

Traitement de l'eau salée souterraine pour un meilleur contrôle des élevages de coquillages

Jean-Pierre Baud, Hubert Palvadeau, Max Nourry, Christian Pénisson et Joël Haure
IFREMER, L.C.P.L, Polder des champs 85230 Bouin

Contrats : IFREMER/REGION DES PAYS DE LA LOIRE : SMIDAP N° 98 06 801.

CONSEIL GENERAL DE VENDEE : N° 98-DEA-541



Décembre 2000

Remerciements

Cette étude a été partiellement financée par le Conseil régional des Pays de la Loire par l'intermédiaire du SMIDAP et par le Conseil Général de Vendée.

Les auteurs tiennent à remercier :

Madame Nelly Conche du Département IFREMER des Ressources Aquacoles pour la dactylographie et la mise en page de ce rapport.

Sommaire

| | |
|---------------------------------------|-----------|
| 1. Introduction | 4 |
| 2. Matériel et méthodes | 7 |
| 3. Résultats | 11 |
| 4. Conclusions et perspectives | 20 |
| 5. Bibliographie | 22 |

1. Introduction

Dans le cadre d'un programme de prospection, mené par la Direction Départementale de l'Agriculture de la Vendée, des forages exploratoires, réalisés en divers point du littoral de la baie de Bourgneuf, ont mis à jour une quantité importante d'eau salée souterraine tant sur l'île de Noirmoutier que sur le continent (Bresson, 1982).

Les nappes aquifères (fig. 1) couvrent une vaste surface (150 km²) et sont piégées à une faible profondeur, entre (-5 et -15 m) dans des calcaires éocènes fracturés situés sous une couche imperméable d'argile.

Le volume total a été estimé entre 1 et 3 milliards de m³ sur les pourtours de la baie de Bourgneuf et des essais de pompage de la nappe ont montré, sauf rares exceptions, que l'exploitation de cette eau pouvait se faire à des débits de plusieurs dizaines de m³/h sans rabattement notable du niveau dans le forage (Roy, 1992).

Le Laboratoire Conchylicole des Pays de la Loire (L.C.P.L.) situé dans le polder aquacole des champs (fig. 1) dispose depuis 1984 de 3 forages d'eau salée souterraine dans l'enceinte de sa station expérimentale.

Les valeurs moyennes et la variabilité des principaux paramètres physico-chimiques analysés sur plusieurs années à la fois dans l'eau de mer irriguant le polder par l'intermédiaire d'un canal d'alimentation, et l'eau salée souterraine pompée à partir d'un forage sont regroupées dans le tableau 1. Les variations des principaux facteurs caractéristiques de l'eau de mer sont importantes lorsque l'on prend en compte les cycles saisonniers sur plusieurs années.

Ainsi la température (1 à 23°C), le pH (7,66 à 8,17), la salinité (29,09 à 35,18), la quantité dissoute d'oxygène (3 à 10 mg/l) et la quantité de matière en suspension (2,5 à 289 mg/l) varient très largement en fonction des saisons et des conditions climatiques.

L'eau salée souterraine à l'état brut est quant à elle beaucoup moins variable si l'on considère les mêmes éléments :

- la température constante de 13,8°C, malgré le fait qu'elle caractérise une ressource géothermique de type « très basse température » (Etienne, 1982), permet cependant d'envisager :

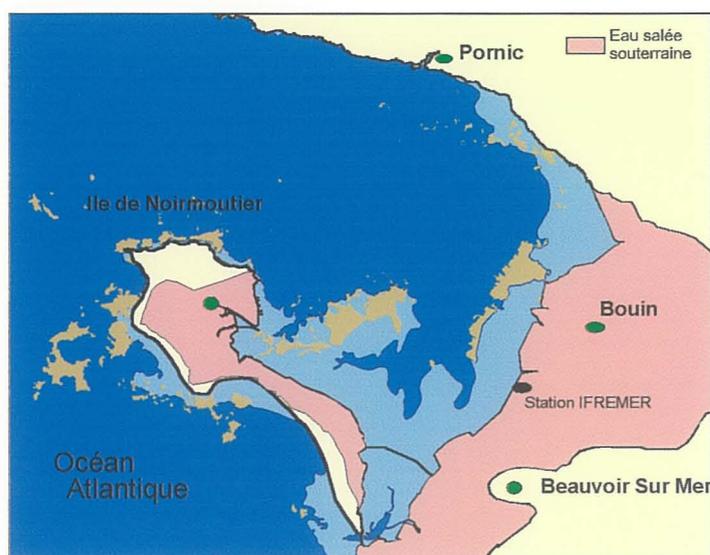


Figure 1 : Positionnement des nappes d'eaux salées souterraines et de la station d'IFREMER, en baie de Bourgneuf.

Tableau 1 : Caractéristiques physico-chimiques comparées de l'eau de mer et de l'eau de forage brute de la station Ifremer de Bouin (IC = Intervalle de confiance à 95 %).

| | Eau de mer | | | | Eau de Forage | | | |
|---------------------|------------|--------|-------|-------|---------------|--------|-------|-------|
| | Mini | Maxi | Moy | I.C | Mini | Maxi | Moy | I.C |
| Température | 1 | 23 | | | 13.13 | 14.35 | 13.81 | 0.12 |
| pH à 20°C | 7.66 | 8.17 | | | 7.04 | 7.15 | 7.1 | 0.03 |
| Salinité | 29.09 | 35.18 | 32.5 | | 30.5 | 34.5 | 32.44 | 0.56 |
| O2 (mg/l) | 3 | 10 | | | 0.0164 | 0.0328 | 0.02 | 0 |
| N-NH4 (umole/l) | 5.3 | 46.3 | 21.71 | 3.25 | 294.5 | 406.5 | 339 | 16 |
| N-NO2 (umole/l) | | | | | 0.083 | 0.29 | 0.17 | 0.04 |
| N-NO3 (umole/l) | | | | | 0.22 | 2.49 | 0.97 | 0.24 |
| P-PO4 (umole/l) | 0 | 341 | 124 | 28.82 | 31.06 | 42.25 | 37.12 | 3.87 |
| Silicates (umole/l) | 9.12 | 196.92 | 53.37 | 11.58 | 88 | 345 | 203 | 30.11 |
| Fer (mg/l) | | | | | 3.066 | 4.822 | 3.77 | 0.24 |
| Manganèse(ug/l) | | | | | 0.98 | 1.427 | 1.17 | 0.07 |
| MES (mg/l) | 2.5 | 289 | | | | | | |

. l'utilisation de ces eaux pour réchauffer l'eau de mer en hiver ou la refroidir en été.

. le pH (7,10), plus acide que les valeurs habituelles de l'eau de mer, et la présence de fortes teneurs en fer (3,77 mg/l) qui précipite en hydroxyde ferrique au contact de l'air interdisent toute utilisation de cette eau en contact direct avec les bivalves, sans un traitement préalable.

De plus, elle possède des caractéristiques chimiques propres :

- sa richesse nutritive est élevée avec une prédominance de la forme ammoniacale (339 μ Mole/l) sur les formes oxydées de l'azote ;
- le rapport des concentrations en éléments nutritifs notamment de l'azote et du phosphore (10) et de l'azote et de la silice (1,6) tendent à montrer une forte potentialité pour la croissance des diatomées (Redfield, 1934) .

Cependant, si les variations des caractéristiques physico -chimiques de ces eaux salées souterraines sont faibles au sein d'une même aire géographique, elles peuvent être importantes à l'échelle de la baie de Bourgneuf, notamment en ce qui concerne les rapports des concentrations en éléments nutritifs et les salinités (Robert, 1987).

Toutefois elles restent, pour la plupart, compatibles avec l'utilisation indirecte de cette eau pour la fourniture de calories, frigories et la production phytoplanctonique en aquaculture.

