

Programme « Durabilité des systèmes de production en aquaculture »
Projet « Maîtrise des risques environnementaux en aquaculture »

Hussenot J.*, Mornet F.**,
Le Moine O.***, Geairon P***., Guesdon S.***

* Département Amélioration Génétique, Santé Animale et Environnement – Laboratoire de Génétique et Pathologie, Bouin-La Tremblade

** Centre de Recherche sur les Ecosystèmes Anthropisés, L'Houmeau

*** Laboratoire Environnement Ressources des Pertuis Charentais, La Rochelle-La Tremblade

Octobre 2006



Ifremer

Rapport d'expertise

Etude de la qualité des eaux d'alimentation de l'écloserie de la Ferme Marine de Douhet (FMD), pour une amélioration de la survie larvaire de la daurade royale (*Sparus aurata*)

Etude de la qualité des eaux d'alimentation de
l'écloserie de la Ferme Marine de Douhet (FMD), pour
une amélioration de la survie larvaire de la daurade
royale (*Sparus aurata*)

Diffusion restreinte aux propriétaires de l'étude, selon accord établi par le
contrat FMD-IFREMER N°06/5210687

Fiche documentaire

Numéro d'identification du rapport : Diffusion : libre : <input type="checkbox"/> restreinte : <input checked="" type="checkbox"/> interdite : <input type="checkbox"/>		date de publication : 30/09/2006 nombre de pages : 43 bibliographie : 5 citations illustration(s) : langue du rapport : français
Validé par : J. Hussenot Adresse électronique : jhusseno@ifremer.fr		
Titre de l'article Contrat n° Rapport intermédiaire <input type="checkbox"/> Rapport définitif <input checked="" type="checkbox"/>		
Auteur(s) principal(aux) : Hussenot J.*, Mornet F.** Le Moine O.***, Geairon P***, Guesdon S.***		Organisme / Direction / Service, laboratoire * Département AGSAE - Laboratoire de Génétique et Pathologie, Bouin ** Département AGSAE – CRELA, L'Houmeau *** Laboratoire Environnement Ressources des Pertuis Charentais, La Rochelle-La Tremblade
Encadrement(s) :		
Cadre de la recherche : Expertise		
Destinataire : Ferme Marine de Douhet		
Résumé : L'étude avait pour but d'examiner la qualité de l'eau de mer alimentant la ferme Marine de Douhet, éclosérie de daurade royale, du marais-réservoir d'eau de mer jusqu'à l'entrée de l'éclosérie. Le bassin réservoir d'eau de mer n'est pas stratifié dans la zone du pompage. En conséquence, les mesures faites en surface au droit du ponton de pompage donnent, une bonne évaluation de la qualité de l'eau de mer pompée en profondeur. La grande sensibilité des larves de daurade durant les deux premières semaines de vie larvaire au pH de l'eau, et les valeurs mesurées dans le circuit semblent être un paramètre explicatif des mortalités signalées. L'eau alimentant l'éclosérie conserve après pré-traitement, une variabilité nyctémérale du pH, avec des maxi en fin de journée, pouvant dépasser fréquemment le seuil limite de 8,0-8,2 recommandé pour la bonne survie des larves (Parra et Yuféra, 2002). Il est fortement recommandé d'effectuer une campagne de suivi quotidien du pH de l'eau, en fin de journée (16H-17H), dans les bacs d'élevage larvaire, pour connaître les valeurs maxi du pH de l'eau en contact direct avec les larves. Si besoin, un système de régulation du pH de l'eau du bac tampon alimentant les bacs larvaires, devra être mis en place pour maintenir au niveau des larves des valeurs inférieures à 8,0 pendant leurs 2 premières semaines de vie.		
Mots-clés : Qualité des eaux, Réserve, Eclosérie, Daurade royale, pH, Azote ammoniacal		
Key words: Water quality, Reservoir, Fish hatchery, Sea bream, pH, Ammonia nitrogen		

1. Objectifs	9
1.1. Programme de travail	9
1.2. Méthode proposée	9
1.3. Livrables.....	9
2. Etude documentaire	11
2.1. le pH.....	11
2.2. l'azote ammoniacal	13
2.3. la qualité de l'eau de la réserve mesurée par FMD depuis 2004	15
3. Matériels et méthodes	17
3.1. Les mesures en continu à l'aide de sondes multiparamètres YSI.....	17
3.2. Les analyses discrètes sur le circuit d'alimentation mesurées par l'équipe FMD.....	17
3.3. L'analyse de l'azote ammoniacal total par l'Ifremer	18
3.4. Le renouvellement en eau de mer de la réserve	18
4. Résultats du suivi hydrologique du 22 juin au 03 juillet 2006	21
4.1. Conditions météorologiques durant les observations	21
4.2. Température de l'eau.....	21
4.3. Salinité de l'eau.....	23
4.4. Oxygène dissous de l'eau	25
4.5. Turbidité de l'eau	26
4.6. Biomasse chlorophyllienne de l'eau.....	27
4.7. pH de l'eau.....	28
4.8. Azote ammoniacal de l'eau prétraitée.....	31
4.9. Le renouvellement en eau de mer de la réserve	31
5. Discussion et recommandations	35
5.1. Qualité des eaux de la lagune-réservoir	35
5.2. Qualité des eaux arrivant à l'écloserie	36
6. Bibliographie	37
7. ANNEXES	39
7.1. ANNEXE 1 : Programme de travail retenu dans le devis du 19 juin 2006.....	39
7.2. ANNEXE 2 :Spécifications de la sonde YSI 6600.....	41
7.3. ANNEXE 3 :Fichiers fournis sur le CD Rom	43
7.4. ANNEXE 4 :Table permettant de calculer la fraction molaire de l'azote ammoniacal total correspondant à la forme non-ionisée N-NH ₃ pour une salinité fixe de 35 psu	45

1. Objectifs

La Ferme Marine de Douhet (FMD) a demandé à l'Ifremer d'étudier les variations de la qualité de l'eau de mer qu'ils utilisent, de façon (i) à pouvoir expliquer les mauvais résultats cycliques sur la partie « élevage larvaire » de l'écloserie-nurserie de dorade royale (*Sparus aurata*), (ii) à proposer des solutions permettant d'améliorer cette qualité.

1.1. Programme de travail

Le programme de travail, signé par les 2 parties, inclus au devis du 19/06/2006 (annexe 1) était le suivant :

- A. Examen et interprétation des données acquises par FMD sur les réserves d'eau depuis 2003,
- B. Etude de la variabilité journalière de la qualité de l'eau alimentant la ferme au niveau de la station de pompage (surface et fond), et dans le circuit de traitement-distribution de la ferme (mesures discrètes faites par FMD).
- C. Discussion et proposition d'un plan d'amélioration.

