

Utilisation de la chaîne alimentaire aquatique (algues, microcrustacés, poissons) pour le recyclage du lisier de porc

Josette Sevrin-Reyssac

Les élevages porcins français génèrent environ 100 000 m³ de lisier par jour. Leur concentration dans certaines régions fait que les surfaces agricoles d'épandage sont insuffisantes pour permettre une élimination rationnelle de ces déchets.

Des traitements efficaces doivent donc être recherchés et appliqués pour se débarrasser de ces excédents. Diverses techniques ont déjà été proposées : traitements physiques (tamisage, centrifugation, décantation avec récupération des boues pour compostage), traitements biologiques (méthanisation, stockage aéré, boues activées, épandages sur des parcelles de sol « épuratives »). De nombreux travaux se rapportent à ces différentes méthodes [1-6]. Leur coût est souvent très élevé, surtout si on envisage le transport du déchet jusqu'à une unité de traitement. Le recyclage du lisier dans le milieu aquatique (association pisciculture-élevage) est connu et pratiqué depuis longtemps mais les quantités épandues sont relativement faibles : on compte généralement trente à quarante porcs/hectare d'étang [7]. Quant à la technique du lagunage, elle a déjà été appliquée en Italie [8, 9], mais en utilisant, pour mobiliser les polluants, à la fois des microalgues et des végétaux supérieurs (lentilles d'eau).

Le système de lagunage proposé ici est beaucoup plus simple dans son agencement que le modèle pilote italien (cinq

bassins au lieu de vingt et un) et fait intervenir uniquement des microalgues comme végétaux épurateurs. Comme dans le lagunage d'effluents urbains (2 600 installations en France en 1993), la mobilisation des éléments polluants (azote et phosphore) se fait grâce à des micro-organismes aquatiques et, notamment, des microalgues dont les bassins sont situés en amont, les bassins en aval étant destinés à éliminer les biomasses produites : microalgues ingérées par des daphnies (crustacés cladocères), daphnies consommées par des poissons. Au contraire du lagunage d'effluents urbains où l'eau du bassin terminal est rejetée dans l'environnement (rivière), ce système fonctionne en circuit fermé : l'eau est pompée dans le bassin terminal empoisonné et réintroduite, additionnée de lisier, dans les cultures algales. Le lagunage reste donc fonctionnel même si la disponibilité en eau est limitée et il n'y a aucun risque de pollution par rejet dans une rivière.

Pour analyser le fonctionnement de cette technique et chercher les moyens d'optimiser ses performances d'épuration, de nombreuses expériences ont été réalisées à petite échelle (volumes compris entre 1 et 90 litres) au Muséum national d'histoire naturelle (MNHN) de Paris et sur une station pilote (surface totale en eau : 2 100 m²) située au Centre de recherches zootechniques appliquées (CRZA) à Montfaucon (Aisne).

Objectifs

Le procédé de recyclage du lisier de porc devait être suffisamment rustique pour pouvoir être installé en aval d'un élevage

porcin, sans entraîner de dépenses excessives pour l'éleveur. Ainsi, le transfert de l'eau entre les bassins, de l'amont vers l'aval, se fait par simple gravité. L'objectif a aussi été de réduire au maximum la superficie en eau nécessaire en ne dépassant pas 10 m² par porc. Dans le lagunage urbain, cette superficie est prévue pour un équivalent-habitant (rejet quotidien de 15 grammes d'azote et 4 grammes de phosphore). Or, un porc représente 2 équivalents-habitants pour les rejets azotés et 2,4 pour le phosphore. On a par ailleurs cherché à produire des biomasses utilisables soit sur le site soit à proximité afin d'éviter qu'elles ne deviennent à leur tour une source de pollution. Parmi les végétaux susceptibles de mobiliser les polluants, le choix s'est porté sur les microalgues (facilement éliminées par les daphnies qui ont une plus forte valeur ajoutée) plutôt que sur des végétaux supérieurs comme les lentilles d'eau (*Lemna*). Ces dernières sont performantes sur le plan de l'épuration [10], mais leur récolte est contraignante et leur utilisation problématique : nécessité de les dessécher pour les incorporer aux aliments pour poulets, la consommation des lentilles fraîches par des bovins pouvant provoquer du météorisme. Par ailleurs, leur déficience en méthionine nécessite une supplémentation en protéines animales pour constituer des régimes équilibrés [10].

Enfin, la technique de gestion de la culture algale devait permettre de limiter au maximum la volatilisation de l'azote ammoniacal (NH₄⁺) sous forme de gaz ammoniac (NH₃) à des pH élevés. D'après un rapport de l'Ademe, ce gaz serait préjudiciable à la couche d'ozone mais n'aurait pas, comme le CO₂, une action très sensible sur l'effet de serre.

J. Sevrin-Reyssac : Laboratoire d'Ichtyologie générale et appliquée, Muséum national d'histoire naturelle, 43 rue Cuvier, 75231 Paris cedex 05, France.

Tirés à part : J. Sevrin-Reyssac

Mise en place et agencement des lagunes

Le site d'implantation doit être bien ensoleillé et hors de toute zone boisée pour éviter la chute des feuilles dans les bassins. La déclivité du sol est favorable mais non indispensable car on peut créer entre les bassins une différence de niveau en jouant sur leur profondeur respective. L'étanchéité des bassins de culture algale doit être assurée par un revêtement en plastique, celle des autres (si besoin est) par de l'argile rapportée (et non par un revêtement synthétique) afin que la vase puisse jouer son rôle tampon sur les conditions physico-chimiques du milieu aquatique.

La profondeur maximale requise pour les cultures algales est très faible afin que toute la couche d'eau reçoive de la lumière (quarante centimètres maximum en été, et une cinquantaine de centimètres en hiver). Il suffit donc de soixante centimètres environ afin d'éviter les débordements en cas de fortes pluies. Une profondeur d'un mètre et demi à deux mètres est à prévoir pour les élevages de daphnies et de poissons.

