gain pondéral n'est que de 10 g par individu.

Pendant les mois de juillet et août l'allure des courbes diffère relativement peu en claires fertilisées, le poids moyen progresse de 8 à 9 g contre 6 g en milieu témoin. Ces observations concernent toutefois l'année 1972 au cours de laquelle ainsi que nous l'avons indiqué, l'effet fertilisant a été peu marqué par rapport à l'année précédente durant la période estivale.

L'intensification de la croissance qui se manifeste au mois de septembre uniquement en claire recevant de l'engrais 14-48-0 concourt sinon à démontrer du moins à renforcer l'idée d'un effet fertilisant possible avec ce type d'engrais, dont l'huître pourrait tirer parti avant l'automne.

Par contre, à partir du mois d'octobre le poids moyen ne progresse que très faiblement dans toutes les claires, l'apport de fertilisants n'a aucune incidence significative sur la croissance des huîtres.

En résumé, dans les conditions expérimentales rencontrées à Neyran, la possibilité d'une activation de la croissance des huîtres dépend surtout de l'obtention d'un effet fertilisant à la fois immédiat et intense dès le début du cycle d'élevage ; le phosphate d'ammoniaque 14-48-0 répond mieux à cette double nécessité que le superphosphate de chaux.

Conclusion.

L'étude expérimentale de la fertilisation phosphatée des claires conduit à aborder les échanges eau-sol qui conditionnent en grande partie la circulation des éléments minéraux, les modifications provoquées par l'amendement au niveau du sédiment, l'influence sur la production phytoplanctonique et la croissance des huîtres.

Dans un système carencé tel que celui de Neyran nos observations démontrent que quelle que soit la nature ou la procédure d'apport des engrais, la dynamique du phosphore est conditionnée par le pouvoir adsorbant du fond des claires. En première année, la combinaison d'une fumure de base et d'apports périodiques permet à la fois d'opérer un redressement du sol et d'obtenir un effet fertilisant.

L'acquisition d'une réserve fonctionnelle de phosphore implique d'élever à 2 μ atg P/l au moins la teneur de l'eau interstitielle. On peut dès lors envisager d'alléger les amendements en cours de saison et même dans le cas d'un redressement plus important de laisser cette réserve pourvoir seule à l'enrichissement de la claire.

Que ce soit dans l'appréciation du phosphore total, dans celle du phosphore minéral ou dans l'évolution du pool alimentaire, l'engrais liquide 14-48-0 conduit à un enrichissement supérieur à celui obtenu avec le superphosphate de chaux. La quantité d'ions diffusibles biologiquement utilisables est largement augmentée avec cet engrais.

L'emploi des engrais entraîne des modifications dans la distribution des différentes formes du phosphore dans le sol avec prédominance de phosphate de fer utilisable par le phytoplancton.

L'effet fertilisant le plus régulièrement observé consiste en une activation de la phase de colonisation et de croissance des diatomées dès la submersion des fonds au printemps. L'apport d'engrais permet de pallier soit une carence naturelle, soit même une mobilisation trop lente des réserves du sol. Nos observations font ressortir l'avantage qu'il y a à pratiquer une fumure de printemps et à obtenir un effet fertilisant rapide. L'engrais liquide répond mieux que le superphosphate de chaux à ce besoin.

La fertilisation se traduit par une activation de la croissance des huîtres dès le semis ce qui confirme l'intérêt d'une formule binaire NP plus active qu'un enrichissement en phosphore seul. L'emploi de l'engrais liquide 14-48-0 paraît être plus particulièrement approprié au cas de claires « jeunes » ou peu productives.

Manuscrit déposé le 9 mars 1977.