1.2. Méthode proposée

- A. Traitement des données acquises, discussion des paramètres observés, réunion de restitution.
- B. Mise en place durant 10 jours (du 22 juin au 3 juillet 2006) de 2 sondes YSI multiparamètres (dans la lagune-réservoir au point de pompage, une en surface et une au fond).
- C. Réunion de restitution des résultats et propositions de solution pour améliorer la qualité de l'eau (études complémentaires sur la lagune, traitement de l'eau d'alimentation).

1.3. Livrables

- A. Fiche synthèse des données hydro fournies
- B. Comparaison graphique des données acquises sur les deux stations de mesure (prise d'eau, et cuve de tête¹)
- C. Rapport d'expertise

¹ A la réception du programme-devis, FMD a souhaité remplacer la station de mesure « cuve de tête » par une station supplémentaire à la prise d'eau en surface de la lagune-réservoir (en plus de celle de fond déjà prévue), et réaliser elle-même des mesures discrètes sur leur réseau d'alimentation d'eau de mer, y compris dans la cuve de tête.

2. Etude documentaire

Il a semblé indispensable avant de proposer un programme de travail, d'examiner les travaux scientifiques internationaux disponibles sur le sujet qui ont fait l'objet de publications.

Plusieurs travaux signalent que la survie au stade larvaire de *Sparus aurata* est conditionnée par des seuils limites sur deux paramètres de la qualité de l'eau :

- le pH (Hussenot et al., 1991; Parra and Yufera, 2002),
- et l'azote ammoniacal (Parra and Yufera, 1999).

2.1. le pH

Brownell (1980) signalait déjà il y a plus de 25 ans l'effet de pH légèrement basique sur la mortalité des larves de daurade. Les essais menés par l'Ifremer (Hussenot et al., 1991) pour promouvoir des productions extensives de juvéniles de bar et de daurade en marais avaient montré la possibilité technique de réduire les mortalités massives en abaissant le pH par un ajout d'acide sur les deux premières semaines de l'élevage larvaire (démarrant à l'ouverture de la bouche de la larve). Ces auteurs conseillaient de maintenir un pH inférieur à 8,4 dans le marais d'élevage.

Les récents travaux de Parra et Yufera (2002) sont clairs et nets (figure 1) et montrent que le maintien durant 24 heures à des pH de 8,6 à 12 jours, et 8,9 à 52 jours après l'éclosion, entraînent une mortalité de 50% des larves en 24 heures.

La figure 1 montre qu'il serait souhaitable de maintenir un pH inférieur à 8,0-8,2 pour éviter toute risque de mortalité liée à un pH basique sur les larves de daurade royale.

Pour les pH acides, les seuils (la DL50 à 12 jours est à pH 5,55) sont très inférieurs aux valeurs relevées dans le milieu naturel. Kikkawa et al. (2004) signalent que l'effet sur les larves de *Pagrus major*, d'une baisse de pH n'est pas du tout la même si elle est produite par un apport de gaz carbonique ou une acidification par HCL. A pH 6,2 elle est de 61.2% avec un apport de CO₂, et seulement de 1,6% avec un apport de HCl. A pH 5,9, elle est de 100% (CO₂) avec un apport de CO₂, et seulement de 5,0 % avec un apport de HCl. En conséquence un abaissement de pH sera préférentiellement effectué avec de l'acide plutôt que du CO₂.

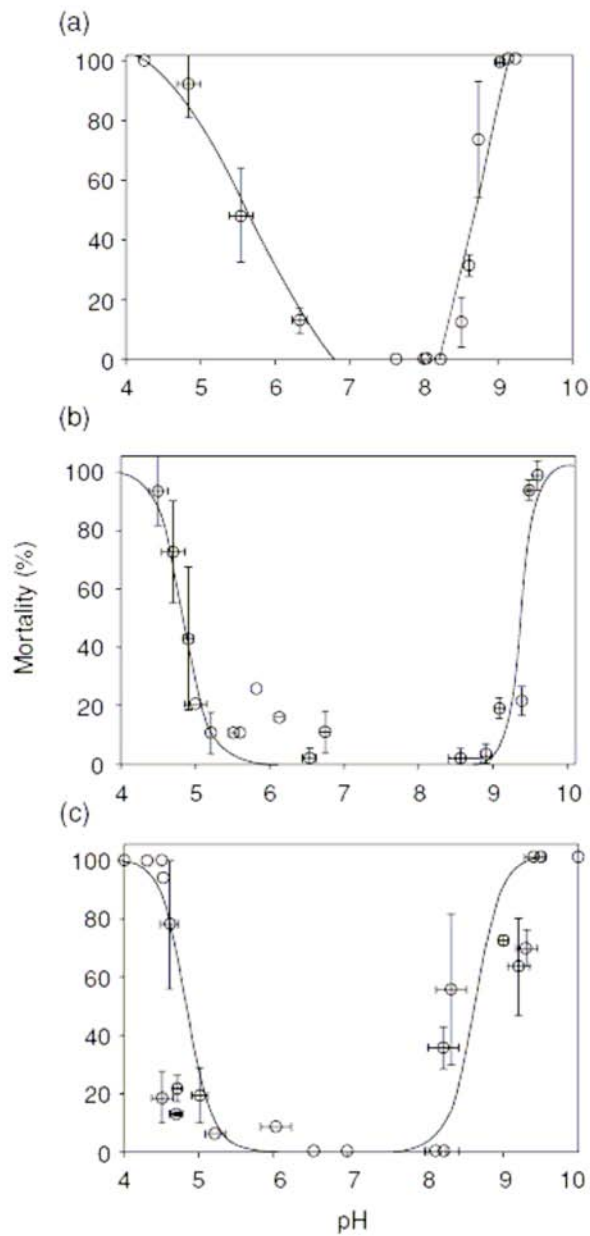


Figure 1 Corrected mortality in 12 (a), 23 (b) and 52 (c) DAH larvae of gilthead seabream, *Sparus aurata* (L.) after a 24-h test with different water pH.

2002 Blackwell Science Ltd. *Aquaculture Research*, **33**, 747–752

Figure 1 : Mortalité corrigée à 12 (a), 23 (b) et 52 jours (c) après l'éclosion de larves de daurade royale, *Sparus aurata* (L.) après un test de 24 heures dans des eaux de différents pH, d'après Parra et Yuféra (2002).