Les bassins destinés aux algues seront de préférence rectangulaires, beaucoup plus longs que larges (rapport 1/5 environ) avec des bords courbes et une cloison médiane pour faciliter la circulation de l'eau (figure 1). Les berges sont inclinées à 45°.

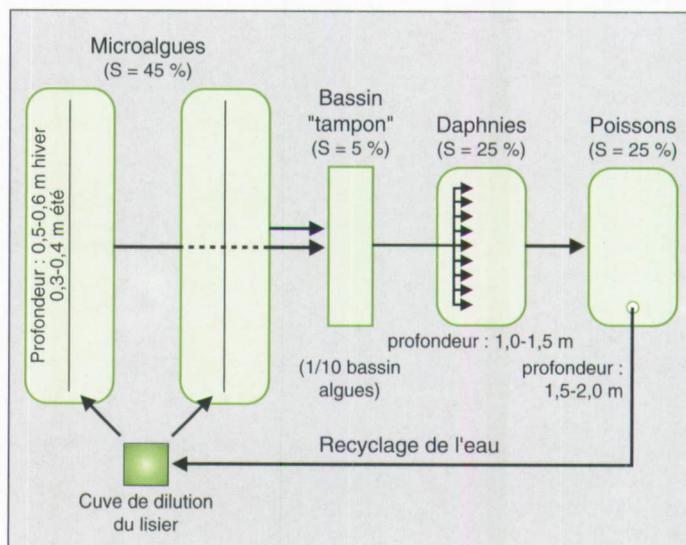
Il est indispensable d'utiliser au moins deux bassins pour les algues afin de pouvoir relancer une culture défaillante dans un bassin en prenant un inoculum dans l'autre. Un seul suffit pour les élevages de daphnies et pour les poissons (figure 1). Entre les cultures algales et l'élevage de daphnies, un bassin intermédiaire recevant les différentes cultures est fortement conseillé ; il permet un séjour des suspensions algales pendant deux jours environ avant leur introduction dans l'élevage de daphnies et facilite le contrôle de la qualité de l'eau qui se fait uniquement dans ce bassin et non dans les différentes cultures algales [11].

Les dimensions relatives et les profondeurs des différents bassins par rapport à la superficie totale du lagunage sont indiquées sur la figure 1.

Si la superficie consacrée à l'élevage de daphnies est plus réduite que celle des cultures algales, les volumes d'eau sont

Figure 1. Caractéristiques des différents bassins d'un lagunage de recyclage du lisier de porc.

Figure 1. Characteristics of the various basins used in the lagoon recycling of pig waste.



similaires. Le volume d'eau du bassin terminal empoissonné est au moins égal à celui de l'élevage des daphnies mais il peut être beaucoup plus grand : étang de pisciculture ou destiné à la pêche de loisir, étang collinaire servant de réserve d'eau pour l'irrigation (figure 2a).

Le bassin terminal empoissonné se comporte comme un étang de pisciculture. Les grandes formes du zooplancton (daphnies) sont éliminées par la prédation des poissons et, en l'absence de ces cladocères filtreurs, le phytoplancton se développe à nouveau, assurant la mobilisation des nutriments encore présents dans l'eau auxquels s'ajoutent les rejets métaboliques des daphnies. L'empoisonnement doit être le plus faible possible pour ne pas réeutrophiser le milieu, mais il faut cependant que la quantité de poissons soit suffisante pour éliminer les daphnies introduites. Dans le cas d'un bassin de faible capacité (figure 2b), le nombre de poissons est insuffisant pour consommer toutes les daphnies produites en amont. Il faudra alors leur distribuer seulement une partie de la biomasse des daphnies, une autre étant utilisée à d'autres fins.

Gestion du lagunage

Lancement des cultures algales

La culture algale doit débuter dans un petit volume d'eau qui est augmenté à mesure que les algues se développent. Les

microalgues vertes (chlorococcales appartenant surtout aux genres *Scenedesmus* et *Chlorella*) colonisent spontanément tous les milieux riches en matières organiques sans qu'il soit nécessaire d'apporter un inoculum. Il suffit donc d'un faible apport de lisier (moins de 1 l/m³ d'eau) pour constituer un milieu favorable. En débutant la culture au mois de mars, on bénéficie de la poussée printanière du phytoplancton. Les apports de lisier sont faibles pendant cette période de lancement : environ 1 l/m³ de culture algale deux à trois fois par semaine suivant la température et, par conséquent, la vitesse de multiplication des algues l'est aussi.

Il est indispensable que les algues soient très abondantes (plus de 300 mg MS/l) lorsque débute le transfert d'une partie de la suspension dans les élevages de daphnies. L'intervalle de temps séparant le lancement de la culture du stade où la densité algale atteint l'importance requise (de l'ordre de 300 mg MS/l) est plus ou moins long suivant la température, le mode de gestion et l'importance de la biomasse initiale. Dans des cultures enrichies en CO₂, il y a eu doublement de la biomasse au bout d'une vingtaine de jours en janvier avec des températures moyennes inférieures à 8 °C [12] alors que, dans l'intervalle d'une semaine, elle a augmenté de 2,7 fois pendant le mois d'août avec des températures supérieures à 20 °C [13].

Il faut ensuite que l'importance des volumes transférés quotidiennement dans les bassins en aval soit réglée de telle sorte qu'il n'y ait pas diminution de la biomasse.