Ainsi de nombreuses études ont été réalisées sur l'eau salée souterraine avec ses caractéristiques propres :

- mise au point de la production extérieure en grands volumes de la diatomée *Skeletonema costatum* (Baud, 1991) ;
- mise au point du prégrossissement intensif de coquillage en nurserie (Baud et Bacher, 1990 ; Bacher et Baud, 1992) ;
- mise au point du demi élevage et de l'affinage contrôlé des coquillages d'intérêt commercial (Baud et al, 1992; Baud et al, 1995; Haure et al, 1996) ;
- mise au point d'un procédé de testage de souches sélectionnées d'hybrides et de polyploïdes à l'état de juvéniles ou d'adultes (Baud et al, 1997; Naciri-Graven et al (1999)) ;
- mise au point d'une méthode standardisée de choc thermique sur les juvéniles d'huîtres creuses (Glemarec et al, 1997 ; Catois et al,1999).

Suite à ces travaux, qui pour certains ont débouché sur des transferts de technologie et de procédés à la profession conchylicole, il est apparu important de persévérer dans la recherche de nouvelles potentialités et de nouvelles utilisations de l'eau salée souterraine.

En effet, la maîtrise du milieu d'élevage se heurte à la difficulté de contrôler la richesse phytoplanctonique naturelle de l'eau de mer, sa salinité et sa turbidité au cours des saisons.

Par ailleurs, des travaux de recherche sur le traitement de l'eau salée souterraine à des fins de milieu d'élevage pour la pisciculture marine ont été initiés par Hussenot en 1980 à la station expérimentale Aqualive de Noirmoutier.

Ces résultats ont été repris et optimisés avec succès et à grande échelle sur le poisson par la société France-Turbot.

Dans ce contexte, il était opportun d'expérimenter un traitement spécifique de l'eau salée souterraine du polder des champs, à la fois pour l'élevage des mollusques bivalves d'intérêt commercial et pour la diversification des productions de micro algues.

C'est dans cette perspective qu'un outil expérimental de traitement a été développé au sein de la station de recherche IFREMER de Bouin (L.C.P.L).

Chaque étape de la chaîne de traitement a été reprise et optimisée pour obtenir une eau traitée ayant des caractéristiques physico-chimiques compatibles avec les besoins physiologiques des coquillages afin de permettre une croissance et une survie proches de celles obtenues en eau de mer.

2. Matériel et méthodes

Sur la base de l'expérience d'Aqualive, un pilote de traitement de l'eau salée souterraine de 3 m³/h a été réalisé (photo 1).

L'eau souterraine salée après pompage dans le sous sol est dépourvue d'oxygène dissous.

Le fait de la saturer en oxygène favorise une série de réactions physiques et chimiques qui vont permettre en final de se rapprocher de la qualité de l'eau de mer.

Pour ce faire, différentes colonnes de dégazage sont utilisées ainsi que des filtres pour retenir les produits de précipitation et créer des milieux favorables à la colonisation bactérienne nitrifiante (fig 2).



Photographie 1 : Vue d'ensemble du pilote de traitement de l'eau salée souterraine.

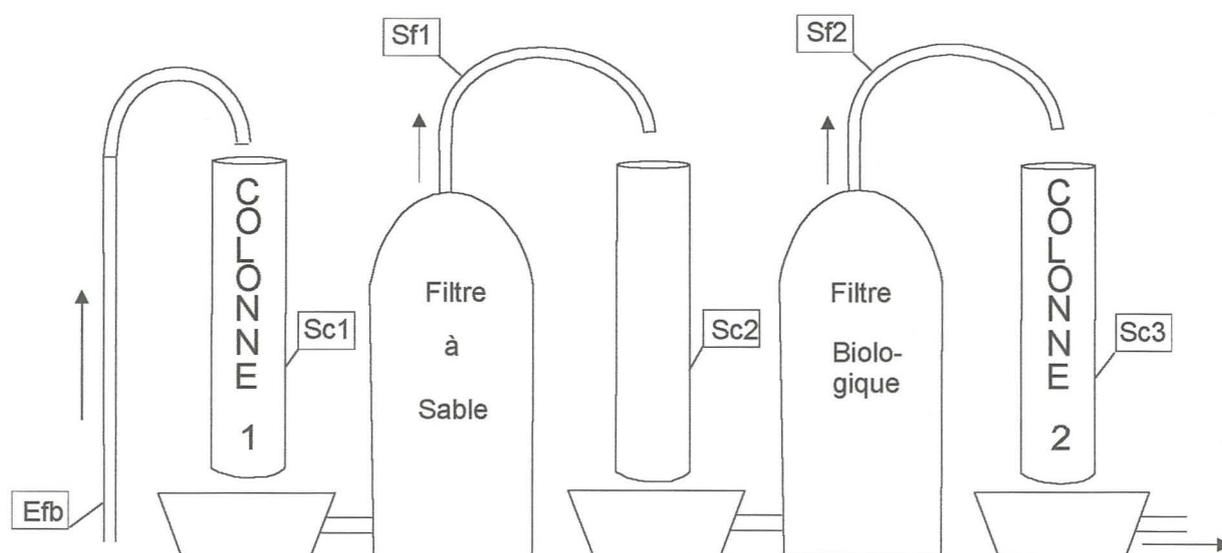


Figure 2 : Illustration des différentes étapes de l'épuration de l'eau salée souterraine.

L'eau de forage à l'état brut (EFB) est pompée dans le sous sol et envoyée dans une première colonne de dégazage (colonne 1).

Le principe consiste à assurer un contact optimisé entre l'eau à traiter et l'air afin de rééquilibrer les pressions partielles de gaz dissous à leur valeur dans l'air.

Pour ce faire, une colonne de PVC de diamètre 200 mm est garnie d'anneaux plastiques (Betaring ou Pall) sur lesquels l'eau ruisselle par gravité.

Le rendement des colonnes est conditionné par la hauteur de la colonne, la vitesse de passage de l'eau et le choix du garnissage.

Une hauteur de 2 m suffit pour saturer l'eau en oxygène dissous, en sortie de colonne (SC1) ; en revanche, les vitesses de passage de l'eau sont fonctions des contraintes hydrauliques.

Afin d'assurer un bon dégazage de gaz carbonique, et par la même, de bénéficier de l'élévation du pH, il est conseillé de rester à des débits proches de $100 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$.

Du fait de la forte teneur en fer (3,7 mg/l) de l'eau de forage, il est important d'utiliser des anneaux qui offrent des pertes de charges faibles, afin de limiter les risques d'engorgement liés au colmatage par le précipité de fer.

En résumé, le choix du garnissage est un compromis entre le coefficient de garnissage, dont dépendent les pertes de charge, et la surface spécifique des anneaux, dont dépend l'efficacité, sachant qu'il faut rester au dessous de 30-40 mm de perte de charge par mètre linéaire de colonne pour éviter le point d'engorgement (limite d'efficacité de système).

L'entretien des colonnes dépend également de la nature de l'eau à traiter. Dans notre cas, il est nécessaire de pratiquer un lavage quotidien par rétro lavage et décompactage par injection d'air sous pression. Il est également nécessaire de pratiquer un nettoyage mensuel à base d'acide chlorhydrique à 35 % dilué à 10 % afin de préserver l'efficacité dans le temps de l'outil.

Le rééquilibrage partiel des gaz dissous (Oxygène et CO_2) a pour effet quasi instantané de transformer le fer ferreux à l'état de précipité d'oxyde de fer. Les particules ainsi formées sont partiellement piégées dans la colonne 1 et majoritairement retenues dans le filtre à sable.

Le filtre étudié est un filtre polyester cylindrique de 0,6 m de diamètre par 1,8 m de hauteur. L'eau après avoir été saturée en oxygène par l'intermédiaire d'une tour de dégazage, est pompée dans un bac de reprise et injectée en partie haute du filtre dans une crépine qui assure sa diffusion.

La granulométrie, la hauteur du sable dans le filtre et le débit circulant sont les principaux paramètres à prendre en compte pour optimiser l'épuration du fer.

Ainsi, différentes combinaisons de paramètres ont été étudiées sur le rendement d'épuration à partir de sable de carrière tamisé industriellement :

- 2 granulométries (0,95 et 1,35 mm de diamètre),
- 3 hauteurs de sable (0,55 - 0,82 et 1,10 m),
- 3 débits d'eau de forage (1, 2 et 3 m³/h).

