

APPLICATIONS DES TECHNIQUES DU LAGUNAGE AU RECYCLAGE DU LISIER DE PORC

Josette SEVRIN-REYSSAC (1), Christine COMBRES (1), S. LAUX (2), C. TEXIER (2)

(1) Muséum d'Histoire Naturelle, Laboratoire d'Icthyologie Générale et Appliquée - 43 rue Cuvier, 75231, Paris Cédex 05.

(2) Institut Technique du Porc, Secteur Environnement - 149 rue de Bercy, 75595 Paris Cédex 12.

Un suivi biologique et physico chimique a été effectué pendant une année dans les 5 bassins de lagunage (superficie 320 à 900 m²) d'un pilote expérimental destiné au recyclage du lisier de porc. Situé à l'est du bassin parisien (Aisne), ce pilote fonctionne avec une chaîne alimentaire complète dont les différents niveaux trophiques (algues, microcrustacés, poissons) sont élevés dans des milieux séparés. De nombreuses expériences à petite échelle ont été réalisées simultanément pour mieux déterminer la raison de certains dysfonctionnements observés dans les cultures algales du pilote. Les productivités algales (0,68 g MS m² j⁻¹ en hiver, 6 à 9 g MS m² j⁻¹ en été) peuvent être stimulées par des apports de CO₂, soit à partir d'une bouteille de gaz comprimé, soit en augmentant la turbulence, c'est-à-dire en favorisant la dissolution du CO₂ atmosphérique. L'enlèvement de la charge ammoniacale qui dépend de l'importance de la biomasse algale serait augmentée (avec des biomasses 4 fois plus importantes, l'enlèvement de la charge ammoniacale est multipliée par 8). L'effondrement de la population algale en été (> 15°C) n'est pas due à une consommation de la part des rotifères, mais plutôt à une sédimentation des cellules piégées par un mucus sécrété par certaines espèces de bactéries. Des expériences sont en cours pour faire connaître les facteurs qui inhibent la prolifération de ces bactéries. Les daphnies sont restées suffisamment abondantes en hiver (200 ind l⁻¹ environ) pour éliminer les algues apportées mais il n'y a eu aucun enlèvement de biomasse jusqu'à la fin du mois de mars. Les effectifs estivaux atteignent 1000 à 2700 ind l⁻¹ mais une arrivée trop brutale de la suspension algale ou d'eau chargée en nitrite provoque de fortes mortalités. Malgré d'importants effectifs de daphnies, il n'a pas été observé de réeutrophisation dans leurs élevages, ce qui permet d'envisager de réutiliser cet effluent directement sans passer par un bassin d'affinage empoissonné. Faute de sédiment (étancheification par une bâche en plastique), le milieu aquatique a été mal tamponné et les fortes variations des paramètres physiques (pH, oxygène dissous) ont été incompatibles avec la vie des gardons et des brochetons. Seules les carpes ont toléré ces conditions. Ces résultats montrent qu'un bassin d'affinage empoissonné ne peut se concevoir que sur un terrain imperméable, celui-ci étant alors pourvu de sédiment. Quelques modifications sont suggérées pour améliorer les performances de ce type de lagunage.

Applications of lagooning techniques for recycling pig manure

Biological and physico-chemical observations were carried out for a year in five lagooning pools (320-900 m²) of a pilot system recycling pig manure. The pilot facility, situated in the eastern part of the Parisian basin (Aisne), functions with a complete food web, each level (algae, microcrustaceans, fish) being bred in different pools. A number of small-scale experiments were also carried out to determine the reason why the algal pools did not function correctly. Algal productivity (0.68 g d.w. m² d⁻¹ during winter and 6-9 g d.w. m² d⁻¹ in summer) can be stimulated by adding CO₂ from a bottle of compressed gas or from atmospheric air introduced in the culture by increasing the turbulence. Removal of nitrogen, which depends on algal biomass, would be increased (with algal biomass 4 times higher, removal of nitrogen is 8 times higher). Predation by rotifers is not the cause of algal collapse in summer (>15°C). This collapse is due rather to some species of bacteria secreting a mucilaginous substance on which algae become stuck. Experiments were conducted to determine factors inhibiting the proliferation of these bacteria. Daphnids were sufficiently abundant in winter (about 200 ind l⁻¹) to eliminate any algae brought in. No biomass was removed until end of March. In summer, the number of daphnids reached 1000 to 2700 ind l⁻¹, but the sudden arrival of the algal suspension or poor quality water, high in nitrites, caused high mortality. A degradation in the water quality was not observed in the daphnid pools. It therefore seems possible to use their effluent directly without going through a polishing fish pond. Without sediment (all the pools are stanchied by plastic covering), variations of physical parameters (pH, dissolved oxygen) were incompatible with the survival of roaches or pike juveniles. Only carps were able to endure these conditions. Results show that a polishing fish pond can only take place on waterproof ground with sediment. Some modifications are suggested for improving the performance of this lagooning system.

INTRODUCTION

Le lagunage naturel est traditionnellement utilisé pour traiter les effluents urbains (environ 2000 installations en France). C'est un procédé d'épuration biologique qui a pour principe de convertir les matières organiques biodégradables en organismes vivants (algues, microcrustacés, invertébrés benthiques, poissons). L'effluent, préalablement traité (dégrillage, dégraisage, etc...), circule très lentement dans plusieurs bassins appelés "lagunes" où il est progressivement débarrassé des éléments nutritifs qu'il contient avant d'être rejeté dans le milieu naturel (rivière). Le système fonctionne donc en circuit ouvert.

Le recyclage du lisier de porc par lagunage avec utilisation de la chaîne alimentaire naturelle a déjà été appliqué en Italie (SALOMONI, 1991). Il est actuellement testé en France, mais le système français se différencie du pilote italien par son agencement beaucoup plus simple (5 bassins au lieu de 21) et par le fait que seules les microalgues planctoniques sont utilisées pour mobiliser les éléments nutritifs alors que des végétaux supérieurs (lentilles d'eau) interviennent, avec les microalgues, dans le procédé italien. Une autre différence réside dans le mode de prétraitement du lisier ; il est soumis à une filtration suivie d'une fermentation anaérobie en Italie, alors qu'il est déversé dans les cultures algales seulement après une double décantation (3 mois) dans le pilote français. On a cherché en effet à mettre au point un procédé simple, très rustique, facile à mettre en place et à gérer en aval d'un élevage porcin.

Les expériences ont eu lieu dans une station pilote au Centre de Recherches zootechniques appliquées de l'UCAAB (Aisne) mais de très nombreuses expérimentations à petite échelle (volumes utilisés : de quelques litres à 2000 l) ont aussi été effectuées, soit à proximité du pilote, soit au Muséum d'Histoire naturelle de Paris. Leur objectif était de faire une étude plus fine des points de blocage constatés sur le pilote et de chercher les moyens de les éliminer. Les résultats conduisent à faire des propositions concrètes concernant la configuration et la gestion du pilote expérimental.

1. MATÉRIEL

1.1. Le pilote expérimental

Il comporte cinq bassins dont la superficie totale en eau est de 2100 m² (figure. 1). Deux bassins de 40 x 8 m (BA1 et BA2) sont destinés à la culture des algues. La profondeur est de 0,80 m. Deux bassins de 32 x 9 m (BD1 et BD2) sont destinés à l'élevage des daphnies. Leur profondeur est de 1,6 m. Un bassin de 29 x 31 m (BP) et d'une profondeur de 2,4 m, utilisé comme bassin d'affinage, a été empoissonné avec 17,6 kg de carpes adultes d'un poids individuel de 600 g environ et 20 kg de juvéniles d'un poids individuel moyen de 100 g.