Table 2 Summary of tolerance regression models obtained in *S. aurata* and *S. senegalensis* larvae exposed to different pH values during larval development. The 24-h pH 50 values and the 95% confidence limits are included

	Age	Regression	24-h pH 50 (95% CL)	
<i>S. aurata</i>				
Low pH	12	$Y = 15.28 - 13.81 X$ $r^2 = 0.73; n = 6; P = 0.0269$	5.55 (5.24–5.87)	
	20	$Y = 113.01 - 11.73 X$ $r^2 = 0.63; n = 13; P = 0.0007$	4.82 (4.49–5.16)	
	52	$Y = 19.34 - 20.19 X$ $r^2 = 0.69; n = 12; P = 0.0007$	5.13 (4.93–5.34)	
	High pH	12	$Y = -107.52 + 120 X$ $r^2 = 0.87; n = 7; P = 0.1061$	8.66 (8.60–8.72)
		20	$Y = -56.99 + 64.12 X$ $r^2 = 0.61; n = 11; P = 0.0043$	9.26 (9.14–9.38)
		52	$Y = -21.14 + 28.81 X$ $r^2 = 0.75; n = 14; P = 0.0005$	8.75 (8.50–9.00)
<i>S. senegalensis</i>				
Low pH	7	$Y = 24.50 - 25.65 X$ $r^2 = 0.73; n = 5; P = 0.0666$	5.76 (5.65–5.86)	
	20	$Y = 14.52 - 13.49 X$ $r^2 = 0.67; n = 9; P = 0.0077$	5.08 (4.78–5.40)	
	32	$Y = 18.19 - 19.16 X$ $r^2 = 0.56; n = 7; P = 0.0277$	4.88 (4.67–5.89)	
High pH	7	$Y = -72.85 + 81.81 X$ $r^2 = 0.76; n = 4; P = 0.1366$	8.94 (8.90–8.98)	
	20	$Y = -31.33 + 37.03 X$ $r^2 = 0.70; n = 10; P = 0.0030$	9.57 (9.36–9.79)	
	32	$Y = -32.78 + 38.83 X$ $r^2 = 0.50; n = 10; P = 0.0280$	9.40 (9.20–9.60)	

© 2002 Blackwell Science Ltd, *Aquaculture Research*, **33**, 747–752

Figure 2 : Tableau de Parra et Yufera (2002) indiquant les doses du pH provoquant 50% de mortalité en 24 heures (24h-DL 50) et les intervalles de confiance à 95%, pour les larves de daurade royale et sole sénégalaise (lire dans le tableau reproduit de l'article original 24-h LC₅₀ au lieu de 24-h pH 50).

2.2. l'azote ammoniacal

La larve de daurade royale est également beaucoup plus sensible à l'azote ammoniacal que la larve de sole sénégalaise . Les travaux de Parra et Yufera (1999) ont démontré que seulement 0,24 mg/L de N-NH₃ (forme non-ionisée de l'azote ammoniacal total) entraînait une mortalité de 50% des larves de 12 jours de daurade royale en 24 heures (DL50-24h., voir figures 3 et 4). Le seuil limite tolérable de N-NH₃ pour la larve de daurade est d'après ces auteurs <0,024 mg/L de N-NH₃.

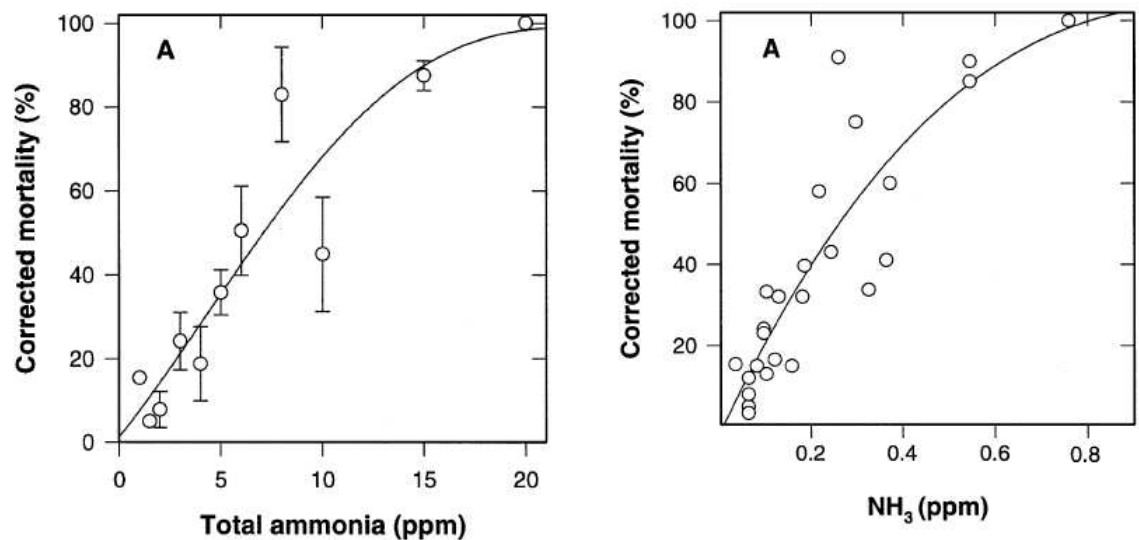


Figure 3 : Mortalité en 24 heures (24h DL50) de larves de daurade royale (*Sparus aurata*) âgées de 12 jours après l'éclosion pour des essais menés dans une eau à température de 19,5°C , salinité de 33 g/kg et pH de 8,2 d'après Parra et Yufera (1999).

Table 1 Summary of tolerance regression models obtained in *S. aurata* and *S. senegalensis* larvae exposed to different non-ionized ammonia (NH₃) and nitrite (NO₂⁻) concentrations

	Regression	24-h LC ₅₀ (95% CL)
<i>S. aurata</i>		
NH ₃	$y = 2.27 \times + 6.42;$ $r = 0.71; n = 25$	0.24 (0.19–0.30)
NO ₂ ⁻	$y = 3.64 \times - 7.02;$ $r = 0.85; n = 19$	1997 (1714–2238)
<i>S. senegalensis</i>		
NH ₃	$y = 11.51 \times + 3.63;$ $r = 0.88; n = 12$	1.32 (1.18–1.46)

The 24-h LC₅₀ values (p.p.m.) and the 95% confidence limits (95% CL) are included.

Figure 4 : Mortalité en 24 heures (24h DL50) de larves de daurade royale (*Sparus aurata*) âgées de 12 jours après l'éclosion et de larves de sole sénégalaise (*Solea senegalensis*) âgée de 7 jours pour des essais menés dans une eau à température de 19,5°C , salinité de 33 et pH de 8,2 avec une exposition à différentes concentrations d'azote ammoniacal non-ionisé et de nitrite, d'après Parra et Yufera (1999).

Le pH et l'azote ammoniacal sont donc deux paramètres de la qualité de l'eau primordiaux à surveiller dans l'élevage larvaire de la daurade royale pour permettre une bonne survie des jeunes larves.