Ces tests ont été effectués après 3 semaines de fonctionnement du filtre afin de prendre en compte l'effet immédiat d'épuration du fer mais aussi les effets secondaires sur l'épuration du phosphore et du manganèse par effet physique et par épuration biologique des bactéries colonisatrices.

L'eau ainsi épurée (SF1) est renvoyée par pompage dans une deuxième colonne de dégazage identique à la première colonne pour ramener l'oxygène dissous à saturation (SC2). Elle est ensuite pompée dans un bac de reprise muni d'une surverse et injectée en partie haute d'un filtre de même modèle que le filtre à sable.

Ce dernier est rempli d'un substrat composé de particules d'argile expansée (Biogrog) de faible granulométrie (2 à 3 mm) pour augmenter son efficacité relative.

Ce filtre est essentiellement utilisé pour la nitrification de l'eau salée souterraine. La nitrification correspond à l'oxydation de l'azote ammoniacal en nitrite puis en nitrate. Cette modification qualitative de la forme azotée s'effectue en deux étapes par des microorganismes autotrophes :

. l'oxydation de NH_4^+ en NO_2^- est essentiellement réalisée par les germes Nitromonas.

. l'oxydation de NO_2^- en NO_3^- est l'œuvre de bactéries du genre nitrobacter.

La réaction globale simplifiée de la nitrification peut s'écrire :



La nitrification est possible si l'azote est présent au départ sous forme ammoniacale. La vitesse de nitrification dépend de la température et demande des besoins en O_2 en relation avec les quantités d'azote à traiter (4,6 mg/ O_2 sont nécessaires pour métaboliser 1 mg de NH_4^+).

Une recirculation permanente dans le filtre biologique est assurée pour éviter un déficit en oxygène dissous qui pourrait ralentir le métabolisme bactérien.

Le lavage est assuré par rétro lavage 2 fois par semaine ainsi que le décompactage des particules d'argile par le dépôt de précipités de manganèse à l'aide d'une injection d'air sous pression.

A la sortie du 2^{ème} filtre (SF2), l'eau passe une nouvelle fois dans une colonne de dégazage (colonne 3). Elle va être une nouvelle fois rechargée en oxygène et parfaire le dégazage de ses gaz dissous avant d'être utilisée (SC3) à des fins aquacoles.

Toutes les analyses physico-chimiques faites sur les eaux salées souterraines à des fins de suivi du rendement d'épuration ont suivi les protocoles standardisés adaptés à l'eau de forage mis au point par Moreau (1993).

3. Résultats

Le suivi de 24 paramètres physico-chimiques de l'eau de forage à l'état brut, de la station IFREMER de Bouin, a été réalisé tous les trimestres pendant 2 ans (tableau 2).

Tableau 2 : Caractéristiques physico-chimiques de l'eau de forage brute de la station Ifremer de Bouin.

| | nov-93 | janv-94 | mars-94 | mai-94 | juil-94 | sept-94 | nov-94 | janv-95 | mars-95 | mai-95 | août-95 | oct-95 | Min | Max | Moy |
|----------------------------|--------|---------|---------|--------|---------|---------|--------|---------|---------|--------|---------|--------|-------|-------|-------|
| Température | 13,75 | 13,25 | 13,13 | 13,93 | 14,02 | 14 | 13,58 | 13,48 | 13,63 | 13,75 | 14 | 13,83 | 13,13 | 14,02 | 13,7 |
| pH à 20° | 7,22 | 7,34 | 7,39 | 7,43 | 7,31 | 7,31 | 7,32 | 7,32 | 7,29 | 7,19 | 7,12 | 7,21 | 7,12 | 7,43 | 7,29 |
| Salinité | 30,5 | 31,3 | 32 | 32 | 30,5 | 32,5 | 32,5 | 31,8 | 31,5 | 31,5 | 33,8 | 30,5 | 30,5 | 33,8 | 31,7 |
| O ₂ (mg/l) | | | 0,21 | 0,12 | 0,08 | 0,04 | 0,04 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | | | |
| Hydro sulfuré µg/l | | | | | | | | | 487 | 329 | 139 | 1366 | | | |
| HCO ₃ (mMole/l) | 9,47 | 9,64 | 10,45 | 10,31 | 10,27 | 7,53 | 8,35 | 8,25 | 10,53 | 14,49 | 9,15 | 15,54 | 7,53 | 15,54 | 10,33 |
| CO ₃ (mMole/l) | 0,11 | 0,1 | 0,17 | 0,18 | 0,15 | 0,1 | 0,11 | 0,1 | 0,13 | 0,14 | 0,1 | 0,16 | 0,1 | 0,1 | 0,13 |
| Co ₂ (mMole/l) | 0,52 | 0,66 | 0,44 | 0,4 | 0,47 | 0,39 | 0,44 | 0,45 | 0,59 | 0,99 | 0,07 | 1,02 | 0,07 | 1,02 | 0,54 |
| Nh ₄ (µmole/l) | 340 | 372 | 430 | 429 | 407 | 395 | 445 | 484 | 444 | 428 | 471 | 367 | 340 | 484 | 418 |
| No ₂ (µmole/l) | 0,07 | 0,06 | 0,06 | 0,03 | 0,17 | 0,23 | 0,22 | 0,11 | 0,16 | 0,03 | 0,13 | 0,2 | 0,03 | 0,23 | 0,12 |
| No ₃ (µmole/l) | 0,4 | 1,23 | 0,76 | 0,56 | 1,29 | 2,49 | 1,52 | 0,44 | 1,49 | 1,3 | 1,25 | 1,31 | 0,4 | 2,49 | 1,17 |
| PO ₄ (µmole/l) | 33,68 | 19,02 | 28,05 | 25,91 | 33,91 | 26,49 | 23,33 | 24,27 | 30,64 | 29,6 | 38,91 | 26,01 | 19,02 | 38,91 | 26,32 |
| Silicates (µmole/l) | 158 | 157 | 217 | 282 | 302 | 345 | 234 | 127 | 88 | 151 | 193 | 169 | 99 | 345 | 203 |
| Calcium (Ca mg/l) | 351 | 369 | 406 | 351 | 276 | 398 | 418 | 359 | 430 | 285 | 374 | 467 | 276 | 467 | 374 |
| Magnesium (Mg mg/l) | 952 | 1965 | 1009 | 1058 | 740 | 722 | 774 | 727 | 853 | 1306 | 4009 | 1294 | 574 | 1965 | 1017 |
| Sodium (Na mg/l) | 11159 | 10940 | 11930 | 10967 | 11793 | 11184 | 10 452 | 9483 | 11664 | 11228 | 11123 | 11249 | 9483 | 11930 | 11096 |
| Potassium (K mg/l) | 236 | 234 | 288 | 260 | 205 | 272 | 196 | 198 | 298 | 179 | 239 | 340 | 179 | 340 | 245 |
| Chlorures (Cl mg/l) | 17928 | 17253 | 17324 | 18318 | 18740 | 18460 | 18531 | 18176 | 17111 | 17821 | 19170 | 18371 | 17111 | 19170 | 18100 |
| (SO ₄ mg/l) | 2353 | 2786 | 2464 | 2472 | 2477 | 22400 | 2552 | 2607 | 2497 | 2699 | 2565 | 2727 | 2240 | 2786 | 2537 |
| Fer (Fe mg/l) | 2,79 | 4,08 | 2,72 | 2,51 | 3,05 | 2,85 | 3,34 | 3,1 | 3,52 | 3,15 | 3,66 | 3,54 | 2,51 | 4,06 | 3,19 |
| Cuivre (Cu µg/l) | 0,59 | 0,34 | 0,21 | 0,7 | 0,13 | 0,7 | 0,12 | 0,03 | 0,14 | 0,05 | 0,2 | 0,07 | 0,03 | 0,7 | 0,27 |
| Manganèse (Mn µg/l) | 343 | 385 | 374 | 327 | 374 | 348 | 378 | 371 | 396 | 371 | 381 | 442 | 327 | 442 | 374 |
| Plomb (Pb µg/l) | 0,5 | 0,5 | | | | | | | | | | | | | |
| Zinc (Zn µg/l) | 4,6 | 4,4 | 3,5 | 4,2 | 2,5 | 3,8 | 2 | 2,2 | 2,3 | 3,7 | 1,7 | 3 | 1,7 | 4,6 | 3,2 |

Hormis les paramètres habituellement suivis, il est à noter la concentration élevée d'éléments tels que le gaz carbonique (0,54 mMole/l), les silicates (203 μ Mole/l) avec toutefois des variations temporelles importantes (max=99 μ Mole/l, min=345 μ Mole/l), le Manganèse (374 μ g/l) et les ions Chlorures (18100 mg/l), Sodium (11096 mg/l), Magnésium (1017mg/l) et Calcium (374 mg/l).