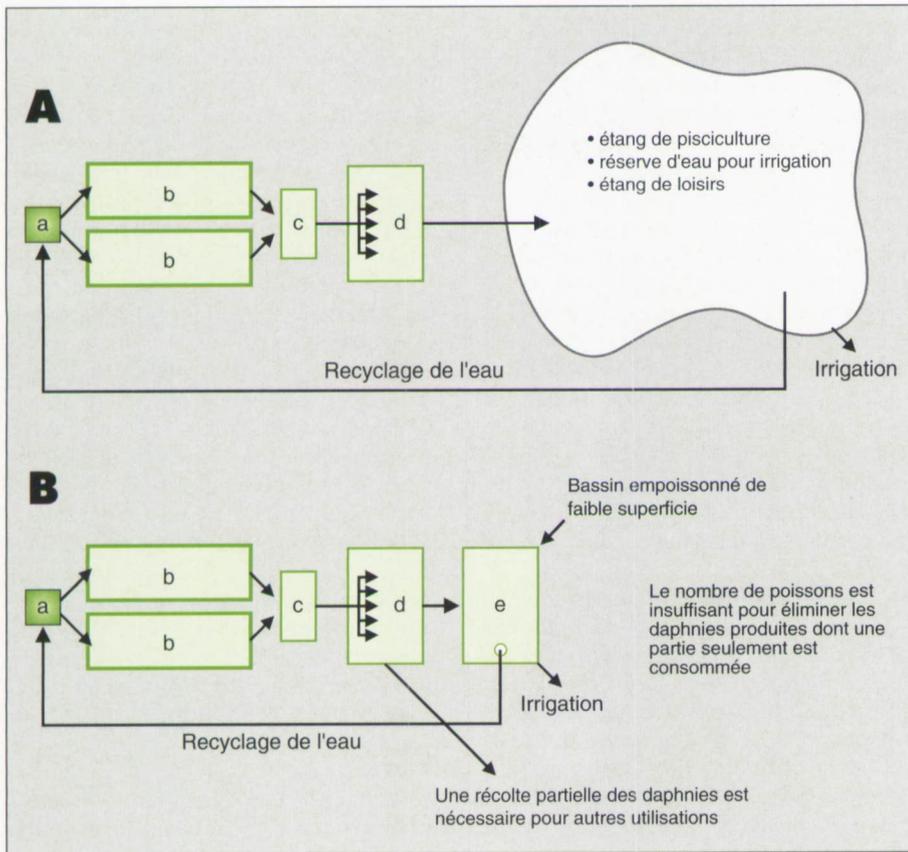


Figure 2. Différents types d'agencement des bassins de lagunage. A : système utilisant comme bassin terminal empoissonné un étang de pisciculture ou un plan d'eau destiné à l'irrigation. Toute la biomasse de daphnies est éliminée dans ce plan d'eau. B : lagunage comportant un bassin empoissonné de dimensions réduites ; les poissons ne sont pas assez nombreux pour éliminer toutes les daphnies produites. Il faut alors utiliser une partie des daphnies à d'autres fins (aquariophilie, fabrication d'aliments composés pour animaux, utilisation par des animaux terrestres, etc.).
 a : cuve de mélange eau + lisier, b : bassins de culture algale, c : bassin intermédiaire servant de collecteur aux bassins d'algues, d : bassins d'élevage de daphnies, e : bassin d'élevage de poissons.

Figure 2. Various types of lagooning system. A : using fish pond or pool for irrigation as end basin. All daphnids in this large pond or pool are eaten. B : the lagooning system's end basin is smaller ; number of fish insufficient to consume all daphnids, some of them having to be used elsewhere (aquarium feed, animal feed, artificial fish food, etc.).
 a : water and pig waste mixing-tank ; b : algal culture basin ; c : intermediate basin used as collector for algal cultures ; d : daphnid-breeding basin ; e : fish-breeding basin.

Apports de lisier dans les cultures algales

Le lisier brut non traité est inutilisable en lagunage en raison de sa forte teneur en particules solides (8 à 10 % de matières sèches). Une séparation est nécessaire (décantation, filtration, tamisage, etc.) pour abaisser jusqu'à 1 % environ la teneur en particules solides [8]. Une autre utilisation doit être envisagée pour les boues : épandages, compostage. D'après les informations recueillies auprès de plusieurs éleveurs, c'est la phase liquide du lisier qui leur pose le plus de problèmes.

Les apports de lisier dans les cultures algales doivent être raisonnés non en volume mais en quantité de nutriments introduits, laquelle dépend du prétraitement appliqué au lisier. La composition chimique de celui-ci doit donc être connue pour calculer le dimensionnement du lagunage.

La séparation des boues de la phase liquide aboutit surtout à un abaissement de la teneur en phosphore qui se retrouve principalement dans les boues tandis que l'azote, dont 80 % est sous forme ammoniacale, reste dans la phase liquide en raison de sa grande solubilité.

Les lisiers recyclés dans un système pilote expérimental italien [8] et en France [11]

ont une concentration moyenne en azote ammoniacal ($N-NH_4^+$) différente car les prétraitements sont aussi différents : 1,5 g/l avec fermentation anaérobie préalable en Italie, de 2 à 2,3 g/l en France avec une simple décantation d'une durée de trois mois. Les nitrites et nitrates sont en très faible quantité dans les deux cas mais la DBO et la DCO varient aussi en fonction du prétraitement auquel le lisier est soumis : DBO = 5 000 à 6 500 mg/l, DCO = 14 000 mg/l après une simple décantation, valeurs 1,4 à 2,5 fois plus faibles pour la DBO et 4 fois plus faibles pour la DCO après traitement anaérobie [8]. La quantité d'éléments nutritifs mobilisée dépend de l'abondance des algues et de leur taux de croissance. Connaissant l'importance de la biomasse et la teneur du lisier en azote ammoniacal, il est possible de déterminer le volume de lisier à apporter dans la culture (tableau 1). Des contrôles chimiques réalisés une fois par semaine environ (à l'aide de réactifs colorimétriques utilisés par les pisciculteurs et les aquariophiles) permettront de s'assurer qu'il n'y a pas augmentation de la teneur des éléments azotés. Les apports de lisier doivent être interrompus pendant un à plusieurs jours dans les cas suivants :

- teneur en $N-NH_4^+$ égale ou supérieure à 5 mg/l ;
- teneur en $N-NO_2^-$ égale ou supérieure à 0,1 mg/l ;
- teneur en $N-NO_3^-$ égale ou supérieure à 10 mg/l.