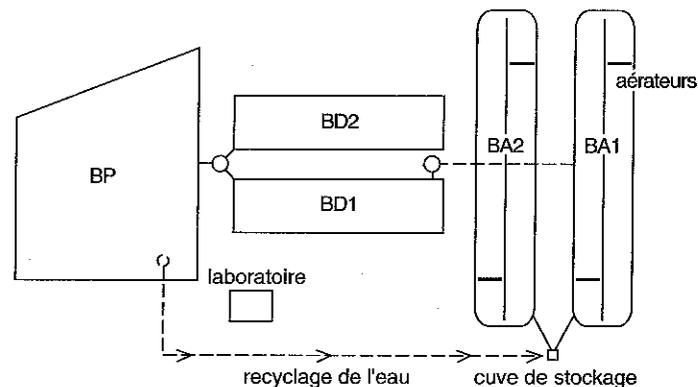
L'eau circule par gravitation de l'amont vers l'aval jusqu'au bassin empoissonné. Ce dernier n'a pu être utilisé que pendant une partie de l'année (29/9/92 - 27/4/93) avant qu'un épandage d'insecticide soit effectué pour détruire les daphnies qui s'y étaient développées en grand nombre (plus de 400 ind l⁻¹). La forte rémanence de ce produit (1) ayant rendu ce bassin

(1) L'utilisation de ce produit résulte d'une mauvaise information donnée par le vendeur. Il avait été annoncé une rémanence de 10 jours environ, alors qu'en fait, elle est de plusieurs mois.

inutilisable pendant tout l'été, il a été décidé d'affecter l'un des deux bassins d'élevage de daphnies à celui des poissons. À partir du mois de mai 1993 et jusqu'à la fin du mois d'août, le lagunage a donc fonctionné avec 4 bassins au lieu de 5, la superficie étant ainsi réduite de 900 m² environ.

L'eau des bassins de cultures d'algues est acheminée vers les élevages de daphnies au moyen d'un tuyau de 8 mm de diamètre qui débouche dans un regard ou se trouve un système permettant de régler le niveau de l'eau dans les bassins en aval. Dans les élevages de daphnies, un filtre en nylon (1 mm de vide de maille) est disposé au niveau de l'évacuation de l'eau pour éviter que les daphnies ne soient entraînées avec le flux dans le bassin terminal. L'eau est ensuite pompée dans ce dernier et réutilisée dans le système qui fonctionne donc en circuit fermé (figure 1).

Figure 1 - Le pilote expérimental de recyclage du lisier de porc.



Le volume d'eau dans les cultures algales a varié avec la saison. Pour chaque bassin, il a été de 158 m³ en hiver (profondeur : 60 cm) et de 100 m³ en été (profondeur : 40 cm). Il est en effet nécessaire de diminuer l'épaisseur de la couche d'eau en été pour favoriser la pénétration de la lumière, les cultures étant beaucoup plus denses qu'en hiver.

Le brassage des cultures algales a été assuré par deux hydroéjecteurs de marque FAIVRE (puissance respective : 1/3 de CV, et 1 CV). La circulation de l'eau est facilitée par une cloison médiane qui permet de canaliser le courant, et par les extrémités des bassins qui sont arrondies. Des essais ont été réalisés du 29 avril au 6 juillet 1993 en utilisant, dans l'un des deux bassins, un bullage partant du fond (tuyau percé de trous) placé d'un côté de la cloison médiane et sur toute la longueur du bassin tandis que de l'autre côté se trouvait un hydroéjecteur de 1 CV.

Le fond et les bords des bassins de cultures d'algues sont revêtus d'une bâche VLDPE (very large density polyéthylène) de 1 mm d'épaisseur, résistante aux ultra-violets. Elle repose sur un support en géotextile antipoinçonnant qui protège la membrane de toutes les parties agressives pouvant se trouver dans le sol.

Les deux bassins d'élevage de daphnies et le bassin d'affinage sont recouverts d'une bâche PEBD (polyéthylène basse densité) de 500 microns d'épaisseur. Une aération a été pratiquée de mai à septembre-octobre dans les élevages de daphnies ; elle a été assurée par un bullage partant du fond placé dans l'axe longitudinal du bassin.

Par rapport aux autres lagunages, ce pilote présente les particularités suivantes :

- il fonctionne en circuit fermé,
- les différents niveaux de la chaîne alimentaire (algues, zooplancton, poissons) sont dans des bassins complètement séparés, cette disposition évitant la compétition entre les différents groupes d'organismes, ce qui permet d'optimiser la biomasse à chaque niveau,
- tous les bassins sont revêtus d'une bâche en plastique en raison de la nature du sol. Faute de sédiment, le milieu est mal tamponné, tout apport fertilisant restant dans l'eau au lieu d'être absorbé par la vase puis relargué progressivement,
- les végétaux qui assurent l'épuration sont exclusivement des microalgues et non des végétaux supérieurs (lentilles d'eau) utilisés, avec les microalgues, dans le système italien.

La raison du choix des microphytes seuls tient au fait que la production des lentilles est très saisonnière (5 mois environ dans la moitié nord de la France, alors que les microalgues se développent toute l'année) et que leur utilisation est encore problématique.

1.2. Les apports de lisier

Avant son introduction dans les cultures algales, le lisier subit une double décantation, étape qui dure 3 mois et permet d'obtenir un effluent dont la teneur en matières sèches (MS) est de l'ordre de 1 %. Il est transféré par pompage dans une cuve en plastique de 4 500 l placée à proximité des cultures algales. Après avoir transité dans un bac de dilution de 250 l (dilution avec de l'eau provenant du bassin d'affinage), le lisier est déversé dans les cultures algales.

Les volumes apportés quotidiennement (avant dilution) dans chacun des deux bassins ont été déterminés en fonction de la capacité des microalgues à mobiliser les éléments nutritifs, c'est-à-dire en fonction de leur abondance : 150 à 200 l en octobre, 100 l du 30 octobre au 3 février, et 50 l pendant la période la plus froide (température en fin de matinée voisine de 3°C). Ils n'ont pas été interrompus pendant le gel (2 semaines fin décembre 92 - début janvier 93) alors qu'une couche de glace d'une trentaine de cm recouvrait les bassins. Au début du mois de mars, ils ont été portés à 100 l puis à 200 l j⁻¹. Des apports de 400 l j⁻¹ ont été tentés en avril, au début de la poussée printanière du phytoplancton mais, en moins d'une semaine, est apparue une forte sédimentation des algues. Compte tenu de la teneur élevée des éléments nutritifs dans le lisier, et des biomasses algales en présence, les apports n'ont pas pu dépasser 250 l j⁻¹ pendant l'été.

Le lisier a été dilué jusqu'à 100 fois pendant la période de lancement des cultures (octobre) puis la dilution a été ramenée à 60 et enfin à 40 fois environ. A deux reprises (en hiver et en été) le lisier a été déversé dans les cultures algales sans aucune dilution. Le mélange se faisant rapidement grâce au mouvement rotatif donné à la masse d'eau par les hydroéjecteurs, ce mode d'apport n'a pas causé de préjudice aux algues mais il est resté très limité dans le temps.

Le volume d'eau de dilution apporté doit assurer un renouvellement suffisant de l'eau de la culture algale afin de la maintenir en phase de croissance exponentielle, mais il ne doit pas être trop important afin d'éviter un lessivage de la culture.

Le volume déversé quotidiennement (flux) dans chaque bassin

a été généralement de 5 m³ en hiver et de 10 m³ en été, ce qui représente un temps de rétention de 40 jours dans le premier cas et de 15 jours environ dans le deuxième (les apports ont été réalisés 5 jours/semaine). Ce laps de temps a été nécessaire pour éviter le lessivage de la culture.

Le seul traitement appliqué au lisier a été une double décantation. Il n'a été soumis ni à un tamisage ni à une fermentation aérobie ou anaérobie. Les particules en suspension ont une taille inférieure à 40 µm.

Sa richesse en éléments polluants présente quelques variations mais elle est, en moyenne, nettement plus élevée que celle du lisier utilisé dans le pilote italien (SALOMONI, 1991 et sous-presse) :

Matières sèches :	1,07 % (2 fois plus que le lisier du pilote italien).
Azote ammoniacal :	2090 à 2371 mg l ⁻¹ (2 fois plus)
DBO5 :	5000 à 6500 mg l ⁻¹ (1,4 à 2,5 fois plus)
DCO :	14 000 mg l ⁻¹ (4 fois plus)
P ₂ O ₅ :	1600 mg l ⁻¹ (13,3 fois plus)
Cu :	1,66 mg l ⁻¹
Zn :	2,65 mg l ⁻¹

Compte tenu des fortes différences que l'on peut observer dans la composition chimique du lisier après différents types de prétraitement, il semble plus logique d'exprimer les quantités recyclées non en volume mais en charge polluante et notamment en charge ammoniacale puisque c'est essentiellement sous cette forme que l'azote est présent dans cet effluent.