Les concentrations en certains métaux comme le cuivre (0,27 μ g/l), le Plomb (0,50 μ g/l) et le Zinc (3,20 μ g/l) demeurent à des niveaux acceptables.

Cette eau salée, outre sa richesse en nutriments majeurs qui la rapproche des milieux habituels de culture de micro algues, présente un avantage supplémentaire par rapport à de l'eau de mer enrichie artificiellement en azote et phosphore pour la production de diatomées.

En effet, Moreau (1998) a montré que le fer et le manganèse étaient des chélateurs potentiels qui permettaient d'accroître la production, et la qualité biochimique des cellules phytoplanctoniques.

- Optimisation du filtre à sable

Les résultats obtenus à partir des différentes combinaisons de débits, granulométries et de hauteur de sable dans le filtre de traitement sur le fer, le manganèse et le phosphore sont illustrés par les figures 4, 5 et 6.

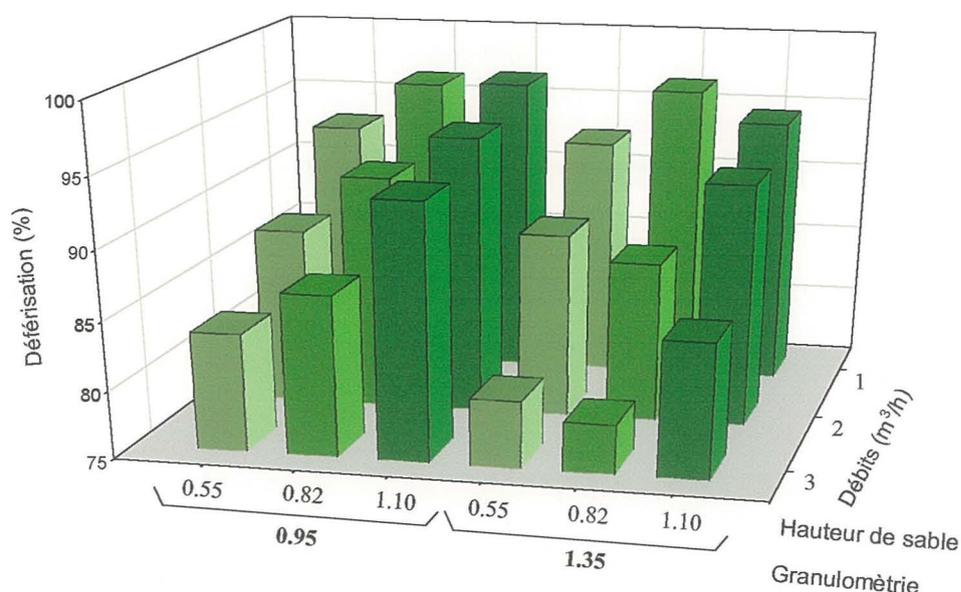


Figure 4 : Influence de la granulométrie, de la hauteur de sable et du débit d'eau salée souterraine transitant dans le filtre, sur le rendement d'épuration du fer.

La granulométrie semble produire un effet significatif sur le rendement de déferrisation (fig. 4). Les résultats pour la granulométrie 0,95 apparaissent meilleurs quelles que soient les modalités des autres paramètres.

Le débit est également sensible en matière d'épuration ainsi que la hauteur de sable pour certaines combinaisons.

Des résultats satisfaisants avec 93,5% d'épuration du fer sont obtenus (tab. 3) à la granulométrie 0,95 avec un débit de 3 m³/h et une hauteur de sable de 1,10 m.

Tableau 3 : Cinétique de traitement du fer en fonction du temps, de la vitesse de passage et de la hauteur de substrat.

| Fer (mg/l) | heures | eau forage | filtre sable | filtre bio | Débit m ³ /H | GRANULO | HAUTEUR | Epu % |
|------------|--------|------------|--------------|------------|-------------------------|---------|---------|-------|
| 10-mars | 2 | 3,59 | 0,25 | 0,14 | 1 | 0,95 | 0,55 | 93,1 |
| 11-mars | 2 | 3,54 | 0,43 | 0,17 | 2 | 0,95 | 0,55 | 87,9 |
| 12-mars | 2 | 3,59 | 0,59 | 0,21 | 3 | 0,95 | 0,55 | 83,6 |
| 13-mars | 2 | 3,57 | 0,12 | 0,05 | 1 | 0,95 | 0,82 | 96,6 |
| 17-mars | 2 | 3,56 | 0,28 | 0,08 | 2 | 0,95 | 0,82 | 92,1 |
| 18-mars | 2 | 3,64 | 0,48 | 0,08 | 3 | 0,95 | 0,82 | 86,7 |
| 20-mars | 2 | 3,60 | 0,12 | 0,08 | 1 | 0,95 | 1,1 | 96,8 |
| 23-mars | 2 | 3,57 | 0,17 | 0,14 | 2 | 0,95 | 1,1 | 95,2 |
| 19-mars | 2 | 3,52 | 0,23 | 0,06 | 3 | 0,95 | 1,1 | 93,5 |
| 27-mars | 2 | 3,70 | 0,28 | 0,15 | 1 | 1,35 | 0,55 | 92,6 |
| 27-mars | 2 | 3,76 | 0,43 | 0,11 | 2 | 1,35 | 0,55 | 88,5 |
| 27-mars | 2 | 3,72 | 0,75 | 0,14 | 3 | 1,35 | 0,55 | 79,9 |
| 31-mars | 2 | 3,67 | 0,12 | 0,07 | 1 | 1,35 | 0,82 | 96,7 |
| 31-mars | 2 | 3,61 | 0,48 | 0,12 | 2 | 1,35 | 0,82 | 86,7 |
| 31-mars | 2 | 3,71 | 0,80 | 0,17 | 3 | 1,35 | 0,82 | 78,6 |
| 01-avr | 2 | 3,72 | 0,20 | 0,17 | 1 | 1,35 | 1,1 | 94,6 |
| 01-avr | 2 | 3,63 | 0,27 | 0,12 | 2 | 1,35 | 1,1 | 92,7 |
| 01-avr | 2 | 3,61 | 0,55 | 0,17 | 3 | 1,35 | 1,1 | 84,8 |

Pour le manganèse (fig 5), la hauteur de sable et la granulométrie ne semblent pas prédominants . Les meilleurs résultats d'épuration supérieurs à 80% (tab. 4), sont obtenus aux débits les plus faibles (1 et 2 m³/h).