Gestion des cultures algales

Pour maintenir les algues en phase de croissance exponentielle, il faut leur apporter les nutriments nécessaires (lisier) mais aussi du CO_2 qui devient rapidement un facteur limitatif dans les cultures intensives quelle que soit la saison. L'enrichissement du milieu en CO_2 est favorisé par le brassage (roues à aubes, hydroéjecteurs, insufflation d'air au fond à l'aide d'un tuyau troué. En augmentant la surface de contact air-eau, ce brassage favorise les échanges gazeux avec l'atmosphère (élimination de l'oxygène dissous qui est en sursaturation, introduction du CO_2 atmosphérique qui est en déficit dans la culture). Toutefois, la teneur de l'air en CO_2 étant faible (0,03 %), un enrichissement est nécessaire avec du

Tableau 1

Charge ammoniacale enlevée quotidiennement en fonction de la biomasse algale (poids de matière sèche par litre)

MS algues (mg/l)	NNH ₄ ⁺ (g/m ³ /j)
50	0,5-0,6
100	2,6-2,9
200-250	4,1-4,7
250-300	8,2
400-500	12

Daily removal of ammonia nitrogen in relation with algal biomass (dry matter per liter)

CO₂ dont les sources de production sont nombreuses dans une ferme : fermentation des boues provenant du lisier, air de la porcherie, etc.). Dans le cas de porcs élevés sur litières de paille ou de sciure, la concentration en CO₂ de l'air dans la porcherie varie de 1 000 à 2 500 ppm, soit trois à huit fois plus que l'air atmosphérique [14]. Les mesures effectuées par l'auteur au CRZA de Montfaucon pendant l'été 1994 montrent que, au niveau de la ventilation de la porcherie, côté extérieur, la concentration en CO₂ est de 1 400 à 1 500 ppm, au lieu de 300 ppm à proximité des bassins de lagunage. Un compresseur d'air placé près de cette ventilation, permettrait donc d'introduire, dans les cultures algales, un air contenant cinq fois plus de CO₂ que l'air ambiant. Par ailleurs, dans les conditions d'installation expérimentales, l'introduction d'un air enrichi en CO₂ (jusqu'à 1 % environ) a deux avantages majeurs. Elle permet de stimuler fortement la productivité des microalgues, mais aussi de stabiliser le pH à des valeurs inférieures à 8,5 ; en effet, au-dessus de 8,3, il n'y a plus de CO₂ libre dans l'eau. En absorbant ce gaz, les microalgues provoquent une augmentation du pH et la transformation du bicarbonate en carbonate insoluble avec proportion croissante de ce dernier lorsque le pH s'élève [15].

La stabilisation du pH à une valeur inférieure à 8,5 permet aussi d'éviter la volatilisation de l'azote ammoniacal sous forme de gaz ammoniacal, ce qui équivaut à un déplacement de la pollution de l'eau vers l'air. En effet, plus le pH augmente, plus la proportion d'ammo-

nium (NH₄⁺) diminue au bénéfice de l'ammoniac (NH₃) qui se volatilise (*strippage*). Par exemple, à 20 °C, la proportion d'azote ammoniacal volatilisé est de 25 % à pH 9 ; elle atteint 82 % à pH 10. Les résultats obtenus dans des cultures algales soumises à un brassage assuré seulement par un hydroéjecteur, ou par introduction d'air atmosphérique non enrichi en CO₂, montrent que le pH est généralement supérieur à 9 dans le cas d'un faible brassage [11] et qu'il varie entre 8,5 et 8,7 avec un fort brassage. La conséquence d'un déficit en CO₂ est que, même si les conditions de température sont très favorables, il n'est pas possible de maintenir de fortes biomasses algales et, par conséquent, de recycler des volumes importants de lisier (*tableau 1*).

Les expériences réalisées au MNHN de Paris pendant l'été 1994 [13] montrent qu'avec des températures voisines de 30 °C, et malgré une forte insufflation d'air atmosphérique au fond, les algues sont défavorisées par rapport aux bactéries et forment des flocons (agrégats) qui sédimentent, phénomènes fréquemment constatés pendant l'été 1993 [11]. En effet, le CO₂ se dissout d'autant plus difficilement dans l'eau que la température est élevée. Le pH garde ainsi des valeurs proches de 9 alors que, dans les mêmes conditions de brassage, il est généralement proche de 8,5 avec des températures moyennes de l'ordre de 20 °C [Combres, comm. pers.]. Il en résulte que les apports nécessaires de CO₂ dans les cultures algales seront d'autant plus importants que la température sera élevée. Ainsi, pour maintenir le pH au-dessous de 8,3, un seul apport de CO₂ tous les cinq jours a été nécessaire en hiver [12] et deux à trois apports par jour en été [13].

La colonisation des cultures algales par le zooplancton est la conséquence d'une densité algale faible imputable à une mauvaise gestion. En effet, la surabondance des algues (> 200 mg MS/l) provoque un engorgement de l'appareil filtreur des cladocères dont le rythme de filtration diminue, un nombre croissant de cellules traversant le tube digestif sans être digérées [16]. D'autre part, les daphnies sont souvent entraînées en surface par des microbulles d'oxygène qui adhèrent à leur carapace [17]. Une année de suivi des deux bassins de culture algale du système pilote expérimental n'a pas permis d'observer de développement de daphnies, celles-ci n'étant présentes que

dans quelques récoltes et à raison d'un petit nombre d'individus [11].