BIBLIOGRAPHIE

- AL ABBAS (A.H.) et BARBER (S.A.), 1964. — A soil test for phosphorus based upon fractionation of soil phosphorus: I. Correlation of soil phosphorus fraction with plant available phosphorus. — *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **28**: 218-221.
- AUBERT (M.), 1965. — Cultiver l'Océan. — Collection *La Science vivante*. P.U.F., Paris.
- AUBERT (M.) *et al.*, 1968. — Rôle des apports terrigènes dans la multiplication du phytoplancton marin. Cas particulier du fer. — *Rev. Intern. Océanogr. Méd.*, **12**: 75-121.
- BARBIER (G.) *et al.*, 1965. — Contribution à l'étude de l'influence du pH sur la mobilité des ions phosphoriques du sol. — *Ann. agron.*, **16** (6): 923-955.
- BARBIER (G.), FARDEAU (J.-C.) et MARINI (P.), 1971. Sur la diffusibilité des ions phosphate du sol. — *Ibid.*, **22** (3): 309-342.
- BLANCHET (R.), 1971. — Vieillessement d'engrais phosphatés dans le sol et conduite de la fertilisation. — *Ibid.*, **22** (6): 687-703.
- BROOK (A.J.) et HOLDEN (A.V.), 1957. — Fertilization experiments in Scottish hill lochs. I. Loch Kinarchody. — *Sci. Invest. Freshwat. Fish. Scot.*, n° 17, 30 p.
- BULJAN (M.), 1957. — Report on the results obtained by a new method of fertilization experimented in the marine bay Mljetka Jezera. — *Acta Adriatica*, **6** (6).
- CHANG (S.C.) et JACKSON (M.L.), 1957. — Fractionation of soil phosphorus. — *Soil Sci.*, **84**: 133-134.
- CREACH (P.), 1957. — Variations physiologiques du phosphore total de la coquille de *Gryphea angulata* LmK. — *Rev. Trav. Inst. Pêches marit.*, **21** (3): 415-430.
- CREACH (P.) et LE DANTEC (J.), 1958. — Croissance et composition de la coquille de *Gryphea angulata* LmK élevée sur parc de pleine eau après enrichissement phosphaté du sol. — *Ibid.*, **22** (2): 135-145.
- DUNSTAN (W.M.) et MENZEL (D.W.), 1971. — Continuous cultures of natural populations of phytoplankton in dilute treated sewage effluent. — *Limnol. Oceanogr.*, **16**: 623-632.
- FARDEAU (J.-C.) et GUIRAUD (G.), 1971. — Mobilité du phosphore d'un sol ayant reçu du fumier pendant trente-cinq ans. — *Acad. Agricult. Fr.*: 1598-1605.
- FARDEAU (J.-C.) et MARINI (P.), 1971. — Etude par échange isotopique de la transformation dans un sol sans végétation de divers engrais phosphatés après trente-cinq applications annuelles. — *Ann. agron.*, **22** (1): 113-125.
- FEUILLET (M.), 1971. — Etude du phosphore dans les sédiments ostréicoles du bassin des chasses des Sables-d'Olonne. — *Rev. Trav. Inst. Pêches marit.*, **35** (4): 443-453.
- FUJIWARA (A.), 1950. — Chemical constitution and availability of iron and aluminium phosphates. Studies on the constitution and manurial effects of scarcely soluble phosphates. — *Tohoku Journ. Agr. Res.*, **1** (1): 129-141.
- GAARDER (T.) et SPARCK (R.), 1931. — Biochemical and biological investigations in the productivity of the West Norwegian oyster pools. — *Cons. Perm. Explor. Mer, Papp. Proc. Verb.*, **76**: 47-58.
- GACHON (L.), 1969. — Les méthodes d'appréciation de la fertilité phosphorique des sols. — *Bull. An. Fr. E.S.*, (4): 17-31.
- 1972. — Fractionnement du phosphore labile en relation avec le type de sol. — *Ann. agron.*, **23** (4): 429-444.
- 1973. — Vieillessement de divers engrais phosphatés en relation avec le type de sol étudié par la méthode de Chang et Jackson. — *Ibid.*, **24** (5): 585-613.
- GOUERE (A.), 1953. — La fumure des claires. — *La voix de l'écailler. Rivages de France*, n° 8.
- GROSS (F.), RAYMONT (J.E.G.), NUTMAN (S.R.) et GAULD (D.T.), 1946. — Application of fertilizers to an open sea loch. — *Nature*, Londres, 158: 187-189.
- HARVEY (H.W.), 1938. — The supply of iron to diatoms. — *J. mar. Biol. Assoc. U.K.*, **23**: 205-225.
- HAYES (F.R.) et PHILLIPS (J.E.), 1958. — Lake water and sediment. IV. Radiophosphorus equilibrium with muds, plants and bacteria under oxidized and reduced conditions. — *Limnol. Oceanogr.*, **3**: 459-475.
- HINARD (G.), 1923. — Les fonds ostréicoles de la Seudre et du Belon. — *Off. Pêches marit., Notes et Mém.*, **31**, 27 p.
- HOLDEN (A.V.), 1959. — Fertilization experiments in Scottish Freshwater Lochs. II. Sutherland 1954. — *Sci. Invest. Freshwat. Fish. Scot.*, n° 16, 42 p.
- KITTRICK (L.A.) et JACKSON (M.L.), 1955. — Rate of phosphate reaction with soil minerals and electron microscope observations on the reaction mechanism. — *Soil Sci.*, **91**: 292-295.