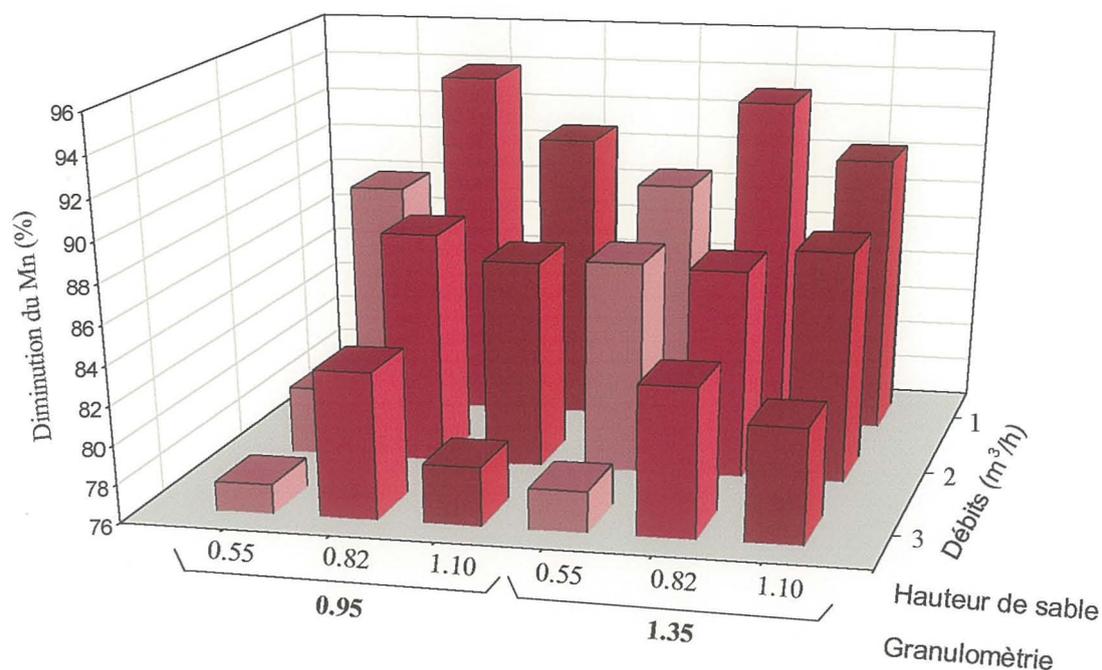


Figure 5 : Influence de la granulométrie, de la hauteur de sable et du débit d'eau salée souterraine transitant dans le filtre, sur le rendement d'épuration du Manganèse.

Tableau 4 : Cinétique de traitement du Manganèse en fonction du temps, de la vitesse de passage et de la hauteur de substrat.

| Mn (mg/l) | heures | eau forage | filtre sable | filtre bio | Débit m3/H | GRANULO | HAUTEUR | Epu % |
|-----------|--------|------------|--------------|------------|------------|---------|---------|-------|
| 10-mars | 2 | 1,41 | 0,52 | 0,17 | 1 | 0,95 | 0,55 | 88,0 |
| 11-mars | 2 | 1,06 | 0,52 | 0,22 | 2 | 0,95 | 0,55 | 79,5 |
| 12-mars | 2 | 1,06 | 0,46 | 0,24 | 3 | 0,95 | 0,55 | 77,5 |
| 13-mars | 2 | 1,32 | 0,49 | 0,08 | 1 | 0,95 | 0,82 | 94,0 |
| 17-mars | 2 | 1,43 | 0,51 | 0,17 | 2 | 0,95 | 0,82 | 87,9 |
| 18-mars | 2 | 1,51 | 0,57 | 0,25 | 3 | 0,95 | 0,82 | 83,5 |
| 20-mars | 2 | 1,25 | 0,42 | 0,11 | 1 | 0,95 | 1,1 | 90,9 |
| 23-mars | 2 | 1,35 | 0,45 | 0,18 | 2 | 0,95 | 1,1 | 86,7 |
| 19-mars | 2 | 1,36 | 0,59 | 0,29 | 3 | 0,95 | 1,1 | 79,0 |
| 27-mars | 2 | 1,22 | 0,42 | 0,14 | 1 | 1,35 | 0,55 | 88,7 |
| 27-mars | 2 | 1,17 | 0,51 | 0,15 | 2 | 1,35 | 0,55 | 86,9 |
| 27-mars | 2 | 1,15 | 0,54 | 0,25 | 3 | 1,35 | 0,55 | 78,1 |
| 31-mars | 2 | 1,27 | 0,40 | 0,09 | 1 | 1,35 | 0,82 | 93,2 |
| 31-mars | 2 | 1,38 | 0,48 | 0,18 | 2 | 1,35 | 0,82 | 86,7 |
| 31-mars | 2 | 1,27 | 0,63 | 0,21 | 3 | 1,35 | 0,82 | 83,6 |
| 01-avr | 2 | 1,35 | 0,45 | 0,13 | 1 | 1,35 | 1,1 | 90,4 |
| 01-avr | 2 | 1,47 | 0,49 | 0,18 | 2 | 1,35 | 1,1 | 87,9 |
| 01-avr | 2 | 1,29 | 0,60 | 0,23 | 3 | 1,35 | 1,1 | 81,9 |

Pour le phosphore (fig. 6), la granulométrie semble être le paramètre le plus sensible pour l'efficacité de rétention du phosphore. La granulométrie de 0,95 est significativement supérieure en matière de rendement (tab 5) quelles que soient les autres modalités par rapport à la granulométrie 1,35.

Les débits quant à eux semblent curieusement d'un meilleur rendement à niveau élevé ($3\text{ m}^3/\text{h}$) par rapport à la valeur basse de $1\text{ m}^3/\text{h}$ pour l'épuration de cet élément.

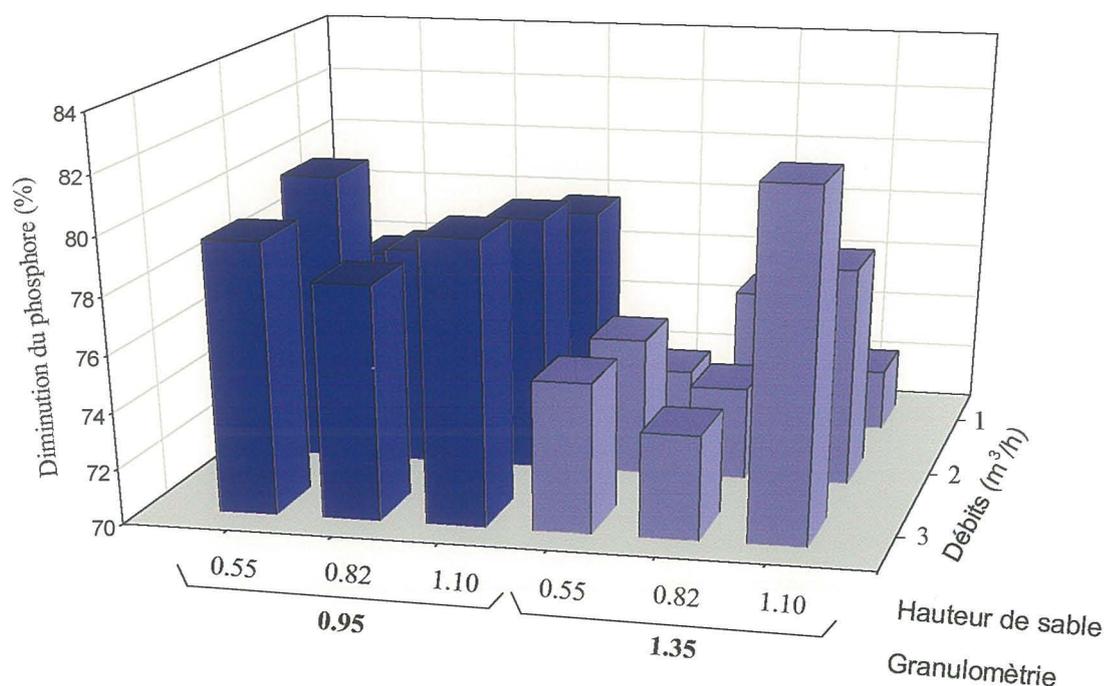


Figure 6 : Influence de la granulométrie, de la hauteur de sable et du débit d'eau salée souterraine transitant dans le filtre, sur le rendement d'épuration du phosphore.