2.3. la qualité de l'eau de la réserve mesurée par FMD depuis 2004

FMD nous a fourni les données acquises sur la réserve, qui sont faites quotidiennement au niveau du pompage en surface vers 14H-15H. De ce tableau nous avons essayé de voir les relations avec la survie larvaire, indiquée par FMD sous forme d'une appréciation de type « ok », « survie moyenne », « survie faible », « gros problème », et que nous avons transcrit arbitrairement en 3 classes de taux de survie de la façon suivante :

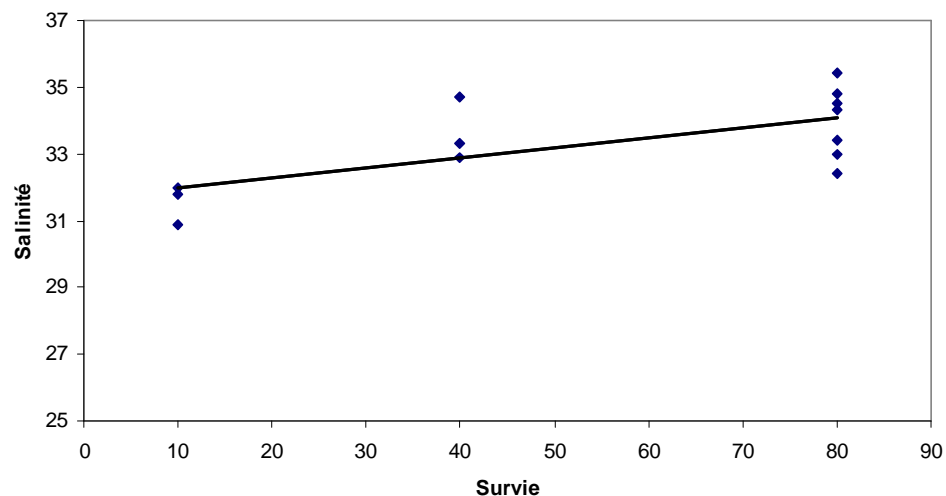
Ok = 80% survie, moyen ou faible = 40% survie, gros problème = 10% survie

D'autre part il a été calculé la valeur moyenne de la salinité et du pH, ainsi que la valeur maxi (à 14-15H) du pH de l'eau de la réserve, sur les 3 premières semaines des élevages larvaires qui correspondent à la plus grande sensibilité des larves, selon les travaux présentés précédemment. Les données sur l'azote ammoniacal faites par FMD sont trop peu nombreuses pour les exploiter.

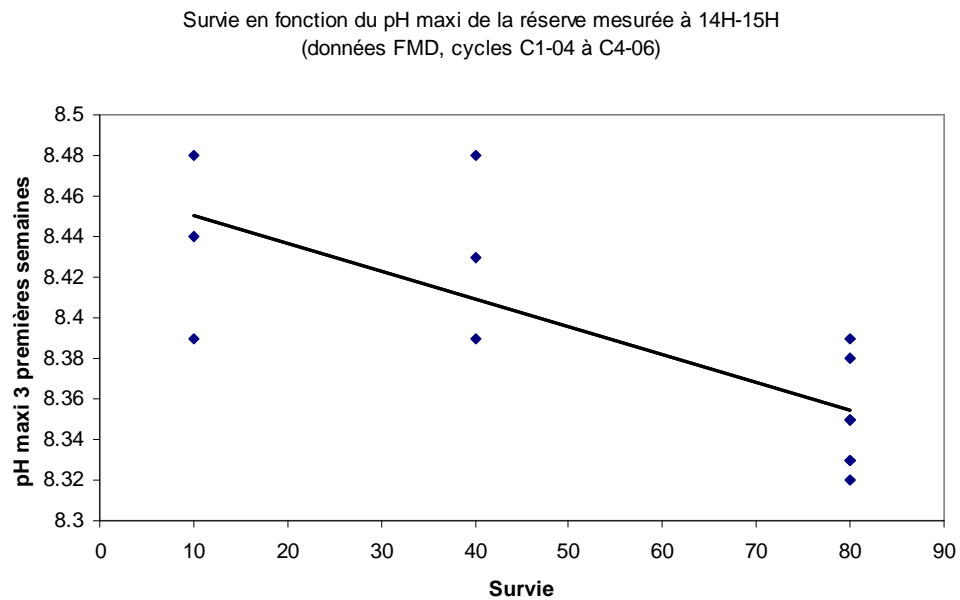
Il ressort de ces données que la tendance est à une augmentation des risques de mortalité :

1. lorsque la salinité diminue :

Survie en fonction de la salinité moyenne de la réserve mesurée à 14H-15H
(données FMD, cycles C1-04 à C4-06)



2. lorsque le pH maxi pris sur les 3 premières semaines atteint ou dépasse dans la réserve le seuil de 8,4 vers 14-15H :



Nous n'irons pas plus loin dans l'exploitation de ces données, mais l'effet du pH maxi, démontré dans les travaux de Parra et Yufera (2002), est une piste à regarder de très près sur tout le circuit d'eau qui traverse la ferme, de la réserve jusqu'aux bassins larvaires. Et cela semble d'autant plus important, que les pH de fin de journée sont toujours plus élevés en fin de journée (18h-19h), en raison de l'assimilation maximale du CO₂ dissous par les phénomènes de photosynthèse dans la lagune.

3. Matériels et méthodes

3.1. Les mesures en continu à l'aide de sondes multiparamètres YSI

2 sondes multiparamètres ont été mises en place par l'équipe IFREMER / LER-PC après une procédure complète de calibration au laboratoire. Elles ont permis de recueillir avec un pas de 5 minutes, des données en surface (0,50m) et au fond de la lagune-réservoir de FMD, au niveau de la prise d'eau principale de la ferme, sur :

- la température
- la salinité
- le pH
- l'oxygène dissous
- la turbidité
- la biomasse chlorophyllienne (fluorescence in vivo)
- la pression (niveau de la sonde de fond, sous la surface)

L'immersion a été effectuée le jeudi 22 juin, et la sortie de l'eau le 03 juillet 2006, comme cela était prévu dans la proposition acceptée par FMD.

Les spécifications de la sonde sont données en Annexe 2

3.2. Les analyses discrètes sur le circuit d'alimentation mesurées par l'équipe FMD

Des valeurs discrètes sur le circuit d'eau d'alimentation de la ferme entre la prise d'eau et le bac tampon de l'élevage larvaire, ont également été réalisées, par l'équipe de FMD elle-même, qui nous a transmis les résultats. L'étalonnage du pHmètre de FMD, modèle WTW a été vérifié par le technicien de l'Ifremer lors de l'immersion et de la sortie de l'eau des sondes YSI.