De même, les rotifères ne deviennent abondants (plusieurs milliers d'individus par litre) qu'en période d'effondrement algal, leur prolifération étant une conséquence et non une cause de la quasi-disparition des algues. Ils disparaissent spontanément et rapidement dès que celles-ci recolonisent le milieu, sans qu'il soit nécessaire d'appliquer de traitement chimique.

Un renouvellement partiel de la suspension algale doit être effectué quotidiennement ; elle est déversée dans l'élevage de daphnies et remplacée par un volume équivalent d'eau additionnée de lisier, l'eau provenant du bassin empoissonné. Le volume d'eau apporté aux algues doit être suffisant pour leur permettre de continuer à se multiplier en leur fournissant un espace libre, mais pas trop important cependant pour ne pas provoquer un lessivage de la culture qui doit rester stable et abondante pour garder de bonnes performances d'épuration (*tableau 1*).

Le volume d'eau déplacé quotidiennement pendant la saison estivale peut varier d'un quart à un douzième du volume total de la suspension algale, suivant la température et le mode de gestion (turbulence, enrichissement en CO₂). En hiver, le renouvellement quotidien du milieu dans les cultures algales est plus limité car la multiplication des cellules est fortement ralentie lorsque les températures sont basses (un vingtième à un trentième du volume total par jour, voire moins si la température est inférieure à 5 °C).

La productivité moyenne de cultures algales dont le pH était maintenu au-dessous de 8,3 par des apports de CO₂ a été de 5 mg MS/l/j en hiver avec des températures moyennes inférieures à 8 °C [12]. Elle a généralement dépassé 30 mg MS/l/j en été avec des températures supérieures à 20 °C [13].

Contrôle des cultures algales

Réalisé uniquement dans le bassin intermédiaire à raison d'une fois par semaine environ, le contrôle des cultures algales porte sur le pH et les formes minérales de l'azote : ammoniacal, nitrite, nitrate. L'addition de NH₄⁺ à un milieu de culture algale contenant du nitrate inhibe complètement l'assimilation de celui-ci

[18] car les algues mobilisent de préférence la forme ammoniacale. Dans la mesure où une augmentation de l'azote concerne uniquement la forme nitrate (> 10 mg/l), il faut interrompre les apports de lisier pendant quelques jours pour que les algues, après épuisement de

l'azote ammoniacal, utilisent le nitrate qu'elle auront auparavant réduit en forme ammoniacale.

L'estimation de la biomasse algale peut se faire simplement au disque de Secchi qui ne doit pas disparaître à plus de 5 centimètres en été et à plus de 10 en hiver.

Gestion des élevages de daphnies

Les élevages de daphnies sont faciles à gérer et nécessitent peu de surveillance. Pour que les productivités restent élevées

Summary

Using the trophic web to recycle pig waste: management techniques

J. Sevrin-Reyssac

In France, pig-breeding results in about 100,000 m³ of waste per day. In some regions, the quantities involved do not allow it to be used rationally by spreading on farms. Many waste-disposal techniques have been proposed (composting, biogas production, anaerobic fermentation, filtration, etc.) but, generally, they are too expensive.

The objective of the present project was to develop a lagooning system that was easy to set up and manage close to a pig farm, and did not entail excessive costs.

The system is based on natural lagooning which, in France, is generally used for recycling household waste (2,600 plants). Its special feature is that the various levels of the aquatic food web are bred in different basins. The polluting compounds (ammonia and phosphates) in pig waste are used by microalgae (chlorococals) which are eaten by cladocerans (Daphnia) and the latter by fish. The water passes down through the various basins by gravity, reaches the end fish basin from whence it is pumped, mixed with waste and re-used. The system is thus a closed circuit.

Experiments on a small-scale basis (less than 100 l) were carried out in Paris and in a pilot plant about 100 km from Paris in order to devise simple management techniques.

Only the basins used for algal cultures need to be sealed with a plastic cover. For the daphnid and fish basins, the bottom must be covered with natural sediment to prevent large variations of pH, dissolved oxygen and nutrient concentrations.

An intermediate basin is required between the algal and daphnid basins in order to collect algal suspensions from the various cultures before introducing them into the daphnid breeding basin (water retention time: about 2 days). Observations and measurements of water quality

are feasible only in the intermediate basin.

To maintain a large-enough biomass (> 300 mg DW.l⁻¹) and high productivity (> 30 mg DW.l⁻¹ per day), algal cultures should be given CO₂-enriched air (up to 1%). Similarly, the pig waste added to the water should be agitated moderately (hydro-injector). Doing so also periodically exposes the algae to light.

The following represent good conditions for algal cultures: Secchi disk must not disappear beyond 5 cm; ammonia level: max. 5 mg.l⁻¹; nitrite: 0.1 mg.l⁻¹; nitrate: 10 mg.l⁻¹.

An algal biomass of 300 mg DW.l⁻¹ allows 8 to 12 mg of N-NH₄⁺.l⁻¹ per day to be eliminated. The volume of pig waste corresponding to these concentrations depends on previous treatments used: decantation, anaerobic fermentation, filtration, etc..)

Daphnid breeding is simple to perform, with light aeration from May to September-October ensuring high productivity (200-400 g.m⁻³ per week of fresh organisms), and harvest should be interrupted between November and March to maintain sufficient organisms to eliminate all algae in the basin.

The fish basin is managed in the same way as a fish pond. If the surface area is small (e.g. about the same size as the daphnid basin), there will not be enough of them to consume all the daphnids produced, and part of the latter must be put to other uses.

The lagooning system functions all year round in temperate zones (except during frost). However, according to experiments carried out in northern France, the purifying capacity is reduced by about 4 or 5 in winter.