Tableau 5 : Cinétique de traitement du phosphore en fonction du temps, de la vitesse de passage et de la hauteur de substrat.

| PO4 (µmole/l) | heures | eau forage | filtre sable | filtre bio | Débit m ³ /H | GRANULO | HAUTEUR | Epu % |
|---------------|--------|------------|--------------|------------|-------------------------|---------|---------|-------|
| 10-mars | 2 | 37,27 | 8,37 | 9 | 1 | 0,95 | 0,55 | 75,9 |
| 11-mars | 2 | 44,31 | 11,31 | 8,74 | 2 | 0,95 | 0,55 | 80,3 |
| 12-mars | 2 | 37,83 | 9,63 | 7,7 | 3 | 0,95 | 0,55 | 79,6 |
| 13-mars | 2 | 38,28 | 13,51 | 9,87 | 1 | 0,95 | 0,82 | 74,2 |
| 17-mars | 2 | 40,55 | 10,36 | 9,01 | 2 | 0,95 | 0,82 | 77,8 |
| 18-mars | 2 | 40,89 | 10,26 | 8,87 | 3 | 0,95 | 0,82 | 78,3 |
| 20-mars | 2 | 47,19 | 12,26 | 10,46 | 1 | 1,95 | 1,1 | 77,8 |
| 23-mars | 2 | 42,82 | 10,36 | 8,97 | 2 | 0,95 | 1,1 | 79,1 |
| 19-mars | 2 | 40,66 | 10,47 | 8,15 | 3 | 0,95 | 1,1 | 80,0 |
| 27-mars | 2 | 42,25 | 14,17 | 11,93 | 1 | 1,35 | 0,55 | 71,8 |
| 27-mars | 2 | 45,22 | 12,49 | 11,33 | 2 | 1,35 | 0,55 | 74,9 |
| 27-mars | 2 | 34,68 | 11,31 | 8,58 | 3 | 1,35 | 0,55 | 75,3 |
| 31-mars | 2 | 46,61 | 14,12 | 11,64 | 1 | 1,35 | 0,82 | 75,0 |
| 31-mars | 2 | 39,30 | 13,11 | 10,51 | 2 | 1,35 | 0,82 | 73,3 |
| 31-mars | 2 | 40,43 | 9,21 | 10,63 | 3 | 1,35 | 0,82 | 73,7 |
| 01-avr | 2 | 43,51 | 13,11 | 12,09 | 1 | 1,35 | 0,82 | 72,2 |
| 01-avr | 2 | 47,07 | 10,89 | 10,47 | 2 | 1,35 | 0,82 | 77,8 |
| 01-avr | 2 | 44,43 | 9,84 | 7,93 | 3 | 1,35 | 0,82 | 82,2 |

En conclusion, l'optimisation de l'épuration du fer, du manganèse et du phosphore peut être obtenue sur le pilote étudié en appliquant dans le filtre à sable, la combinaison suivante des paramètres testés :

- granulométrie du sable : 0,95 mm de diamètre,
- hauteur du sable : 1,10 m,
- débit d'eau à traiter : 2 à 3 m³/h.

- *Optimisation du filtre biologique*

La cinétique d'épuration de l'azote de la forme ammoniacale (N-NH₄⁺) à la forme nitrate (N-NO₃⁻) est illustrée par la figure 7.

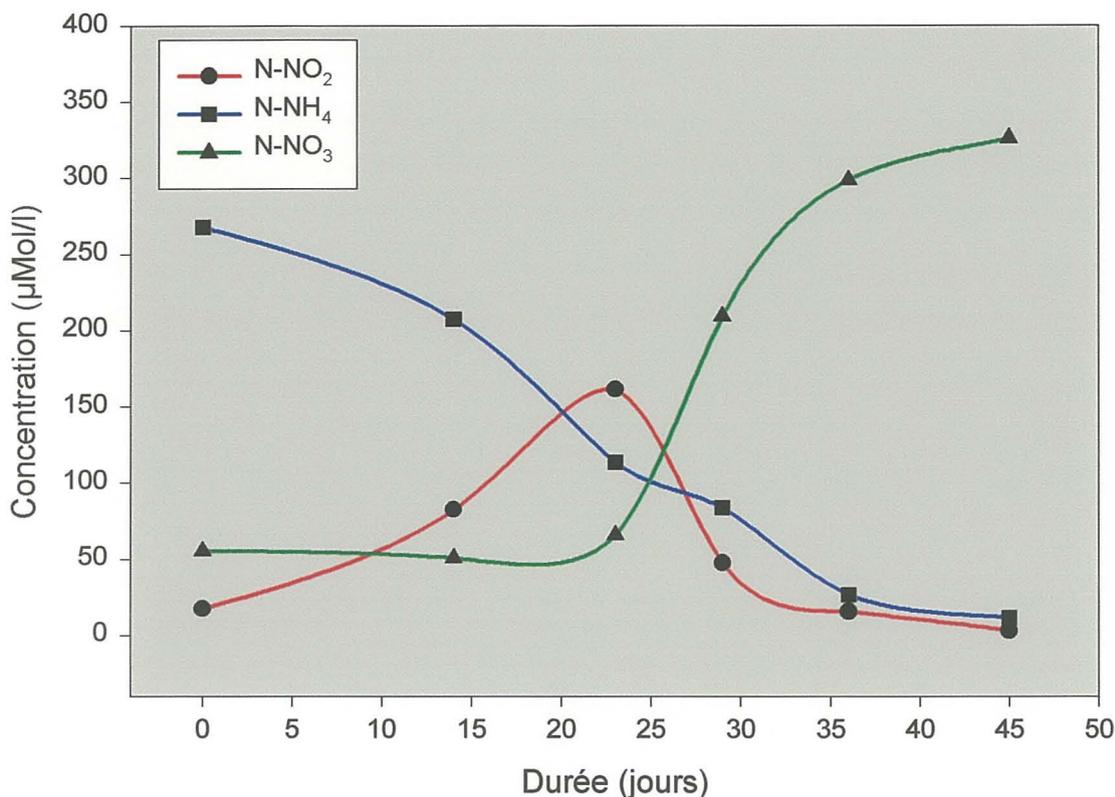


Figure 7 : Cinétique de nitrification de l'eau salée souterraine.

Avec un débit de passage dans le filtre biologique de $2 \text{ m}^3/\text{h}$ et à la température de $13,7^\circ\text{C}$, l'azote ammoniacal a été éliminé de façon continue jusqu'au 37^{ème} jour pour ensuite stagner aux valeurs comprises entre 90 et 97 % d'épuration.

Parallèlement à cette diminution de l'ammoniaque, les nitrites sont passés du 1^{er} jour au 23^{ème} jour de $17,7 \text{ µMole/l}$ à $161,6 \text{ µMole/l}$.

Après avoir atteint une valeur maximale le 23^{ème} jour, une diminution importante des concentrations en nitrite s'est opérée jusqu'au 30, 35^{ème} jour, pour se stabiliser après le 45^{ème} jour à environ 20 µMole/l .

Durant la montée des nitrites, les nitrates sont demeurés à la concentration d'environ 50 µMole/l . Après le 28^{ème} jour, la diminution des valeurs d'ammoniaque et de nitrites s'est accompagnée par une élévation rapide des teneurs en nitrate pour atteindre en 20 jours une concentration d'environ 300 µMole/l soit une transformation quasi totale ($> 90 \%$) de l'ammoniaque en nitrate.

En outre, à la suite de pannes accidentelles, il a été constaté que les bactéries nitrifiantes étaient relativement tolérantes à des périodes de déficit en oxygène pouvant aller jusqu'à 24 h.

Le rendement maximum du filtre biologique est atteint après 45 jours de mise en service ce qui correspond à la durée de mise en place du lit bactérien pour une température de 14°C en eau salée souterraine.

Cela sous-entend que pendant ce laps de temps, la vitesse de passage dans le filtre doit rester constante.

Ainsi, pour une charge hydraulique de $48 \text{ m}^3/\text{jour}$ soit une vitesse apparente de 7 m/h et un volume de support de $0,35 \text{ m}^3$, avec une valeur de N-NH_4^+ de $4,7 \text{ mg/l}$ à traiter (IC à $95 \% = 0,2$) le rendement d'épuration de l'azote s'est situé après 45 jours en moyenne à la valeur de $95,2 \%$ (IC à $95 \% = 2,84$).

De façon concomitante à l'épuration du fer et à la nitrification de l'eau salée souterraine, la saturation en oxygène est atteinte et le dégazage progressif du CO_2 permet au pH de s'élever à un niveau compatible avec l'élevage des coquillages.

Les différentes colonnes de dégazage permettent à l'eau salée d'atteindre un niveau d'oxygène dissous proche de la saturation (fig. 8).