2. MÉTHODES

Un suivi physico-chimique et biologique a été effectué une fois par semaine dans tous les bassins du 29/9/92 au 27/8/93. De mai à août 1993, un suivi quotidien a été réalisé dans les cultures algales et les élevages de daphnies. Les très nombreuses données se rapportant à cette dernière période (enlèvement de l'azote dans les cultures algales au cours d'un cycle nyctéméral, répartition des daphnies, suivi de la flore bactérienne etc...) sont en cours de traitement.

2.1. Mesures physico-chimiques

La température, l'oxygène dissous et le pH ont été mesurés avec un oxythermomètre et un pHmètre Ponselle. À partir du mois de février 1993, un hexaparamètre Ponselle muni de deux sondes a permis en outre un suivi en continu de ces 3 paramètres dans les deux bassins de culture algale. La sonde était maintenue en sub-surface par des flotteurs.

Les analyses chimiques ont été réalisées à partir d'un échantillon d'eau (prélevé en 4 points différents dans les 5 bassins) avec un spectrophotomètre Hach (DR/2000) et des réactifs de même marque. L'échantillon d'eau a été préalablement filtré sur filtre plissé Whatman 2 V (porosité : 0,8µm). Avant les dosages, des dilutions de 5 à 10 fois ont été nécessaires.

Les éléments mesurés ont été : l'azote ammoniacal (N-NH₄⁺) par la méthode de Nessler, le nitrate (N-NO₃⁻) par réduction au cadmium, le nitrite (N-NO₂⁻) par diazotation et l'orthophosphate (P-PO₄³⁻) par la méthode au molybdovanadate.

2.2. Mesures biologiques

Une estimation pondérale des microalgues desséchées a été réalisée toutes les semaines dans les bassins de culture algale. Un échantillon d'eau d'un volume de 50 à 150 ml, suivant l'abondance des algues, a été filtré sur filtre Whatman GFC en fibre de verre. Le filtre a été pesé avant et après la filtration avec une balance Sartorius (précision +/- 0,1 mg) après 24 h de dessiccation à 80°C.

La biomasse algale a aussi été estimée par la mesure des matières en suspension au spectrophotomètre (lecture à 810 nm de longueur d'onde sans addition de réactif).

Le zooplancton des cultures algales a été prélevé en 4 points par filtration d'un volume total de 10 litres à travers une poche collectrice en nylon de 40 µm de vide de maille. Ces récoltes étaient surtout destinées à s'assurer que les cultures algales n'étaient pas colonisées par les daphnies.

Dans les élevages de daphnies, un échantillon de 1 l a été prélevé en 12 points différents dont 6 étaient situés à proximité des bords et 6 dans la partie médiane. Le volume total (12 litres) a été filtré comme précédemment. Cet échantillonnage en de nombreux points est nécessaire en raison de la répartition très hétérogène de ces organismes.

La numération du zooplancton a été faite au microscope.

Pour maintenir dans le milieu une biomasse suffisante pour éliminer les microalgues apportées, il n'y a pas eu d'enlèvement de daphnies pendant toute la mauvaise saison, jusqu'au 24 mars, date à partir de laquelle elles ont été pêchées une fois par semaine avec un filet cône en nylon (vide de maille : 100 µm) de 2 m de long et 40 cm d'ouverture. La récolte des daphnies par filtration du volume d'eau déplacé quotidiennement entre leur bassin d'élevage et le bassin terminal est très aléatoire; leur répartition étant très hétérogène, un enlèvement de biomasse en un seul point peut être insuffisant ou trop important suivant que les organismes sont groupés à proximité du point de prélèvement ou à celui qui en est éloigné.

Dans un premier temps, les daphnies vivantes ont été utilisées dans une pisciculture voisine pour nourrir des brochetons, puis elles ont été distribuées à des poissons (brochetons ou gardons) élevés sur place dans des cages, les carpes étant laissées libres dans le bassin d'affinage.

3. RÉSULTATS

3.1. Température

Le site où est implanté le pilote est caractérisé par un climat de type continental, les hivers étant plus longs et plus rigoureux

que dans l'ouest de la France où est la plupart des élevages porcins. En 92-93, la température moyenne de l'air a été inférieure à 10°C pendant 6 mois (octobre à mars) et à 5°C de décembre à février. De début novembre à fin mars, il y a eu 76 jours où les températures matinales étaient négatives. Cependant, la période de gel a duré 2 semaines seulement. En mai et juin, les températures moyennes ont été de 21°C environ avec des maxima de l'ordre de 27°C. En juillet-août, elles sont restées relativement basses pour la saison (20°C environ).

3.2. Cultures des microalgues

Les microalgues vertes qui se développent dans de l'eau recevant un déchet organique et notamment du lisier de porc sont des Chlorococcales. Leur taille est inférieure à 30 µm. Il s'agit d'espèces très cosmopolites caractérisées par leur affinité pour les milieux eutrophes et par leur mode de nutrition (mixotrophie) qui leur permet d'assimiler l'azote minéral, essentiellement sous forme ammoniacale, mais aussi l'azote organique sous forme dissoute ou particulaire (DROOP, 1974 ; AMBLARD, 1991).

Le bon fonctionnement du lagunage, c'est-à-dire un enlèvement satisfaisant de la charge polluante, dépend essentiellement de l'importance de la biomasse algale (tableau 1).

Tableau 1 - Enlèvement de la charge ammoniacale en fonction de la biomasse algale (données provenant du pilote).

MS algues (mg l ⁻¹)	Enlèvement NH ₄ ⁺ (g m ³ j ⁻¹)
50	0,5 -0,6
100	2,6 -2,9
200-250	4,1 -4,7

Or, la productivité des microalgues varie en fonction des conditions climatiques et, dans une large mesure, du mode de gestion de la culture (brassage, apports de gaz carbonique, temps de rétention hydraulique).

• Température

Le rôle bénéfique d'un réchauffement sur le développement algal a été décrit dans tous les milieux aquatiques des régions tempérées : lacs (CAPBLANC, 1982), étangs piscicoles (SEVRIN-REYSSAC et GOURMELEN, 1984), lagunages d'effluents urbains (GUERRIN, 1990) ou d'effluents de porcherie (SALOMONI, 1991). Le déclin numérique des microalgues a lieu en octobre-novembre et un nouveau développement en mars-avril (poussée printanière). Les productivités algales dans les bassins du pilote ont été 10 fois plus élevées en été qu'en hiver (tableau 2).

Tableau 2 - Variations saisonnières des biomasses et des productivités algales dans les cultures du pilote expérimental

Période	Biomasse (mg MS l ⁻¹)	Productivité (mg MS l ⁻¹ j ⁻¹)	Productivité (g MS m ² -1 j ⁻¹)
Hiver	50-60	1,14	0,68
Printemps	140-150	> 6	3,34
Été	200-250	15-20	6-9

La productivité estivale a été proche des valeurs obtenues par BASSÈRES (1990) dans le sud de la France (Saint Jean Pied-de-Port) pendant la période la plus favorable (10,8 g MS m² j⁻¹).

Compte tenu de l'importance de la température sur le développement des microalgues, il est donc préférable de débiter une culture au printemps. Des expériences à petite échelle (volume des cultures 10-15 l) ont montré une augmentation de la biomasse algale de 68,7 % en 18 jours en janvier-février 1993 (températures 6 à 8°C) et de 99,8 % dans le même laps de temps mais au mois d'août (>20°C).

- Mode de gestion de la culture algale (brassage, apport de CO₂)

Il est apparu que le brassage utilisé dans les bassins du pilote était insuffisant pour obtenir de très importantes biomasses algales.

En effet le carbone d'origine minérale (CO₂) apporté par l'activité bactérienne et par dissolution à partir de l'atmosphère a toujours été limitant, quelle que soit la saison. Les mesures en continu (hexaparamètre) montrent que le pH est généralement supérieur à 8,3, valeur au-dessus de laquelle il n'y a plus de CO₂ libre dans l'eau (figure 2).