Cahiers Agricultures 1995 ; 4 : 101-8.

et régulières, il est nécessaire d'apporter une légère aération d'avril à septembre. Une insufflation d'air au fond, assurée par un tuyau troué, permet de maintenir des concentrations en oxygène dissous égales ou supérieures à 5 mg/l et d'éviter la stratification de la couche d'eau qui entraîne une désoxygénation au fond et des risques de formation de gaz toxiques. Les productions moyennes dans les bassins aérés sont au moins deux fois plus élevées que dans ceux qui ne bénéficient d'aucun apport d'oxygène : 40 tonnes/ha/an au lieu de 10 à 20 tonnes [9, 19, 20]. Les productions sont beaucoup plus régulières avec aération car il n'y a pas de mortalités massives résultant de la formation de gaz toxiques.

Du printemps à l'automne, un enlèvement régulier (quotidien, bi-hebdomadaire ou hebdomadaire suivant la productivité de l'élevage) d'une partie de la biomasse de daphnies est nécessaire pour éviter la surpopulation, mais il faut maintenir pendant cette période une densité de population de l'ordre de mille individus par litre. De mai à octobre, les productivités moyennes que l'on peut attendre d'élevages de daphnies bien gérés sont, en moyenne, supérieures à 200 g/m³/sem. (poids des organismes frais).

De novembre à mars-avril, les récoltes doivent être interrompues afin de laisser dans l'élevage un effectif suffisant pour éliminer les microalgues apportées. Avec des températures moyennes inférieures à 10 °C, on peut alors maintenir des effectifs de 200 à 300 individus par litre [21].

Récolte des daphnies

A priori, on pourrait considérer que la technique la plus facile pour récolter les daphnies consiste à filtrer l'eau qui sort quotidiennement de leur bassin d'élevage pour être déversée dans le bassin terminal. Or, ce procédé s'est révélé complètement inadapté en raison de la répartition très hétérogène des daphnies qui forment des essaims se déplaçant horizontalement et verticalement dans la couche d'eau au cours de la journée. Un écoulement de l'eau en un seul point ne permet pas, par conséquent, un enlèvement rationnel de la biomasse. Si les daphnies sont groupées près du point d'écoulement, la biomasse enlevée est trop importante ; si l'essaim est à l'autre extrémité du bassin, elle est trop faible [11].

Plusieurs méthodes peuvent être dès lors proposées suivant l'utilisation que l'on destine aux daphnies.

• Utilisation comme aliment-proies

Les daphnies sont données vivantes à des larves de poissons qui n'acceptent pas l'aliment inerte (brochets). Le procédé de collecte doit alors être le moins brutal possible pour ne pas léser les organismes. La collecte se fait avec une épuisette depuis le bord du bassin ou avec un filet à plancton traîné horizontalement et dont l'ouverture est munie d'un flotteur pour le maintenir en surface. Les daphnies seront utilisées le plus rapidement possible.

• Utilisation comme aliment inerte

Il est possible de recourir à une récolte par pompage et filtration de l'eau. La majorité des daphnies est alors tuée par les actions mécaniques qui s'exercent sur elles mais leur utilisation reste possible pour alimenter la plupart des espèces de poissons d'étang, juvéniles et adultes. Les daphnies peuvent alors être utilisées fraîches, séchées (aquariophilie) ou soumises à un autre procédé de conservation (ensilage). Un nouveau procédé, exploité par la société Bioval (85130, La Verrie), consiste à les incorporer à de l'aliment composé pour poissons. Plusieurs types d'aliments (secs, semi-humides, flottants, etc.) sont proposés.

• Utilisation de la biomasse *in situ*

Ce moyen consiste en une extraction d'une partie de la biomasse de daphnies dans le bassin même où elles sont élevées et sans aucune intervention humaine. Le contrôle de la population est assuré par des canards dont le nombre doit être défini de telle sorte que la prédation sur les cladocères soit suffisante mais pas trop importante. Des poissons placés dans une ou plusieurs cages flottantes disposées à proximité des points d'aération du bassin peuvent aussi, vraisemblablement, jouer ce rôle régulateur. Ces deux moyens pour limiter la population de daphnies doivent être testés sur le terrain.

Gestion du bassin d'élevage de poissons

Le bassin terminal empoisonné a un double rôle. Les poissons qu'il contient permettent d'éliminer facilement les daphnies sur place. Par ailleurs, en l'absence de daphnies, le phytoplancton se développe à nouveau ce qui permet d'affiner l'épuration.

On peut envisager deux cas (figure 2) :

– le bassin terminal empoisonné est un étang de pisciculture dont le volume est environ dix fois plus important que celui de l'élevage de daphnies. Il est alors possible d'éliminer dans cet étang toutes les daphnies produites. Pour 100 m² d'élevage de daphnies, soit un volume d'élevage de 130 m³, on peut estimer la production de daphnies, entre avril-mai et septembre-octobre, à 0,5 tonne d'organismes frais environ, soit 80 à 100 kilos de daphnies séchées. Cet apport alimentaire représente une production de poissons omnivores (carpes) de 25 à 30 kilos ;

– le bassin terminal empoisonné est, faute de place, de dimension similaire ou légèrement supérieure à celui de l'élevage de daphnies. L'empoisonnement ne doit pas être trop important pour éviter une réeutrophisation de l'eau mais être suffisant pour éliminer les daphnies passées à travers le filtre (juvéniles, œufs). Faute de prédation, ces daphnies constitueraient à nouveau d'importantes populations (comme cela s'observe en monoculture de poissons non planctonophages tels les silures). Une partie de la biomasse est alors consommée par les poissons, l'autre est prélevée et utilisée à d'autres fins.

La commercialisation des poissons élevés en aval d'un lagunage pour la consommation peut s'avérer difficile en raison des conditions d'élevage particulières. Ils devraient séjourner auparavant dans un bassin de stockage en eau claire, ce qui représenterait une superficie en eau importante et un travail supplémentaire pour l'éleveur.