Les points de mesures ont été, dans le sens de circulation de l'eau du marais vers la ferme :

- surface de la lagune-réservoir au ponton de la prise d'eau (comme les mesures faites quotidiennement depuis plusieurs années, **station « lagune-FMD »**)
- sortie des bassins décanteurs, avant reprise par le pompage distribuant l'eau vers la cuve de tête (**station « raceways-FMD »**)
- sortie des filtres à sable de pré-traitement de l'eau neuve (**station « filtre-FMD »**)

- bac de cuve de tête succédant à une petite colonne de dégazage sur anneaux (**station « cuve-FMD »**)
- bac tampon de la serre d'élevage larvaire (B111) qui reprend à la fois l'eau neuve circulante de la conduite principale, et le complément d'eau de mer compensant la consommation vers les bacs larvaires (**station « tampon-FMD »**)
-

Les analyses mesurées sur ces points étaient :

- la température
- la salinité
- le pH
- l'oxygène dissous
- le prélèvement de l'azote ammoniacal total à la station « cuve de tête » seulement.

3.3. L'analyse de l'azote ammoniacal total par l'Ifremer

- Les prélèvements filtrés à 0,5 µm puis congelés sur place, ont été reçus par l'Ifremer pour analyse. Le CRELA de L'Houmeau a analysé les échantillons sur autoanalyseur Skalar selon les méthodes d'Aminot et Kérouel (2004). Les résultats d'azote ammoniacal total ont été convertis en N-NH₃ (forme non ionisée toxique) en tenant compte de la température, la salinité, et le pH de l'eau in situ (fichier Excel de calcul « NH₃calc.xls » disponible sur le CD et générateur de tableau « ammonia_swt.xls » comme celui présenté en annexe 4 pour une salinité de 35).

3.4. Le renouvellement en eau de mer de la réserve

La campagne de mesure a été calée pour voir l'effet du renouvellement en eau de mer sur les modifications de la qualité de l'eau, en démarrant les mesures en fin de période non-renouvelée. Le tableau 1 indique les renouvellements d'eau effectués sur la lagune.

Les analyses ont commencé le 22 juin après-midi soit plus de 5 jours après la fin d'un renouvellement d'eau, réalisé uniquement par pompage en raison de la petitesse du coefficient de marée. L'ouverture de la porte durant 48 heures entre le 24 et le 26 juin a permis de faire « varanguer² » le grand marais, puis le plein du bassin a ensuite été complété par un pompage durant 2,5 jours.

² Boire et déboire

Tableau 1 : Mouvements d'eau effectués sur le grand marais servant de réservoir d'eau de mer

Date	Heure	Intervention
13/06/2006	22h00	Mise en pompage
17/06/2006	08h30	Arrêt pompage
24/06/2006	05h00	Ouverture porte
26/06/2006	07h30	Fermeture porte
26/06/2006	07h30	Mise en pompage
26/06/2006	14h00	Arrêt pompage
30/06/2006	05h45	Mise en pompage
03/07/2006	16h00	Arrêt pompage

La superficie du grand marais a été estimée par numérisation sous Système d'Information Géographique (SIG) sur photo aérienne (BDORTHO IGN, CIADT 2000-2001, photo 1). Le traitement informatique appliqué aux prises de vue permet de les inclure dans un système cohérent à référence métrique. La numérisation du marais est alors réalisable sous SIG. La résolution est de l'ordre de 0,5 m. (un pixel représente 50 cm au sol), la précision de la numérisation est donc d'ordre métrique en linéaire.



Photo 1 : Numérisation (trait noir) du grand marais sur l'orthophoto littorale IGN.

Le dispositif d'immersion des sondes maintenait celle du fond à 0,84 m du sol. Cette valeur a été ajoutée à la hauteur de la colonne d'eau mesurée par la sonde (de précision sub-centimétrique) pour obtenir la hauteur totale de la colonne d'eau. La multiplication par la surface obtenue précédemment donne le volume instantané présent dans le marais.

4. Résultats du suivi hydrologique du 22 juin au 03 juillet 2006

4.1. Conditions météorologiques durant les observations

Les conditions météorologiques et les hauteurs d'eau de la réserve, durant la campagne de mesures, ont été observées par l'équipe FMD en place sur le site. Elles nous ont été transmises comme suit :

- 23/06 : Soleil, vent nul, hauteur d'eau à 18h00: 1.35m
- 24/06 : Nuageux, vent faible, hauteur d'eau à 18h00: 2.15m
- 25/06 : Nuageux + vent d'ouest =10 noeuds environ orienté dans le sens du marais (présence de MES importantes sur une largeur de 2m à partir des bords du marais), 2m d'eau à 18h
- 26/06 : Nuageux, vent faible, 2.10m d'eau à 18h00
- 27/06:?
- 28/06 : Beau temps, vent d'ouest 10noeuds, présence MES en bord de marais.1.55 m d'eau à 18h00
- 29/06 : Beau temps, vent faible, hauteur d'eau : 1.20 m d'eau à 18h00
- 30/06 : Beau temps,vent faible, hausse importante des températures1.40 m d'eau à 18h00
- 01/07 : Beau temps, vent faible, hauteur d'eau à 18h00 : 1m70
- 02/07 : Pluie légère en journée, baisse des températures, hauteur d'eau : 2.30 m

La présence de vent d'ouest (dominant) , orienté dans le sens de la longueur du marais, remet en suspension les sédiments déposés sur les bords du marais et les envoie directement sur le point de pompage. De plus, le trop plein du pompage est rejeté au vent de celui-ci, et remet beaucoup de MES dans l'eau . Le vent pousse alors ces MES sur le point de pompage.

4.2. Température de l'eau

4.2.1. le marais réservoir

Les deux capteurs de température des sondes YSI ont bien fonctionné, et montrent une superposition des signaux presque parfaite, avec une faible baisse de température en profondeur (figure 5).

Il est à noter des variations nycthémérales qui peuvent dépasser 2°C d'amplitude entre le matin (mini vers 7H30-8H30) et le soir (maxi vers 18H-19H), en surface comme au fond.

La présence d'un temps nuageux et peu ensoleillé durant l'échange par ouverture de la porte de l'écluse entre les 24 et 26 juin, et d'un beau temps ensoleillé durant le pompage du 30 juin au 03 juillet ne permet pas de voir l'effet du type de renouvellement d'eau sur la température de l'eau. A noter que la température de fond est légèrement inférieure durant le pompage final, probablement en raison de l'augmentation de la hauteur de l'eau durant cette période.

La température ne montre pas de stratification thermique de la colonne d'eau.