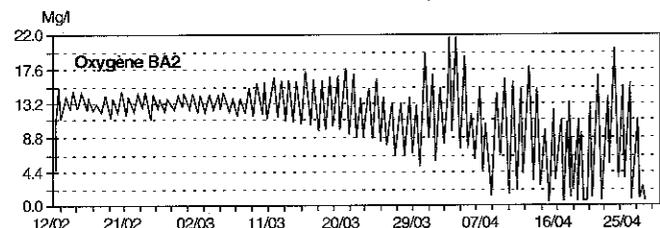
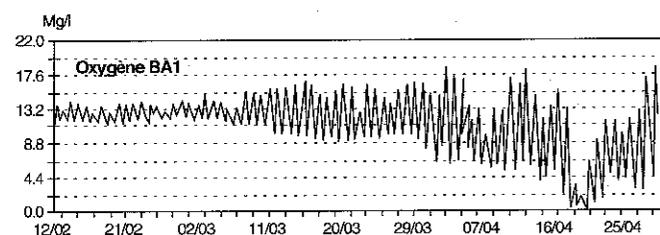
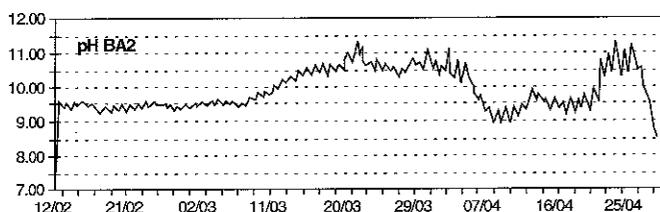
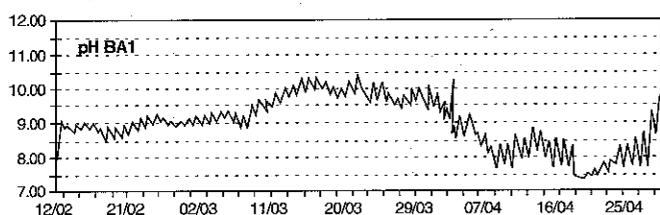
Du 29 avril au 6 juillet 1993, l'augmentation de la turbulence dans l'un des bassins par un système de bullage partant du fond a stimulé fortement le développement algal (figure 3). La biomasse moyenne a été de 213 mg MS l⁻¹ dans la culture bénéficiant d'un bullage partant du fond et de 109 seulement dans l'autre bassin.

D'autres résultats obtenus à petite échelle à proximité du pilote (3-23 août 93) confirment l'action stimulante de la turbulence sur le développement algal, mais il faut cependant préciser que, dans le cas de la culture «in vitro» l'abaissement de la profondeur a aussi joué un rôle positif. Il n'y a eu aucun

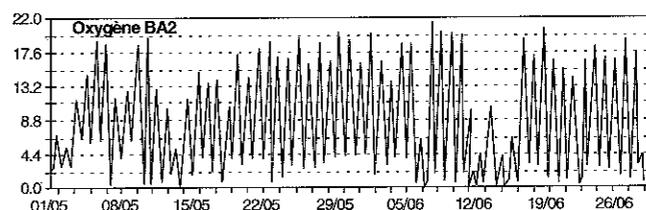
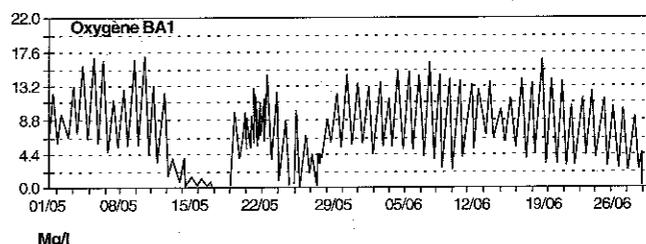
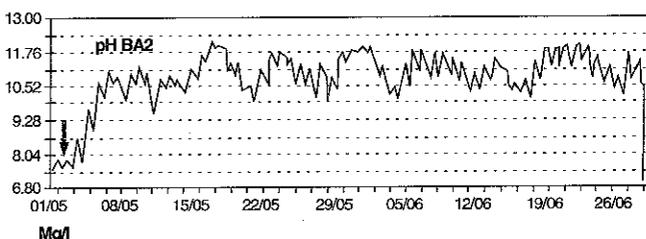
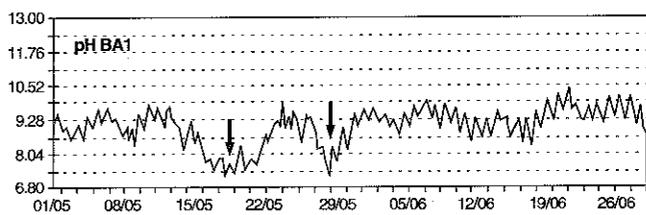
Figure 2 - Variations du pH et de l'oxygène dissous mesurées à l'hexaparamètre dans les deux bassins de culture algale (BA1 et BA2).
du 12/2/93 au 25/4/93 et du 1/5/93 au 26/6/93.

(Les flèches indiquent les périodes pendant lesquelles une forte sédimentation des algues a été constatée).

Période Février - Avril 1993



Période Mai - Juin 1993



enlèvement de biomasse pendant la durée de l'expérience (tableau 3).

L'effet stimulant d'une forte turbulence sur le développement algal a aussi été constaté en hiver. Avec des températures de 6 à 7°C (janvier-février 1993), un doublement de la biomasse a été obtenu au bout de 31 jours dans des milieux non brassés (volume des cultures : 15 l) et de 8 jours seulement dans les milieux brassés (SYLVESTRE et al., sous-presse).

Un apport de CO₂ à partir d'une bouteille de gaz comprimé dans des cultures de même volume a aussi donné de bons résultats (figure 4) mais cette méthode pose un problème de gestion qui sera discuté.

L'insuffisance du brassage dans les cultures algales du pilote s'est aussi traduite par la fréquente apparition de conditions anoxiques (ou de teneurs très faibles en oxygène) en surface au début de la matinée (figure 2). Si ces faibles teneurs ne nuisent pas aux algues, elles favorisent le développement de bactéries dénitrifiantes qui réduisent le nitrate en nitrite très toxique. Un déversement dans les élevages de daphnies peut alors provoquer une forte mortalité (voir ci-après).

Figure 3. - Action d'une augmentation de la turbulence sur des cultures algales (29/4/93-6/7/93). Le bassin BA1 est muni de deux hydroéjecteurs, le bassin BA2 d'un hydroéjecteur et d'un bullage par le fond sur toute la longueur du bassin. Résultats portant sur les matières sèches (MS).

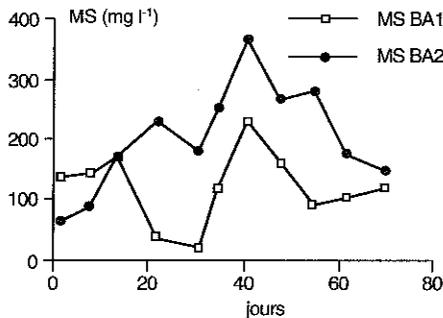


Figure 4 - Action des apports de CO₂ sur les cultures algales pendant l'hiver : apports les 20 et 28 janvier, 5 et 22 février.

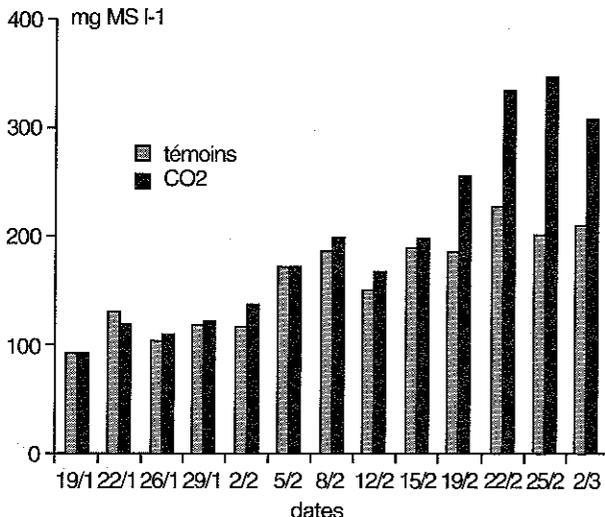


Tableau 3 - Comparaison des résultats obtenus du 3 août au 23 août 1993 (résultats en mg MS l⁻¹).