L'élevage de poissons d'ornement (carpes koi) peut être envisagé en fonction des débouchés offerts dans la région. Celui des poissons de repeuplement paraît approprié, à condition que le transport des animaux vivants ne soit pas effectué par l'éleveur de porcs qui ne possède pas le matériel nécessaire, ni le temps suffisant pour effectuer la pêche. On peut, enfin, aménager le plan d'eau empoisonné en étang de loisir pour la pêche à la ligne, sachant que dans un étang clos, la pêche peut se faire toute l'année ou, du moins, dépasser largement la période autorisée dans les cours d'eau.

Conclusion

Pour réduire au maximum la superficie des bassins de lagunage, il faut favoriser le plus possible leur productivité biolo-

gique afin de les rendre plus efficaces, par unité de surface, dans les processus de dépollution (cultures algales) et d'élimination des biomasses produites (élevages de daphnies et de poissons). Ainsi faut-il apporter un supplément de CO₂ aux algues car, si leurs besoins en azote et phosphore sont couverts par les épandages de lisier, il n'en est pas de même pour le carbone inorganique qui constitue un facteur limitatif.

L'introduction de CO₂ atmosphérique par un fort brassage (notamment une insufflation d'air atmosphérique au fond avec un tube troué permet déjà d'augmenter la productivité algale par rapport à une culture peu brassée. En condition de température favorable (20-22 °C), il a été possible de maintenir des biomasses algales élevées (> 300 mg MS/l), des productivités supérieures à 30 mg MS/l/j et de recycler des volumes de lisier deux à trois fois plus importants que lorsque le brassage est insuffisant. Toutefois, la meilleure technique de gestion consiste à introduire, dans une culture soumise à un brassage modéré créant un courant faible, un air enrichi en CO₂. Ce dernier procédé paraît être moins onéreux et plus efficace qu'une importante insufflation d'air non enrichi, la très forte turbulence favorisant en outre l'évaporation et s'avérant insuffisante pour apporter suffisamment de CO₂ aux algues en période très chaude, alors que leurs besoins sont importants.

Dans un lagunage d'effluents d'élevage comprenant trois compartiments (algues, daphnies et poissons), seules les cultures algales nécessitent une certaine vigilance (contrôle régulier de l'importance de la biomasse, de la qualité chimique de l'eau, du pH) ; ces mesures peuvent être réalisées facilement avec un petit appareillage peu onéreux qui représente une dépense d'une centaine de francs par mois. La présence d'un bassin intermédiaire, servant de collecteur aux différents bassins de cultures algales, permet d'ailleurs de réduire les interventions au minimum.

Les élevages de daphnies sont très faciles à conduire. Avec d'importants apports de microalgues et une légère aération du printemps à l'automne, il est possible de maintenir des conditions du milieu favorables et une bonne productivité. Une simple appréciation visuelle permettra à l'utilisateur d'estimer l'importance des effectifs et, par conséquent, de juger de l'opportunité de retirer de la biomasse.

Le bassin empoisonné se gère comme un étang de pisciculture. La persistance d'une population de daphnies, même modeste, résultant d'un faible empoisonnement, peut provoquer une forte augmentation de la transparence (élimination des microalgues) propice au développement des macrophytes comme on en observe dans les étangs de monoculture de silures. On peut alors placer dans le bassin quelques carpes herbivores (*Ctenopharyngodon idella*) qui exerceront un contrôle sur le développement de ces végétaux tout en consommant aussi les grandes daphnies [22].

Si des paramètres essentiels de la productivité du lagunage peuvent être facilement contrôlés (apports de nutriments sous forme de lisier, turbulence, apports de CO₂ dans les cultures algales, d'oxygène dans les élevages de daphnies, etc.), il n'en est pas de même pour le facteur température. Le lagunage présente de fortes variations saisonnières et régionales quant à son efficacité. Il convient donc à l'utilisateur d'ajuster sa technique de gestion aux conditions climatiques locales.

Le recyclage biologique du lisier de porc par une chaîne alimentaire aquatique est un procédé relativement peu onéreux. L'investissement dépend essentiellement du prix du terrain, de la qualité du sol et de la disponibilité des matériaux de terrassement. Le coût d'exploitation se rapporte essentiellement à l'entretien de l'installation, au petit matériel, aux charges EDF, au suivi du système (analyses chimiques et, éventuellement bactériologiques). D'après les estimations réalisées [Carlo, comm. pers.] pour un atelier d'engraissement de 450 places produisant 1 350 porcs par an, les frais liés à ce système d'épuration seraient de l'ordre de 20 francs par porc produit.

L'utilisation des biomasses (daphnies, poissons) peut permettre de réduire les frais liés à cette technique d'épuration mais il serait cependant illusoire de penser qu'il sera possible de parvenir à une vraie rentabilité, les bénéfices majeurs touchant la qualité de l'environnement. Les expériences en cours ont pour objectif de réduire le coût de l'installation des bassins de culture d'algues en cherchant à voir s'il est possible de se passer d'un revêtement en plastique. Il faut déterminer quels sont les moyens de brassage les plus appropriées pour éviter la remise en suspension du sédiment naturel ■