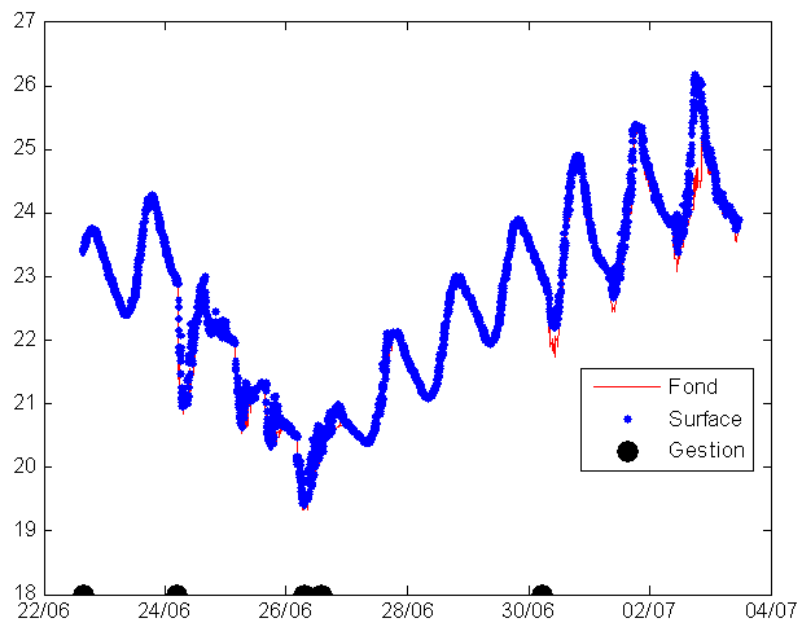


Figure 5 : Températures de l'eau (°C) du marais-réservoir en surface et profondeur, mesurées par les deux sondes multiparamètres *in situ*

4.2.2. l'eau prétraitée distribuée à la serre « éclosion »

La température de l'eau qui arrive à la cuve de tête suit les mêmes variations que l'eau du marais (figure 6). Par contre l'eau du bassin tampon de l'éclosion montre un abaissement de température significatif probablement dû à une certaine régulation de la température de l'air ambiant dans la serre et à la circulation en boucle de l'eau neuve sur le bac tampon. Il est à noter toutefois que les variations nycthémérales de l'eau du marais ne sont pas supprimées mais seulement atténuées.

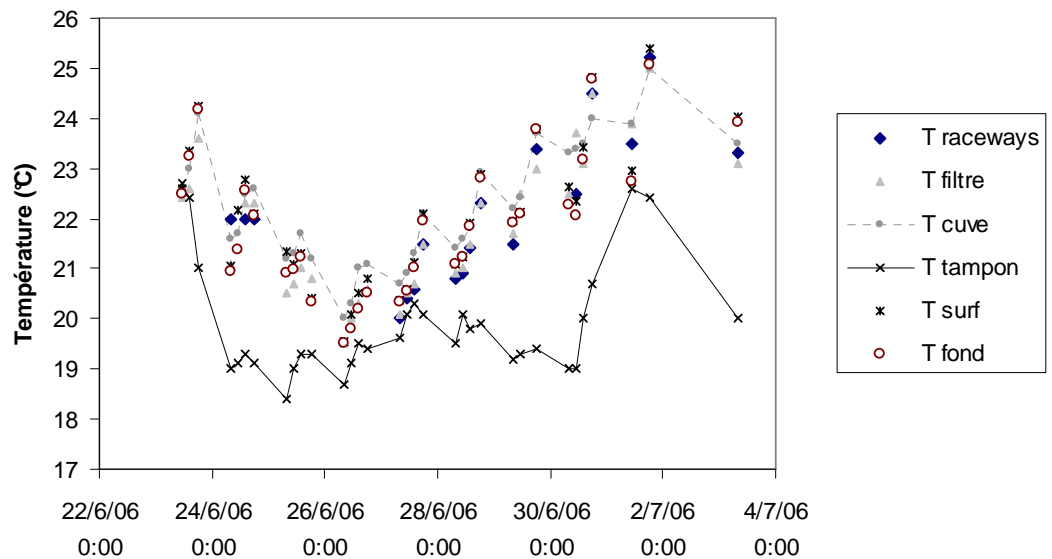


Figure 6 : Mesures discrètes de la température de l'eau et comparaison avec les données de la lagune aux mêmes heures d'observation.

4.3. Salinité de l'eau

4.3.1. le marais réservoir

Le capteur de salinité de fond a dérivé rapidement, alors que celui de surface a bien fonctionné, mis à part une courte période (01/07 et 2/07) de dysfonctionnement de ce dernier (figure 7).

La salinité augmente légèrement durant les périodes de non alimentation de la réserve, en raison probable de phénomènes d'évaporation à cette époque de l'année. Les variations hautes et basses s'accroissent lors des échanges d'eau. La partie initiale du signal, sans dérive du capteur de fond, ne montre pas de différence significative entre les deux sondes. Il n'y a donc pas de stratification haline dans la réserve au point de mesure.

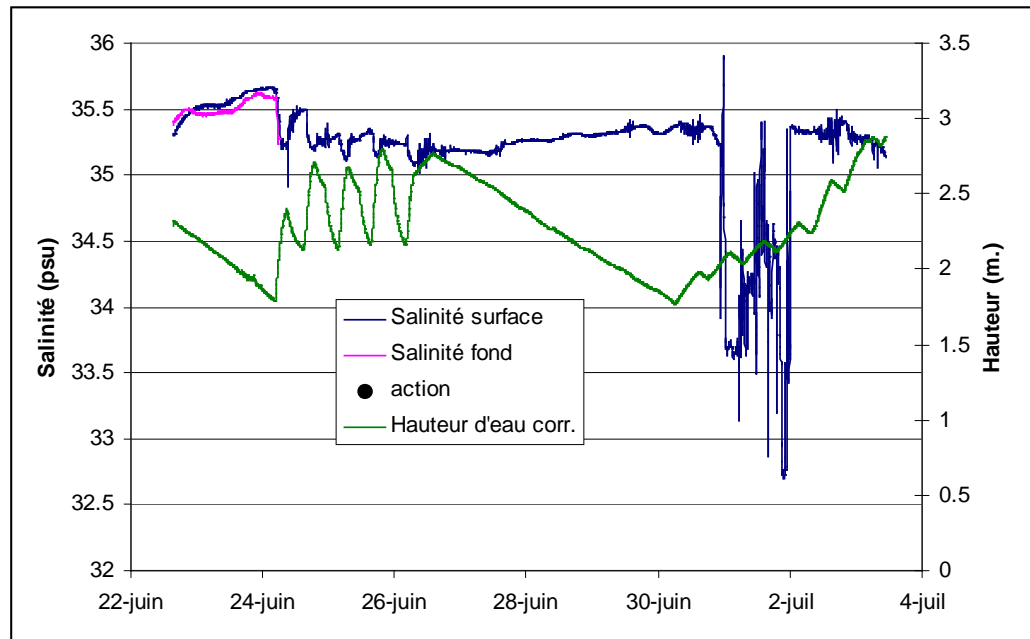


Figure 7 : Salinité de l'eau (psu) du marais-réservoir en surface et profondeur, mesurées par les deux sondes multiparamètres *in situ*

4.3.2. l'eau prétraitée distribuée à la serre « écloserie »

Les salinités mesurées par FMD sont très légèrement inférieures au capteur Ysi de surface (figure 8). Le salinomètre utilisé par FMD n'avait pas été inter-calibré avec les sondes YSI, cette mesure n'étant pas considérée comme majeure vis à vis du problème posé.