DATE	in vitro (1)	in situ (2)
03-8-93	87	87
10-8-93	315	157
17-8-93	730	185
23-8-93	1020	117

(1) In vitro dans une culture de 10 l placée sous conditions extérieures (brassage par diffuseur d'aquarium, hauteur d'eau : 12 cm)

(2) In situ dans un bassin du pilote (brassage par un hydroéjecteur et un bullage partant du fond, hauteur d'eau 40 cm)

3.3. Dysfonctionnement des cultures algales

En hiver, lorsque la température est inférieure à 8-10°C, les apports de lisier ne sont pas suivis de proliférations de bactéries, les températures basses défavorisant ces microorganismes dans la compétition qui les oppose aux algues (ZIMMERMANN, 1990). Aucun phénomène de floculation algale n'a été constaté de septembre 1992 à avril 1993.

Avec l'augmentation de la température au mois d'avril (de 11 à 19°C entre le 15 et le 29), les apports de lisier ont provoqué un fort développement de bactéries. Or, certaines espèces secrètent du mucus. Elles appartiennent aux genres *Aeromonas*, *Pseudomonas*, *Acinetobacter* et *Serratia*. Elle ne sont pas pathogènes mais il est possible que leur présence, et surtout leur abondance, soit un des facteurs responsables de la floculation des algues. En effet, celles-ci s'accrochent au mucus qu'elles secrètent pour former des amas de 20 à 400 µm qui sédimentent quelle que soit l'importance de la turbulence. Ces amas muqueux sont déjà perceptibles à l'oeil nu. Avec un microscope, on distingue les bactéries et les microalgues d'une taille allant de 2 à 20 µm qui y sont accolées.

Une interruption immédiate des apports de lisier dès qu'un changement de la coloration de l'eau est observé (du vert au vert-jaune), permet d'arrêter la sédimentation des microalgues et de revenir aux conditions initiales (tableau 4), le temps nécessaire pour y parvenir dépend des conditions climatiques et notamment de la température.

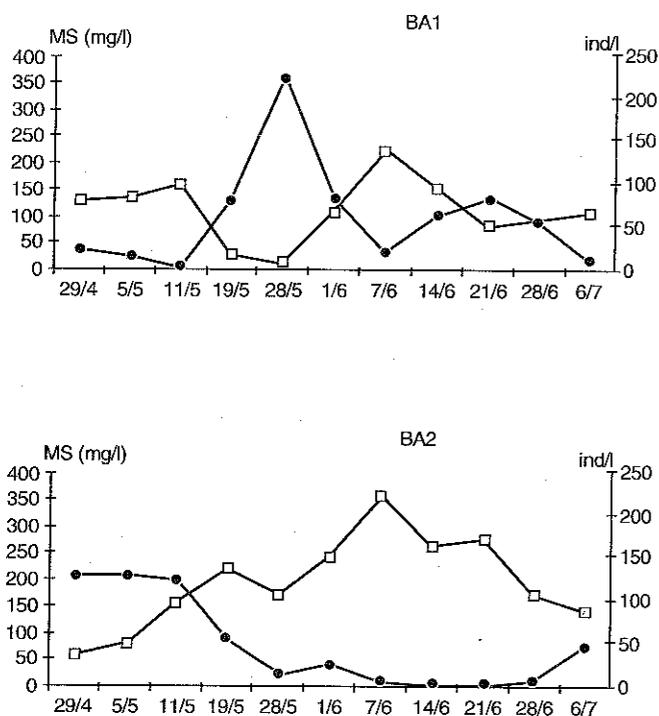
Tableau 4 - Évolution de la biomasse algale (mg MS l⁻¹) dans les deux bassins (BA1 et BA2) lors de proliférations de bactéries secrétant un mucus (1)

BA1		BA2	
Dates	biomasse	Dates	biomasse
11-5	160	22-4	203
19-5	19	29-4	54
28-5	12	5-5	79
1-6	108	11-5	57
7-6	220	19-5	220

(1) Dans le BA1, les apports de lisier ont été interrompus le 17 mai et repris le 1 juin, dans le BA2, ils ont été interrompus le 27 avril et repris le 6 mai.

La sédimentation des algues s'accompagne d'une baisse du pH et de la concentration en oxygène dissous (figure 2), ce qui rend les conditions favorables aux rotifères, organismes microfiltreurs du zooplancton qui sont essentiellement bactériophages (figure 5). Leur disparition a ensuite été spontanée sans qu'il ait été nécessaire d'appliquer un traitement chimique comme le suggèrent GNUDI et al. (1991). Cette disparition est probablement consécutive à une diminution des ressources trophiques (bactéries, matières organiques dissoutes). Les microalgues reprennent alors le dessus et les apports de lisier sont poursuivis.

Figure 5 - Évolution du nombre des rotifères (trait gras) en fonction de la biomasse algale dans les deux bassins de cultures algales BA1 et BA2.



3.4. Sédimentation des algues

Deux types d'observations ont été réalisées :

- d'une part pour mesurer la quantité de cellules sédimentées dans un intervalle de 24 h en fonction du mode de brassage des cultures (récolte des cellules dans des récipients en plastique placés au fond),
- d'autre part pour estimer quelle quantité de sédiment pouvait se trouver au fond après une année de fonctionnement (prélèvements en siphonnant le sédiment en plusieurs points sur une surface connue).

Dans un intervalle de 24h, le poids de matière sèche des cellules sédimentées a été très faible dans les milieux brassés (bassins du pilote) et non brassés (récipients en plastique : 30 à 54 mg MS/m² et 23 à 145 mg MS/m² respectivement dans les deux bassins et de 13 à 25 mg MS/m² dans les témoins. Les valeurs plus élevées trouvées dans certaines récoltes sont dues probablement à la remise en suspension du sédiment par des organismes benthiques (chironomes) très abondants dans les bassins mais absents dans les enceintes témoins.

Après une année de fonctionnement, la quantité de matière déposée au fond a été négligeable : 2,43 g MS/m² dans le bassin BA1, ce qui signifie que les cellules mortes et sédimentées sont reprises par l'activité bactérienne et recyclées in situ. La valeur plus élevée (15,98) trouvée dans le bassin BA2 est due à une floculation des algues pendant la période du 2 au 9 août, c'est-à-dire quelques jours avant le prélèvement.

3.5. Colonisation des cultures algales par le zooplancton

Les cultures algales ont été colonisées par des rotifères uniquement à la suite d'une importante sédimentation (figure 5). Ces résultats confirment ceux obtenus antérieurement dans des cultures de 700 l réalisées au Muséum (FARNAULT et PEDRO, 1991 ; DABBADIE, 1992) à savoir que le développement des rotifères est une conséquence de l'effondrement de la biomasse algale et non une cause comme le suggéraient SALOMONI (1991) ainsi que GNUDI et al. (1991). L'application d'un traitement chimique conseillée par ces derniers auteurs n'est donc pas justifiée.

Quant aux daphnies, introduites parfois en assez grand nombre à partir du bassin terminal, elles n'ont pas pu survivre aux conditions du milieu : pH très élevés, forte densité algale, cette surabondance de nourriture provoquant un engorgement de leur appareil filtreur. Il n'a été récolté que quelques carapaces vides ou appendices dont la quantité a été trop faible pour porter préjudice aux microalgues.

La colonisation des cultures algales par le zooplancton filtreur, et notamment par les daphnies, n'est donc pas à craindre même si des élevages intensifs se trouvent à proximité.