- KITTERA (M.S.) et DATTA (N.P.), 1969. — Study of extractants for measuring available phosphorus in soils dominant in calcium phosphate. — *Indian J. Agric. Sci.*, **39**: 62-71.
- LADOUCE (R.), 1953. — Utilisation des engrais en ostréiculture. — *Science et Pêche, Bull. inform. et doc. Inst. Pêches marit.*, n° 9: 4-6.
- LAMBERT (L.) et LADOUCE (R.), 1950. — Application des engrais à l'ostréiculture. — *Bull. inform. et doc. Off. Pêches marit.*, n° 5.
- LARSEN (S.), 1974. — Food. — *Neth. J. agric. Sci.*, **22**: 270-274.
- MARINKOVIC (M.) et NIKOLIC (M.), 1963. — La croissance de l'huître *Ostrea edulis* L. avant et après la fertilisation de la mer à Limski Kanal (Istrie, Yougoslavie) de 1957 à 1961. — *Thalassia jugosl.*, **2** (4).
- MARSHALL (S.M.) et ORR (A.P.), 1948. — Further experiments on the fertilization of a sea loch (loch Craighlin). The effect of different plant nutrients on the phytoplankton. — *J. mar. Biol. Assoc. U.K.*, **27**: 360-379.
- MENZEI (D.W.) et RYTHER (J.H.), 1961. — Nutrients limiting the production of phytoplankton in the Sargasso Sea with special reference to iron. — *Deep Sea Res.*, **7**: 276-281.
- MOREAU (J.), 1970. — Contribution aux recherches écologiques sur les claires à huîtres du bassin de Marennes-Oléron. — *Rev. Trav. Inst. Pêches marit.*, **34** (4).
- MOROVIC (D.), 1958. — La croissance des huîtres *Ostrea edulis* L. dans les lacs de Mljet. — *Acta Adriatica*, **6** (7), 28 p.
- MORTIMER (C.H.), 1941. — The exchange of dissolved substances between mud and water in lakes. — *J. Ecol.*, **39** (2): 280-309.
- OLSEN (S.), 1964. — Phosphate equilibrium between reduced sediments and water. Laboratory experiments with radioactive phosphorus. — *Verh. Intern. Ver. Limnol.*, **15**: 333-341.
- ORR (A.P.), 1947. — An experiment in marine fish cultivation. II. Some physical and chemical conditions in a fertilized sea loch. — *Proc. roy. Soc. Edin.*, **63**: 3-20.
- POMEROY (R.L.), SMITH (E.E.) et GRANT (C.M.), 1965. — The exchange of phosphate between estuarine water and sediments. — *Limnol. oceanogr.*, **10** (2): 167-172.
- PRATT (D.M.), 1949. — Experiments in the fertilization of a salt water pond. — *J. Mar. Res.*, **8** (1): 36-59.
— 1950. — Experimental study of the phosphorus cycle in fertilized salt water. — *Ibid.*, **9** (1): 29-54.
- PUCHER-PETKOVIC (T.), 1960. — Effets de la fertilisation artificielle sur le phytoplankton de la région de Mljet. — *Acta Adriatica*, **6** (8).
- ROCHFORD (D.J.), 1951. — Studies in Australian estuarine hydrology. I. Introductory and comparative features. — *Aust. J. mar. Freshwat. Res.*, **2**: 1-116.
- RYTHER (J.H.) et DUNSTAN (W.M.), 1971. — Nitrogen, phosphorus and eutrophication in the coastal marine environment. — *Amer. Advan. Sci. Publ.*, 171: 1008-1013.
- SCHINDLER (D.W.) *et al.*, 1971. — Eutrophication of lake 227, Experimental Lakes Area, northwestern Ontario, by addition of phosphate and nitrate. — *J. Fish. Res. Board Can.*, **28** (11): 1763-1782.
— 1973. — Eutrophication of lake 227 by addition of phosphate and nitrate: the second, third and fourth years of enrichment, 1970, 1971 and 1972. — *Ibid.*, **30** (10): 1415-1440.
- SINGH (R.N.) *et al.*, 1966. — Plant availability and form of residual phosphorus in Davidson clay loam. — *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **30**: 617-620.
- STRICKLAND (J.D.H.) et PARSONS (T.R.), 1968. — A practical Handbook of Seawater Analysis. — *Bull. Fish. Res. Bd. Can.*, n° 167.
- THOMAS (W.H.), 1970. — Effect of ammonium and nitrate concentration on chlorophyll increases in natural tropical Pacific phytoplankton populations. — *Limnol. Oceanogr.*, **15**: 386-394.
- TROCHON (P.), 1951. — Application des engrais minéraux à l'ostréiculture. — *Bull. inform. doc. Off. Pêches marit.*, n° 24.
- ZUBRISKI (J.C.), 1971. — Relation ship between forms of soil phosphorus some indexes phosphorus availability and growth of sudangrass in greenhouse trials. — *Agron. J.*, **63**: 421-425.