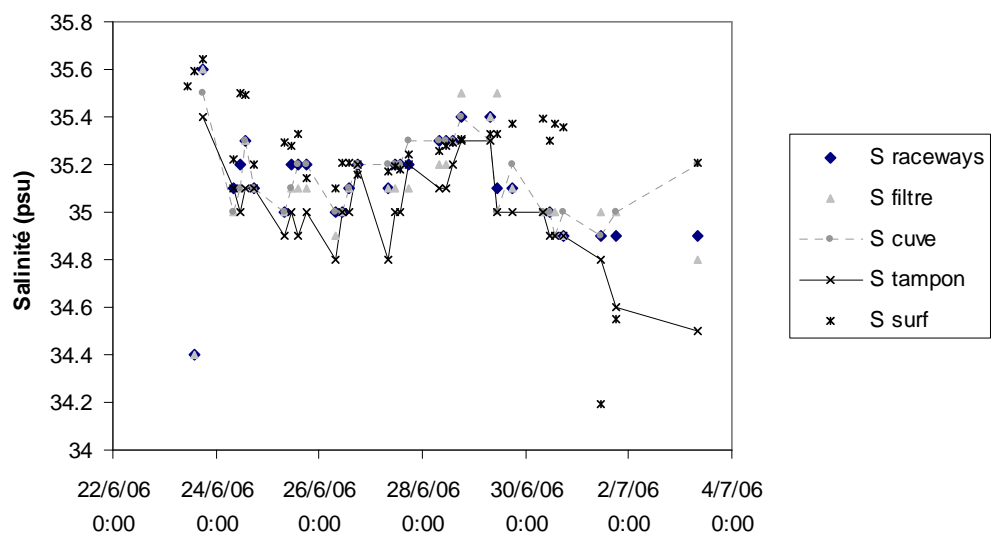


Figure 8 : Mesures discrètes de la salinité de l'eau (psu) et comparaison avec les données de la lagune aux mêmes heures d'observation.

4.4. Oxygène dissous de l'eau

4.4.1. le marais réservoir

Le capteur d'oxygène de surface a dérivé à partir du 27 juin (figure 9). Les taux de saturation de l'oxygène dissous peuvent être considérées comme non différentes entre la surface et le fond, comme le montre le signal avant dérive. La température et salinité de ces deux couches d'eau ne l'étant pas non plus. Il est à noter la sursaturation importante (161 % sat) en fin de journée (19H-20H) lors des journées ensoleillées de la deuxième période de la campagne d'observation.

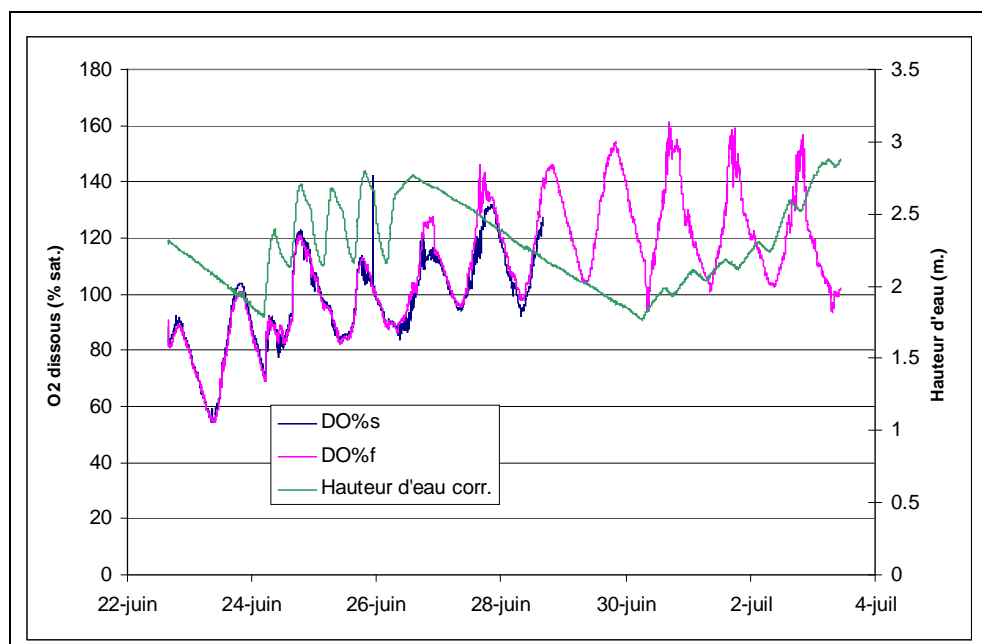


Figure 9 : Oxygène dissous de l'eau (% saturation) du marais-réservoir en surface et profond, mesurées par les deux sondes multiparamètres *in situ*

4.4.2. l'eau prétraitée distribuée à la serre « éclosion »

Les différents pré-traitements, et en particulier le passage dans les raceways décanteurs éliminent efficacement la sursaturation en oxygène dissous de l'eau de mer pompée dans la lagune (figure 10). Le passage dans les filtres à sable abaissent le niveau d'oxygène. Cela laisse penser qu'une certaine activité bactérienne s'y développe, participant à une activité minéralisante de la matière organique et/ou à une activité nitrifiante de l'azote ammoniacal, toutes deux consommatrices d'oxygène.

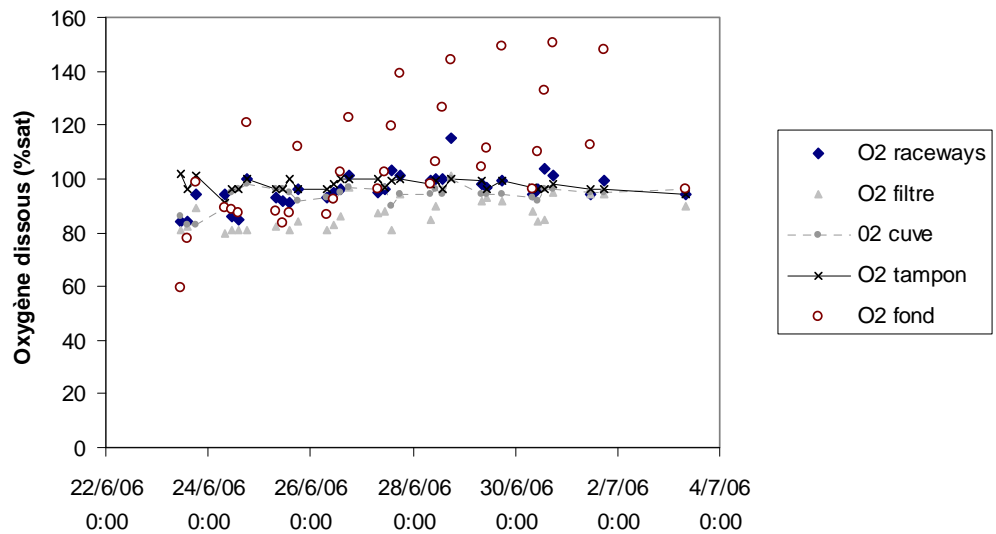


Figure 10 : Mesures discrètes de l'oxygène dissous de l'eau (% sat) et comparaison avec les données de la lagune aux mêmes heures d'observation.