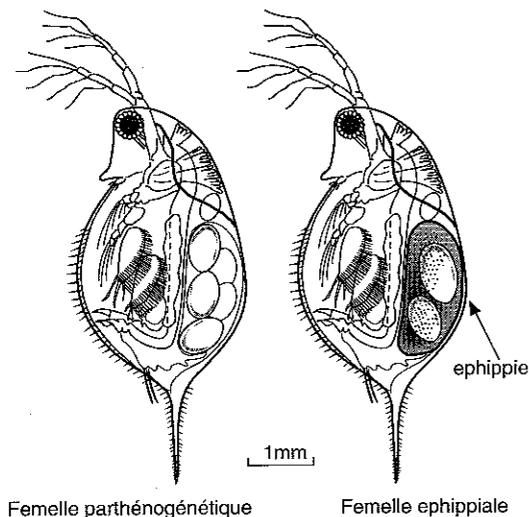
3.6. Élevages des daphnies (*Daphnia magna*)

Microcrustacés de la famille des Cladocères, les daphnies ont une taille relativement importante (6 à 7 mm pour les adultes) par rapport aux autres organismes du zooplancton des eaux douces (figure 6). Elles tolèrent bien les pollutions organiques et pullulent pendant l'été dans les plans d'eaux chargés de déchets d'élevages ou domestiques. Toutefois, elles sont très sensibles aux pollutions chimiques, ce qui les fait utiliser dans les tests de toxicité. Leurs caractéristiques biologiques les plus marquantes sont d'abord leur grande capacité de filtration (50 à 80 ml j⁻¹ pour l'adulte) ce qui leur permet d'ingérer des quantités considérables d'algues, leur deux modes de reproduction : parthénogénétique (conditions favorables) et sexué (conditions défavorables), et leur grande prolificité. Sur le plan de la valeur alimentaire, les daphnies passent pour être la meilleure nourriture à donner aux alevins de poissons ornementaux ou de consommation, à des crustacés et même à des animaux terrestres (de LA NOÛE et PROULX, 1986 ; BAILLY et al., 1989 ; GUERRIN, 1988, 1990 ; SEVRIN-REYSSAC, 1993).

Comme celle des algues, la productivité de l'élevage dépend essentiellement des conditions climatiques et du mode de gestion.

Il est bien connu que la production de daphnies est saisonnière car le temps de génération des organismes est plus long dans les eaux froides : 21 jours à 10°C, et 8 jours seulement à 20°C (DE PAUW et al., 1980 ; MYRAND et de LA NOÛE, 1982 ; GUERRIN, 1980, SALOMONI, 1991). La faible productivité hivernale a conduit à ne pratiquer aucun enlèvement de biomasse jusqu'à la fin du mois de mars. Il a ainsi été possible

Figure 6 - La grande daphnie (*Daphnia magna*). Individu adulte avec ses deux modes de reproduction : parthénogénétique et sexué, ce dernier aboutissant à la formation d'oeufs de résistance (éhippies).



de maintenir des effectifs suffisamment importants (160 à 190 ind l⁻¹ en janvier-février) pour assurer un enlèvement des microalgues apportées. De plus, l'apport régulier de microalgues a permis de conserver aux daphnies le mode de reproduction parthénogénétique habituel à l'espèce en conditions favorables (< 1% de femelles ehippiiales). C'est cependant avec l'augmentation de la température (> 6°C) que les populations sont devenues très importantes (400 ind l⁻¹ en mars, plus de 800 en avril). Les plus forts effectifs ont été trouvés en été (1000 à 2700 ind l⁻¹), saison pendant laquelle il faut pratiquer un enlèvement de biomasse tout en maintenant dans l'élevage des effectifs de l'ordre de 700 à 900 ind. l⁻¹ pour éliminer les microalgues dont la densité est alors très élevée.

La répartition des daphnies dans l'espace a toujours été très hétérogène. Les récoltes et les numérations effectuées en 12 points différents dans le même bassin montrent des différences d'effectifs pouvant aller de quelques individus à 2000 par litre.

La dégradation des conditions du milieu dans le bassin d'élevage a parfois entraîné une baisse importante des effectifs. Cette dégradation était due au mode d'apport des microalgues ou à la mauvaise qualité de l'eau provenant des cultures algales.

En effet, les observations réalisées les 19 et 21 juillet sur le pilote ont montré qu'un apport important réalisé en un seul point provoque un stress aux daphnies qui entraîne de fortes mortalités et la formation d'oeufs de résistance ou éhippies. Des dispositifs ont été mis en place pendant 24 h aux deux extrémités d'un bassin d'élevage pour récolter ces oeufs de durée en décanation. Leur nombre a été beaucoup plus élevé à proximité du point de l'arrivée des algues (12 000 à 20 000 m⁻²) qu'à celui qui en est le plus éloigné (2000 à 2700 m⁻²). On constate cependant que, même au point le plus éloigné du déversement des algues, les conditions restent mauvaises pour les daphnies qui, surtout pendant l'été, ne devraient pas former d'oeufs de résistance.

Par suite du brassage insuffisant des cultures algales et de la désoxygénation temporaire qui en résulte (figure 2), il est arrivé

qu'une partie de l'azote soit sous forme de nitrite. De telles conditions sont apparues à deux reprises. Tout d'abord du 5 au 25 novembre 1992 (bassin BA2) avec des teneurs en NO₂ allant de 4 à 6 mg l⁻¹. Ces conditions sont léthales pour les daphnies puisque, après une exposition de 96 h à 18-21°C, la DL 50 est de 5,2 mg l⁻¹ pour les individus adultes et de 1,7 mg l⁻¹ pour les juvéniles (De Pauw et al, 1980). Les daphnies sont en effet devenues très rares (< 1 ind l⁻¹) et étaient même absentes dans plusieurs récoltes. La deuxième poussée de nitrite a été observée dans les deux bassins le 30 juillet (5,3 et 5,2 mg l⁻¹ de NO₂). Elle a été plus brève que la précédente (24h) en raison vraisemblablement de températures plus élevées. Cette eau, déversée chez les daphnies, a provoqué une importante mortalité, le nombre des individus passant de 930 à 17 par litre dans un intervalle de 4 jours.

Ces résultats montrent que l'insuffisance de l'agitation des cultures algales peut aussi entraîner des perturbations importantes dans les bassins en aval. Ils conduisent aussi à proposer d'autres modalités d'apports d'algues chez les daphnies afin de maintenir des productions élevées.

3.7. Bassin d'affinage empoisonné

Faute de sédiment, le milieu aquatique est mal tamponné, ce qui rend très difficile la gestion de ce bassin. Cette difficulté tient bien à cette caractéristique et non à la situation de ce bassin en aval d'un élevage de daphnies. La qualité chimique de l'eau (teneurs en N-NH₄, N-NO₂, N-NO₃, P-PO₄³⁻) a été satisfaisante quelle que soit la saison (tableau 5). Les teneurs élevées en azote ammoniacal constatées en début d'expérience (29/9/92) provenaient d'apports excessifs de lisier qui avaient provoqué une dégradation de la qualité de l'eau dans tous les bassins. Il semble que ce sont surtout les pH très élevés (10 à 11) qui soient responsables de la mort des brochetons et des gardons dont l'élevage a été tenté en cage. Un pH de 11 entraîne en effet la mort de la plupart des espèces de poissons (BOYD, 1982). Seules les carpes, dont la grande tolérance à de mauvaises conditions est bien connue, ont pu supporter ces conditions. Cependant, elles ont mal maîtrisé la population de daphnies, soit que l'empoisonnement initial était insuffisant, soit que les mauvaises conditions du milieu aient réduit l'appétence des poissons. La prolifération des daphnies a entraîné une importante baisse du phytoplancton et par conséquent un fort déficit en oxygène. En l'absence de macrophytes, les microalgues étaient les seuls végétaux pouvant enrichir le milieu en oxygène. Cette évolution n'apparaît pas dans les milieux naturels pourvus de sédiment, étangs de pisciculture par exemple. Ainsi, dans ces derniers, les cladocères filtreurs de grande taille (*Daphnia longispina*, *Daphnia pulex*) sont abondants avant l'empoisonnement ou lorsque la charge en poissons est encore très faible, mais ils disparaissent rapidement lorsque l'empoisonnement est réalisé sans qu'il soit nécessaire d'appliquer un insecticide. L'eau perd alors sa transparence à mesure qu'elle se charge de phytoplancton. Cette évolution, bien connue des pisciculteurs, a été décrite par de nombreux auteurs (synthèse in POURRIOT, 1982).

L'utilisation d'un bassin d'affinage empoisonné ne paraît donc réalisable que sur sol d'argile naturelle.