Références

- Theoleyre MA, Heduit M. Le point sur les techniques d'épuration du lisier. *Porc Magazine* 1989 ; 216 : 65-6.
- Bertrand M, Desplanches F, Walker JF, Yon L. Épuration des lisiers de porcs par le sol, procédé Solepur. *Inform Techn Cemagref* 1991 ; 81 : 4.
- Chatillon G. Pèlerinage breton aux stations d'épuration. *Porc Magazine* 1991 ; 238 : 79-82.
- Theobald O. *Les traitements du lisier de porcs à la ferme*. Tome I. Paris : Inst tech porc, minist Agricult Forêt, minist Envir, 1992 : 49 p.
- Theobald O. *Les traitements du lisier de porcs à la ferme*. Tome II. Paris : Inst tech porc, minist Agricult Forêt, minist Envir, 1992 : 87 p.
- Coillard J, Texier C. Le traitement à la ferme des lisiers de porcs excédentaires. *J Rech porcines* 1994 ; 26 : 141-50.
- Lanoiselée B. *Fertilisation organique en aquaculture : utilisation du lisier de porc pour l'alevinage de poissons d'étang*. Thèse Doc Ing agro : Paris-Grignon 1984 ; 252 p.
- Salomoni C, Caputo A. Description of a design and the construction of a pilot plant for zooplankton production using pig waste. *Europ Aquacult Soc* 1989 (Special publ) 10 : 335-6.
- Salomoni C. Biotrattamento di reflui suinicoli per la produzione di organismi acquatici. *Riv Suinicoltura* 1991 ; 2 : 33-7.
- Hubac JM, Beuffe H, Blake G, et al. *Les plantes aquatiques utiles : les lentilles d'eau (Lemnacees). Utilisation en phyto-épuration et valorisation*. Paris : Assoc Fr Etudes des Eaux, 1984 ; 115 p.
- Sevrin-Reyssac J, Combres C, Laux S, Texier C. Applications des techniques du lagunage au recyclage du lisier de porc. *J Rech porcines* 1994 ; 26 : 123-34.
- Sevrin-Reyssac J, Sylvestre S, de la Noüe J. Stimulation de la production de microalgues pendant l'hiver par des apports de gaz carbonique et une élévation de la température. *C R Acad Agric Fr* 1993 ; 79 : 77-92.
- Ferrer S. *Gestion de cultures intensives de microalgues recyclant du lisier de porc*. Maîtrise biologie des organismes et des populations, option environnement. Université de Bordeaux, 1994 : 89 p.
- Nicks B, Marlier D, Canart B. Comparaison des températures de litières et des niveaux de pollution de l'air lors d'engraissement de porcs sur litières biomaitrisées à base de sciure ou de paille hachée. *J Rech Porcines* 1994 ; 26 : 85-90.
- Arrignon J. *Aménagement piscicole des eaux intérieures*. Paris : SEDETEC SA éd., 1970 ; 643 p.
- Champ P, Pourriot R. L'alimentation des cladocères planctoniques dulçaquicoles. *Ann Biol* 1977 ; 16 : 317-42.
- Angeli N. Interactions entre qualité des eaux et les éléments de son plancton. In : Pesson, éd. *La pollution des eaux continentales. Incidences sur les biocénoses aquatiques*. Paris : Gauthier-Villars, 1980 : 97-146.
- Pistorius E, Gewitz HS, Voss H, Vennesland B. Reversible inactivation of nitrate reductase in *Chlorella vulgaris* in vivo. *Planta* 1976 ; 128 : 73-80.

19. De Pauw N, de Leenheer L, Larey P, Morales J, Reartes J. Cultures d'algues et d'invertébrés sur déchets agricoles. In : Billard, éd., *La pisciculture en étang*. Paris : Inra, 1980 : 189-214.

20. Guerrin F. *Valorisation aquacole d'eaux usées traitées par le lagunage naturel*. Toulouse : thèse de doctorat. Université Paul-Sabatier, 1990 ; 297 p.

21. De la Noüe J, Sevrin-Reyssac J, Sylvestre S. Biotreatment of swine manure by intensive lagooning during winter. *Bioresource Technol* 1995 (sous presse).

22. Combres C, Sevrin-Reyssac J, Lohaka J. Production de biomasse et conditions du milieu dans des élevages de daphnies alimentées avec des microalgues. *Europ Aquacult Soc*, 1993 ; (special publ) 18 : 63-70.

Résumé

Un système de lagunage est proposé pour éliminer les excédents de lisier de porc. Les éléments polluants (azote et phosphore) sont mobilisés par des microalgues (chlorococcales) qui sont consommées par des daphnies (crustacés cladocères), ces dernières étant distribuées à des poissons. Ces différents compartiments de la chaîne trophique sont élevés dans des bassins séparés, l'eau s'écoulant par gravité de l'amont vers l'aval ; elle est pompée dans le bassin terminal empoissonné et réutilisée, après mélange avec le lisier (fonctionnement en circuit fermé). Pour maintenir des biomasses et des productivités algales élevées (> 300 mg MS/l ; > 300 mg MS/l/j), il faut apporter de l'air enrichi en CO₂ dans la culture, une agitation modérée étant assurée par un hydroéjecteur ou une roue à aubes. On évite ainsi les fréquentes floculations des microalgues qui se produisent, surtout en été, sous l'action de proliférations bactériennes. Les conditions suivantes traduisent un bon fonctionnement des cultures algales : transparence au disque de Secchi égale ou inférieure à 5 centimètres, moins de 5 mg/l d'azote ammoniacal, moins de 0,1 mg/l de nitrite, moins de 10 mg/l de nitrate. Le système fonctionne toute l'année (hors période de gel), mais les performances d'épuration sont, en moyenne, quatre à cinq fois plus faibles en hiver. Une biomasse algale de 300 mg MS/l permet l'élimination de 8 à 12 mg d'azote ammoniacal/l/j, le volume de lisier correspondant à cette charge dépendant du prétraitement auquel il a été soumis : décantation, filtration, liquéfaction, etc. Les élevages de daphnies sont faciles à gérer, avec une légère aération maintenue de mai à septembre-octobre lorsque les productions sont maximales (200 à 400 g/m³/sem d'organismes frais) et interruption des récoltes de novembre à fin mars, afin que l'effectif reste suffisamment élevé (100-200 individus/l environ) pour éliminer les algues apportées. Le bassin empoissonné se gère comme un étang de pisciculture.