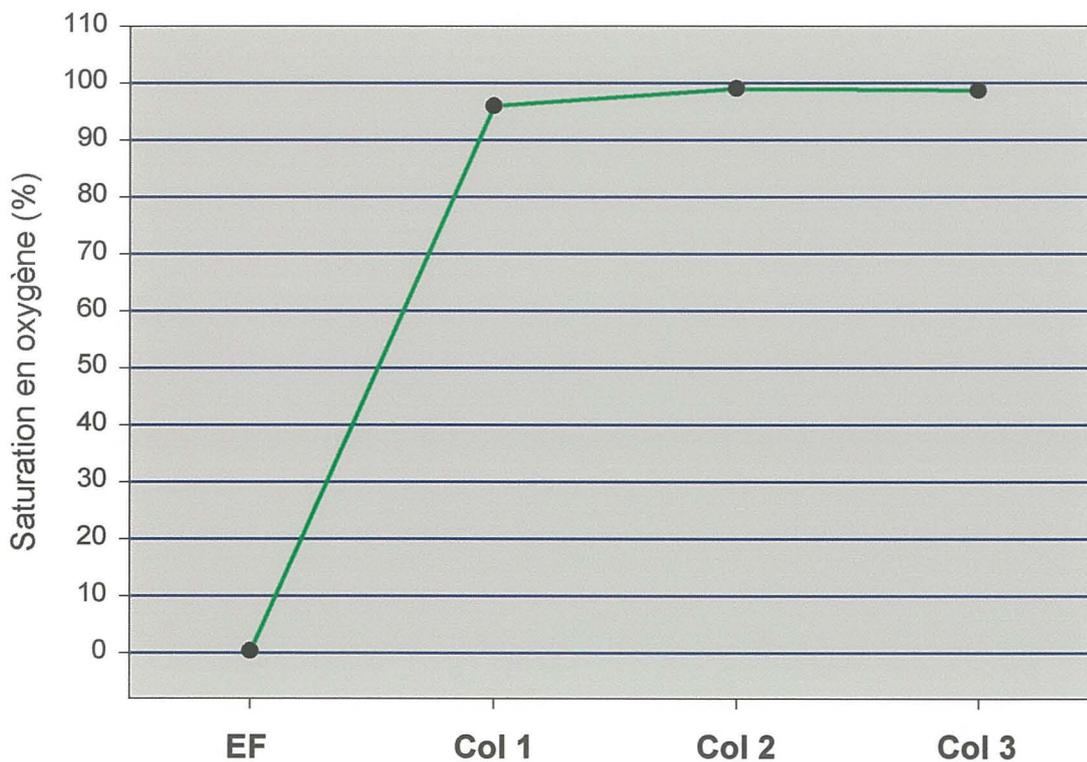


Figure 8 : Evolution de la saturation en oxygène dissous de l'eau salée souterraine en fonction de l'avancée dans la chaîne de traitement.

Alors que l'eau de forage à l'état brut (EF) est quasiment exempte d'oxygène dissous (0,02 mg/l), dès la sortie de la première colonne de dégazage, celle-ci est à 95 % de la saturation en oxygène. La colonne 2 située entre le filtre à sable et le filtre biologique permet de reconstituer l'eau salée souterraine en oxygène consommé par l'oxydation du fer afin de permettre la nitrification dans le filtre biologique.

La saturation finale à l'aide d'une troisième colonne permet d'atteindre 99 % de la saturation en oxygène et de fournir une eau oxygénée pour élever les coquillages dans de bonnes conditions.

Le dégazage par élimination du CO_2 , entraîne une élévation du pH (fig. 9).

Celui-ci proche de 7 à l'état brut augmente linéairement en fonction des différents stades d'épuration pour atteindre une valeur proche de 8 à la sortie de la colonne 3 de dégazage.

Parallèlement, la concentration en gaz carbonique diminue de 0,7 mMole/l à 0,08 mMole/l tout au long de la chaîne de traitement (fig. 9).

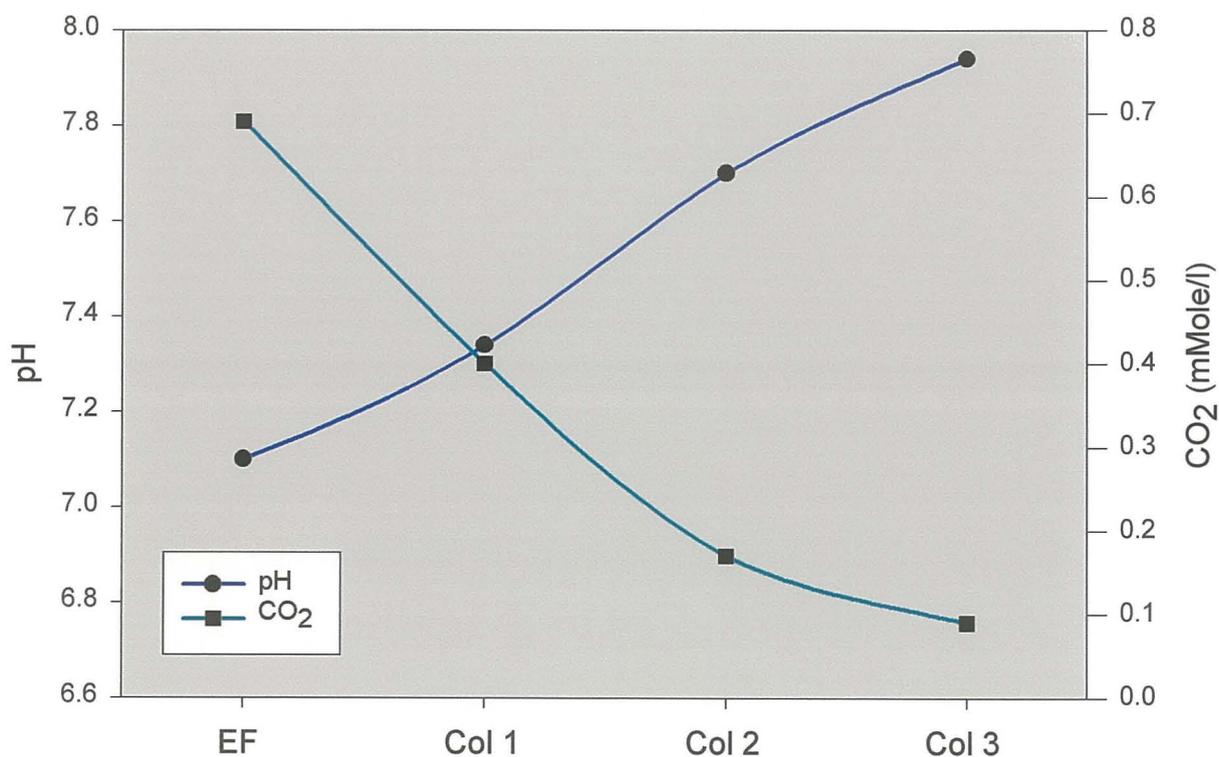


Figure 9 : Evolution du pH et du CO_2 en fonction de l'avancée de l'eau salée souterraine dans la chaîne de traitement.

Les carbonates augmentent linéairement de 0,07 à 0,40mMole/l. Enfin, les silicates restent stables avec une concentration moyenne de 300 µMole/l. A partir de cette eau épurée, différents tests comparatifs par rapport à de l'eau de mer et à de l'eau de forage brute ont été pratiqués.

Il en résulte que les premiers résultats sont positifs sur l'élevage de l'huître creuse *Crassostrea gigas* :

- il est en effet possible d'obtenir des larves viables et des taux de métamorphose corrects sur ce type d'eau (Legoff, com. Pers.) ;
- le prégrossissement est comparable en matières de croissance et de survie à celui d'une eau de mer et produit des animaux de bonne qualité pour les étapes ultérieures de l'élevage (Baud et al, 2000) ;
- l'affinage contrôlé semble possible à réaliser sur eau salée souterraine traitée (Haure, com. Pers.) et permettra de maîtriser à terme à la fois la croissance de la chair mais aussi sa qualité organoleptique (Demaimay, com. pers) ;
- des essais de cette eau traitée comme milieu de culture alternatif à l'eau salée souterraine brute ont permis de produire des souches de phytoplancton et notamment d'*Isochrysis* en grands volumes (600 l) et à l'intérieur (Robard, 1998).