3.8. Qualité chimique de l'eau dans les différents bassins

Dans la mesure où les apports de lisier dans les cultures algales sont bien raisonnés, et qu'il est tenu compte, pour les déterminer, de l'importance de la biomasse algale, il n'y a pas une

Tableau 5 - Qualité de l'eau dans les différents bassins en hiver et en été (mg l⁻¹) (1) (2)

	BA1	BA2	BD1	BD2	BP
HIVER (1)					
N-NH ₄ ⁺	6,1	4,6	2,5	2,2	0,9
N-NO ₂ ⁻	0,6	0,6	0,1	0,1	0,008
N-NO ₃ ⁻	7,3	6,9	7,7	6,3	6,3
PO ₄ ³⁻	9,9	4,1	6,5	6,3	5,1
ÉTÉ (2)					
N-NH ₄ ⁺	1,4	1,2		1,8	0,4
N-NO ₂ ⁻	0,4	0,2		0,4	0,06
N-NO ₃ ⁻	7,9	4,0		6,5	1,7
P-PO ₄ ³⁻	7,6	2,7		3,7	3,3

(1) (moyennes des valeurs obtenues du 3/12 / 92 au 29/4/93)

(2) (moyennes des valeurs obtenues du 7 / 7 / 93 au 27 / 7 / 93)

Pour cette dernière période la forte teneur en nitrite du 30 juillet dans les cultures algales (5,2 et 5,3 mg l⁻¹) n'a pas été prise en compte dans le calcul de la moyenne en raison de son caractère accidentel.

dégradation de la qualité de l'eau dans les élevages de daphnies comme on pouvait le craindre puisque ces organismes, comme tous les êtres vivants, rejettent dans leur environnement, les produits de leur métabolisme (tableau 5). Ces résultats confirment ceux de FARNAULT et PEDRO (1991) à savoir que les daphnies exerceraient sur leur environnement un effet épurateur en consommant un grand nombre de bactéries qui se développent à la faveur des rejets de leur métabolisme. Cette action sur l'environnement est aussi reconnue et même utilisée pour éliminer directement les effluents d'élevage (DE PAUW et al., 1980), et notamment le lisier de porc (TEO et al 1993).

On s'est posé la question de savoir s'il était possible de relancer une culture algale intensive en utilisant directement l'effluent des élevages de daphnies. Les premiers résultats au laboratoire laissaient penser qu'une substance contenue dans cet effluent avait un effet inhibiteur sur les algues, mais des travaux postérieurs réalisés aussi au laboratoire ont permis de voir qu'il n'en était rien. L'effet inhibiteur sur les algues, précédemment constaté, était dû vraisemblablement aux carapaces vides et aux fragments d'appendices de daphnies que le brassage remettait en suspension. Ces résultats sont d'ailleurs confirmés par l'évolution du bassin d'affinage du pilote après l'épandage d'insecticide (octobre 1992 et avril 1993). Dans les deux cas, après l'élimination d'importantes populations de daphnies (300-400 ind. l⁻¹), les microalgues se sont très rapidement développées. Il semble donc possible d'envisager un autre agencement de ce type de lagunage qui serait dépourvu de bassin d'affinage.

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Au cours de cette première année, le pilote n'a pas fonctionné en "routine". De nombreux essais ont été tentés concernant la modalité des apports de lisier, les volumes apportés, les dilutions, le mode de brassage des algues etc... Les causes de dysfonctionnement ont pu ainsi être établies et les moyens de les éviter ont été en partie déterminés.

La difficulté de ce type de lagunage réside dans la gestion des

cultures algales, surtout si elle sont réalisées sur une faible superficie par rapport aux volumes de lisier déversés. Il faut se donner les moyens d'intensifier ces cultures, notamment en leur fournissant le carbone qui leur manque. L'utilisation d'une sphère de CO₂ placée à proximité des bassins nécessite une automatisation et notamment une sonde enregistrant le pH en continu. Une augmentation de la turbulence a l'avantage de la facilité et de l'efficacité, même pendant l'hiver.

Les résultats obtenus dans les cultures algales du pilote montrent qu'il est nécessaire d'augmenter la turbulence pour obtenir des productivités plus élevées et par conséquent un meilleur enlèvement des éléments polluants. Un bullage partant du fond à partir d'un tuyau percé de trous placé dans l'axe du bassin est un moyen simple et efficace mais d'autres procédés peuvent être testés. Si l'épuration se fait uniquement en utilisant des microphytes, il faut prévoir une superficie plus importante pour les cultures algales : au moins 50 % de la superficie totale en eau du lagunage, alors que dans le cas du pilote la superficie en eau des cultures algales représente seulement 30 %.

Lorsque des hydroéjecteurs sont utilisés en complément d'un bullage par le fond, ce qui est souhaitable car ils donnent un mouvement rotatif à la masse d'eau, il faut prévoir, à l'endroit où ils seront placés une profondeur plus importante d'une vingtaine de centimètres et sur quelques mètres carrés pour qu'ils puissent fonctionner dans de bonnes conditions. Il sera alors possible d'abaisser à 30 cm la hauteur de la culture algale en été, ce qui contribuera aussi à favoriser la productivité. De plus, lors de la vidange et du nettoyage du bassin, un pompage pourra se faire dans cette partie plus profonde.

Il est nécessaire de disposer de deux bassins de culture algale au moins afin de pouvoir relancer éventuellement la culture en cas de défaillance de l'un d'eux. Dans l'état actuel des connaissances, un revêtement en plastique doit être placé sur le fond et les bords des bassins.

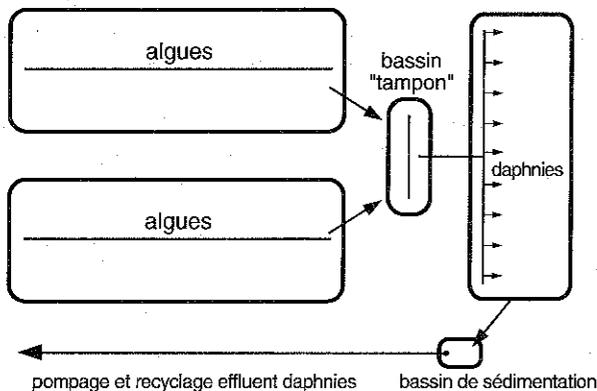
Une attention particulière a été portée aux phénomènes de floculation des algues qui se produisent lorsque la température devient supérieure à 15°C. Il semble bien que ces floculations

soient dues aux sécrétions muqueuses de certaines bactéries. Cet aspect des relations algues-bactéries fait désormais l'objet de nombreux travaux au laboratoire afin de déterminer les facteurs du milieu qui jouent un rôle sur la prolifération de ces bactéries.

Quels que soient les prétraitements auxquels le lisier est soumis avant son introduction dans les cultures algales, il est essentiel de déterminer sa composition chimique, le rapport N/P, la teneur en matière sèche ainsi que les variations au cours de l'année. Des essais récents réalisés au Muséum avec du lisier soumis à une filtration très poussée ($8\ \mu\text{m}$), ont montré qu'il était beaucoup moins favorable à la croissance des microalgues que le lisier non filtré en raison notamment de sa plus faible teneur en phosphore.

Pour éviter à un éleveur un contrôle fréquent de la qualité de l'eau, contrôle facile cependant grâce aux kits vendus dans les maisons spécialisées, il faudrait prévoir un bassin intermédiaire entre les cultures algales et le ou les élevages de daphnies (figure 7). Son volume serait égal au moins au volume maximum du flux quotidien provenant des bassins algues ($20\ \text{m}^3$ dans le cas du pilote). La suspension algale y serait soumise à une forte turbulence (ou à un apport de CO_2) qui permettrait d'affiner l'épuration. Le contrôle de la qualité de l'eau, avant son déversement dans les élevages de daphnies, se ferait uniquement dans ce bassin. À partir de celui-ci, l'eau s'écoulerait dans le bassin aval en continu mais avec un faible débit et par un système de trop plein.

Figure 7 - Proposition d'aménagement d'un lagunage comportant des cultures algales et un élevage de daphnies mais dépourvu de bassin d'affinage empoissonné. Un bassin intermédiaire "tampon" entre les cultures algales et l'élevage de daphnies permet d'affiner l'épuration de la suspension algale et de déverser celle-ci de façon continue dans le bassin aval.



La modalité des apports d'algues dans les élevages de daphnies du pilote, doit être modifiée. Au lieu d'être déversées en un seul point, les microalgues doivent être apportées sur toute la longueur du bassin à l'aide, par exemple, d'une dalle en plastique dont l'un des bord serait dentelé ou percé de trous (figure 7).

On peut prévoir un seul bassin pour les daphnies, ce qui diminue le coût de la construction. Il est préférable qu'il soit sur un terrain imperméable (c'est-à-dire non bâché), toujours en raison de l'effet tampon de la vase qui permet d'atténuer les conséquences d'une erreur de gestion.

Le caractère très hétérogène de la répartition des daphnies a encore été confirmé. Elles ont tendance à se grouper en essaims qui migrent horizontalement et verticalement dans la couche d'eau au cours de la journée. Un enlèvement de ces organismes en un seul point du bassin (filtration de l'eau du flux) ne permet pas, par conséquent, un enlèvement rationnel de la biomasse. Si les daphnies sont groupées près du point d'écoulement de l'eau, la biomasse enlevée sera trop importante, et si l'essaim est à l'autre extrémité du bassin, il n'y aura qu'un faible enlèvement. Calculer la productivité d'un élevage en pratiquant une récolte par ce seul moyen donne donc des résultats totalement erronés. Un autre mode de prélèvement facile doit être utilisé. Différents modèles automatiques (pompage et filtration) ont été proposés (BARNABÉ, 1980; VIGNES, 1992). On peut aussi attirer les organismes avec un éclairage (lampe de 100 W) et les pêcher manuellement avec une épuisette ou automatiquement avec un pompage suivi d'une filtration. Le moyen le plus facile pour un éleveur consiste à observer la position des essaims en fonction du moment de la journée et à effectuer la récolte directement à leur niveau avec une épuisette s'il y a lieu.

En apportant des microalgues en quantité adéquate, on maintient en hiver une population de daphnies suffisante (100 à $200\ \text{ind}\ \text{l}^{-1}$) pour éliminer les microalgues apportées, mais il faut éviter de les pêcher jusqu'au printemps (fin mars pour l'année 1993) et ne débiter cet enlèvement que lorsque les effectifs sont supérieurs à $700\ \text{ind}\ \text{l}^{-1}$.

Un bassin empoissonné ne peut être mis en place que sur terrain imperméable, non seulement en raison du coût de l'étanchéification par bâche en plastique, mais surtout en raison des particularités du milieu aquatique en l'absence de sédiment (eaux non tamponnées).

Compte tenu du fait que la plupart des éleveurs de porc ne souhaitent pas élever des poissons, il faut s'attacher à trouver les moyens d'éliminer ce bassin d'affinage en recyclant directement l'effluent issu de l'élevage de daphnies. Les résultats des premières expériences tendent à montrer que cela est possible, mais les recherches continuent sur ce sujet pour voir si l'on peut confirmer la faisabilité de ce mode de gestion. Il n'en reste pas moins évident que, s'il existe déjà sur le site un plan d'eau destiné à l'irrigation et empoissonné (étang collinaire par exemple), lequel reçoit parfois des déchets d'élevage, il peut être intégré au système en tant que bassin d'affinage.

Ce type de lagunage présente une grande souplesse d'utilisation. Il peut s'adapter à l'environnement et aux besoins de l'éleveur (SEVRIN-REYSSAC, 1992).

REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre d'un programme de recherche soutenu financièrement par le Ministère de la Recherche et de la Technologie et par le Ministère de l'Agriculture et de la Forêt. Il a regroupé différents partenaires français (Muséum d'Histoire naturelle, UCAAB, ITP, ACTA, ITAVI, INA-PG) et canadiens (Université Laval, Québec), l'intervention de ces derniers se situant dans le cadre d'accords franco-québécois financés par le Ministère des Affaires Étrangères.

Nous remercions tout particulièrement les techniciens de l'UCAAB et les étudiants qui ont participé à la gestion et aux différents travaux menés sur le pilote.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AMBLARD C., 1991., *Ann. Biol.*, 30, 74-107.
- BARNABE G., 1980. Système de collecte de zooplancton à l'aide de dispositifs autonomes et stationnaires. In : *La pisciculture en étang*, INRA (éd), Paris, 215-220.
- BAILLY F., COPIN Y., FRANCOIS C., ROLS S., 1989. *Aqua-Revue*, 26, 25-30.
- BASSERES A., 1990. Performance des microphytes et des macrophytes dans l'épuration d'effluents organiques à forte charge en ammoniacale. Thèse Doc. Spéc. Hydrobiol. Univ. Paul Sabatier, Toulouse, 298 p.
- BOYD C.E., 1982. Principles of water quality. In : *Water quality in warmwater fish ponds. Developments in aquaculture in fisheries science*. Boyd (ed), Elsevier Sci. Publish. Company, 3-47.
- CAPBLANCQ J., 1982. Phytoplancton et production primaire. In : *Ecologie du plancton des eaux continentales*. Pourriot (ed), Collec. *Ecologie* 16, Masson, Paris, 1-48.
- DABBADIE L., 1992. Cultures intensives de microalgues sur lisier de porc : performances, contraintes, utilisation des biomasses. Dipl. Agro. approf. ENSAM, Montpellier, 123 p.
- DE LA NOÛE J., PROULX D., 1986. *Entropie*, 130/131, 17-32.
- DE PAUW N., DE LEENHEER L., LAREY P., MORALES J., REARTES J., 1980. Cultures d'algues et d'invertébrés sur déchets agricoles. In : *La pisciculture en étang*, Billard (éd) INRA, Paris, 189-214.
- DROOP M.R., 1974. Heterotrophy of carbon. In : *Algal Physiology and Biochemistry*. W. D. P. Stewart (ed), Univ. California Press, Los Angeles, ISBN 0-632-09100-2, 530-559.
- FARNAULT G., PEDRO L., 1991. Production intensive d'algues et de zooplancton par recyclage biologique du lisier de porc. *Mém. Inst. Univ. tech., Tours, Spéc. Biol. appl.*, 80 p.
- GNUDI S., GIACOMETTINI., SALOMONI C., 1991. Rotifer control in wastewater high rate algae ponds. *Biol. Appr. Sewage Treat. Proc., Current Stat. and Perspect.*, Madoní (éd.) Perugia, Italie, 367-371.
- GUERRIN F., 1988. *Bull. fr. Pêche et Piscicult.*, 311, 113-125.
- GUERRIN F., 1990. Valorisation aquacole d'eaux usées traitées par lagunage naturel. Thèse Doc. Univ. Paul Sabatier, Toulouse, Lab. Hydrobiol., 297 p.
- MYRAND B., de LA NOÛE J., 1982. *Hydrobiologia*, 97, 167-177.
- POURRIOT R., 1982. Problèmes de stratégies adaptatives. In : *Ecologie du plancton des eaux continentales*. Pourriot (éd), Collec. *Ecologie* 16, Masson, Paris, 113-146.
- SALOMONI C., 1991. *Riv. Suinicoltura*, 2, 33-37.
- SALOMONI C., sous-presse. La production de matière vivante par recyclage d'effluents d'élevage y compris de pisciculture dans les systèmes de lagunage. In : *Aquaculture practice of Cyprinids*. Billard (éd), INRA, Paris.
- SEVRIN-REYSSAC J., 1992. *Aqua-Revue*, 40, 33-43.
- SEVRIN-REYSSAC J. 1993. *Crustaceana*, 64 (3), 356-366.
- SEVRIN-REYSSAC J., GOURMELEN J.L., 1985. Le biotope "étang à roselières" en Brenne. Qualité des eaux et évolution saisonnière du plancton de quelques étangs de Brenne et de leur roselière. *Protoc. Mus. nat. Hist. nat. Paris- Minist. Environnement, conventions 82188-83079*, 72 p.
- SYLVESTRE S., SEVRIN-REYSSAC J., de LA NOÛE J. Stimulation de la production de microalgues par des apports de gaz carbonique et une élévation de la température. *Rev. Acad. Agriculture, Paris. (sous-presse)*.
- TEO L.H., CHENT W., LEE H.L., 1993. *Europ. Aquacult. Soc.*, 19, 274.
- VIGNES J.C., 1992. *Aqua-Revue*, 40, 30-32.
- ZIMMERMANN P., 1990. Aspect des populations planctoniques en hiver dans les étangs de pisciculture. Impacts de la fertilisation organique. *DES, Univ. Paris VI*, 75 p.