4. Conclusions et perspectives

Les études réalisées en 1988 ont permis de mettre au point un outil de traitement de l'eau salée souterraine à vocation d'élevage de mollusques et de diversification de la production phytoplanctonique.

Ce pilote fonctionne à un débit de 2 m³/h d'eau de forage soit à une charge hydraulique de 48m³/jour correspondant à une vitesse apparente de 7 m/h pour une hauteur de sable de 1,10 m avec une granulométrie de 0,95 mm de diamètre. Les caractéristiques correspondent à un volume de support de 0,35 m³ dans le filtre à sable et du même volume en particules d'argile de 2 à 3 mm de diamètre pour le filtre biologique.

Dans ces conditions, les concentrations d'origine en fer (4 mg/l) et de manganèse (1,2mg/l) sont épurées respectivement à 97,2 % et 86,7 %. Le pH proche de 7, après dégazage se stabilise à une valeur de 8 et la saturation d'oxygène est proche de 100%.

Pour ce qui est de l'azote, la concentration de 4,7 mg/l d'ammoniaque est transformée à 95,2 % en nitrate après 45 jours de traitement.

Ainsi l'eau obtenue après traitement possède des caractéristiques physico-chimiques compatibles avec l'élevage de coquillages.

Par ailleurs, plusieurs expérimentations préliminaires réalisées sur l'huître creuse *Crassostrea gigas* et une espèce de microalgue *Isochrysis galbana* (T-Iso) ont permis de valider l'intérêt de cette eau par rapport à l'eau de mer et/ou l'eau de forage brute.

A court terme, sur la base des résultats obtenus à partir de cet outil, la réalisation d'une chaîne de traitement capable de traiter des débits et volumes beaucoup plus importants (30 m³/h soit 720 m³/jour) est envisagée.

Une automatisation de l'ensemble du système de filtration sera testée par un jeu d'électrovannes pneumatiques pilotées par un automate.

Afin d'éliminer ou de diminuer la mousse produite à partir de la matière organique dissoute, un traitement par écumage (Hussenot et al, 1998) sera également testé.

Cet outil permettra à moyen terme de tester la faisabilité et d'optimiser des applications pour la recherche et pour le transfert de technologie à la profession conchyicole :

- élevage larvaire des mollusques,
- prégrossissement de coquillages en hiver et en été,
- pilote standard de testage de souches issues de la sélection génétique,
- affinage contrôlé des coquillages,
- épuration et stockage des coquillages,
- physiologie comparée de diverses espèces, hybrides ou souches de mollusques,
- diversification des souches de phytoplancton cultivées à des fins d'alimentation des bivalves et d'extraction de molécules à haute valeur ajoutée.

5. Bibliographie

Bacher C. et J-P. Baud (1992). Intensive rearing of juvenile oysters *Crassostrea gigas* in an upwelling system : optimization of biological production. *Aquat Living Resour.* 5, 89-98.

Baud J-P. (1991). Utilisation des eaux salées souterraines en baie de Bourgneuf pour le prégrossissement intensif de la palourde *Ruditapes philippinarum* et de l'huître *Crassostrea gigas* en nourricerie. Mémoire présenté le 20 décembre 1991 pour obtenir le diplôme de recherche universitaire de l'Université des Sciences de Nantes, 65p.

Baud J-P. et C. Bacher (1990). Use of ground saline water for intensive rearing of *Ruditapes philippinarum* juveniles in a nursery system. *Aquaculture* : 88, 157-178.

Baud J-P., J. Haure et A. Bodoy (1992). Intensive culture of the Manila clam *Ruditapes philippinarum* in marine ponds. The impact of rearing densities and feeding levels on growth rates and yields. *Oceanis*, 18(1), 121-132.

Baud J-P., E. Brisset et M. Cardinal (1995). Affinage contrôlé en bassin de l'huître creuse *Crassostrea gigas*. Rapport IFREMER RIDRV 95-17 RA/Bouin, 35p.

Baud J-P., A. Gérard et Y. Naciri-Graven (1997). Comparative growth and mortality of *Bonamia* resistant and wild flat oysters *Ostrea edulis* in an intensive system. First year of experiment. *Marine Biology*, vol 130, Number 1, 1997 : 71-79.

Baud J-P., H. Palvadeau et M. Nourry (2000). Comparaison, en eau de mer et en eau de forage enrichies du prégrossissement intensif de jeunes huîtres creuses. Rapport de contrat : IFREMER/REGION DES PAYS DE LA LOIRE, SMIDAP N° 98 06800 : 25p.

Bresson G. (1988). L'eau souterraine salée au service de l'aquiculture nouvelle. *Géologues*, 83-84 : 51-53.

Catois S., J. Haure, J-L. Martin, M. Nourry, . Palvadeau et J-P. Baud (1999). Optimisation d'une méthode standardisée de choc thermique sur des juvéniles de *Crassostrea gigas* : application à des populations d'écloseries. Rapport de contrat : IFREMER/REGION DES PAYS DE LA LOIRE, SMIDAP N° 98 06802 : 42p.

Etienne H. (1982). Alimentation en eau salée des bassins pour l'aquaculture à partir des eaux souterraines. Programme d'études générales, Note BRGM-PAL-7.

Glemarec Y-M., J. Haure et J-P. Baud (1997). Mise au point d'une méthode standardisée de stress chez *Crassostrea gigas*. Rapport de contrat IFREMER/SECTION CONCHYLICOLE RE-CENTRE OUEST, 45 pp.

Haure J., M. Nourry, N Le Bayon et J-P. Baud (1996). Contrôle des performances des souches d'huîtres plates résistantes au protozoaire *Bonamia ostreae* (2^{ème} année). Rapport IFREMER RIDRV 96.06-RA/Bouin, 36p.

Hussenot J. (1986). Les nappes salées souterraines des marais de l'Atlantique et leurs utilisations aquacoles . « Aquaculture en milieu de marais », 7-8 novembre 1985, Noirmoutier en l'île, France, SMIDAP (Ed.). Nantes. Région des Pays de la Loire. 91-101.

Hussenot J., S. Lefebvre et N. Brossard (1998). Open-air treatment of wastewater from land-based marine fish farms in extensive and intensive systems : current technology and future perspectives. Aquatic Living Resources, 11 :297-304.

Moreau C. (1993). Caractéristiques et gestion des eaux souterraines salées de la baie de Bourgneuf : synthèse des connaissances et standardisation de protocoles communs d'analyse des paramètres de qualité. Rapport ISOMER/SMIDAP, 47pp + annexes.

Moreau C. (1998). Des eaux souterraines salées en baie de Bourgneuf pour la production de microalgues en aquaculture : l'azote ammoniacal, le fer et le manganèse dissous, causes de la variabilité de la fertilité potentielle pour trois diatomées tests. Bull. Soc. Sc. Nat. Ouest de la France, nouvelle série, tome 20, (2) : 49-60.

Naciri-Graven Y., J. Haure, A. Gérard et J-P. Baud (1999). Comparative growth of *Bonamia ostreae* resistant and wild flat oyster *Ostrea edulis* in an intensive system. II. Second year of the experiment. Aquaculture 171, 195-208.

Redfield A.C. (1934). On the proportions of organic derivatives in seawater and their relation to the composition of plankton. In James Johnstone Memorial volume. The university press, Liverpool :176-192.

Robard F. (1998). Essais de cultures en grands volumes sur eau salée souterraine traitée de la microalgue : *Isochrysis affinis galbana* (T.Iso). Mémoire de maîtrise de biologie des populations et des écosystèmes. Université de Nantes, 43p.

Robert J-M. (1987). Valorisation des sites aquacoles existants ou potentiels de la région des pays de la Loire, par utilisation des eaux souterraines pour la production d'algues unicellulaires destinées à l'alimentation de différentes espèces de mollusques au cours de leur cycle d'élevage. Rapport convention Région des Pays de Loire et Université de Nantes, 49p.

Roy C. (1992). Utilisation des eaux souterraines salées. Exemples d'application à Noirmoutier. Géologues, 97 : 37-40.