4.5. Turbidité de l'eau

4.5.1. le marais réservoir

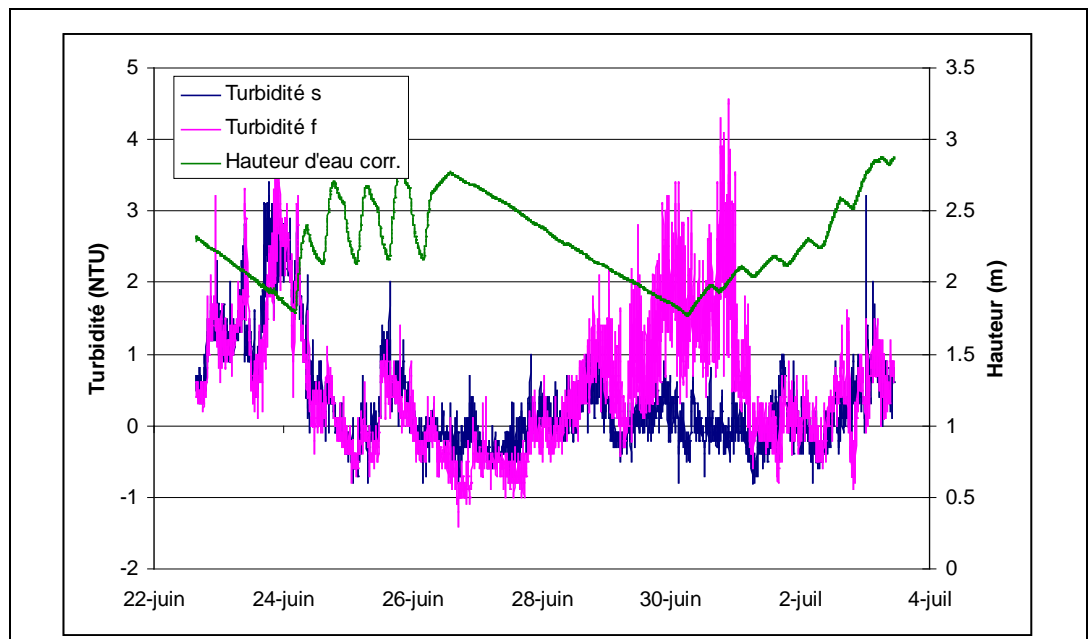


Figure 11 : Turbidité fond(f), surface (s), et hauteur d'eau.

Les deux capteurs de turbidité ont bien fonctionné après vérification. L'incertitude de mesure de ces capteurs est de 1.5 NTU, ce qui explique les valeurs inférieures à zéro.

Les valeurs sont très faibles, et montrent une cohérence importante entre le fond et la surface (figure 11). A partir du 28 juin, et sur les jours suivants, une légère remise en suspension se note au voisinage du fond, et qui disparaît dès que le niveau d'eau remonte dans le marais. Il s'agit d'un événement transitoire, dû à la conjonction de la faible hauteur d'eau et d'un vent d'ouest. Dès que les 2 mètres d'eau sont atteints, les deux signaux se superposent à nouveau.

4.6. Biomasse chlorophyllienne de l'eau

4.6.1. le marais réservoir

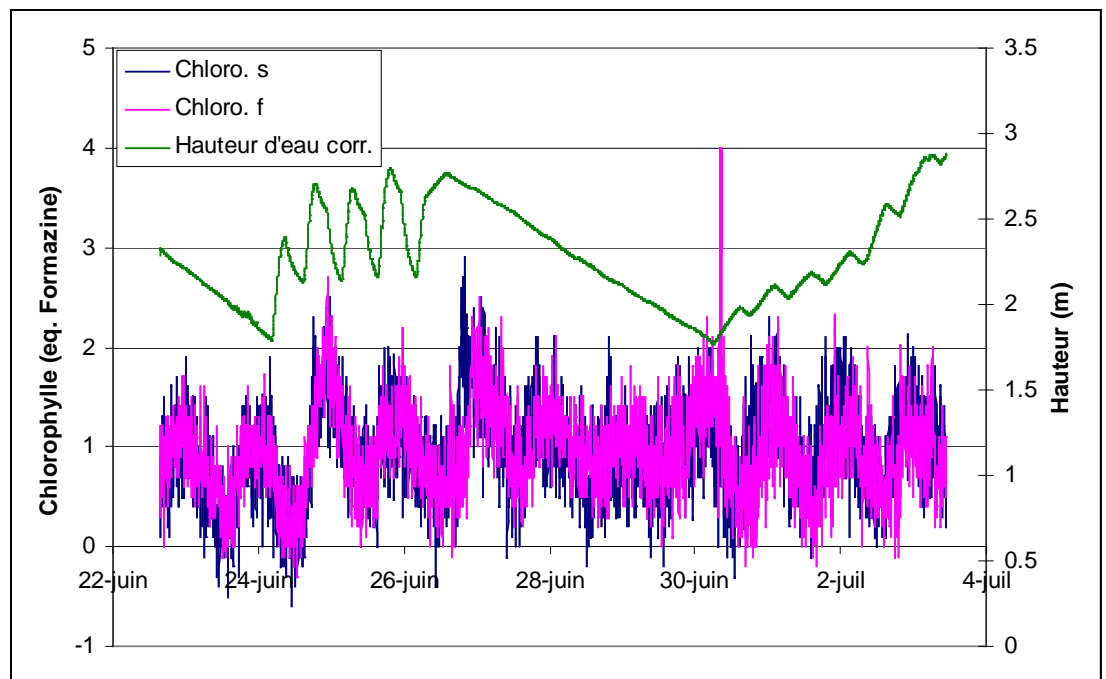


Figure 12 : Chlorophylle fond, surface (équivalent Formazine) et hauteur d'eau

La chlorophylle, mesurée en équivalent formazine, ne montre pas de différence surface-fond. Pour le calibrer en μg de chlorophylle, des prélèvements discrets auraient été nécessaires, mais l'équivalent formazine donne des résultats très proches de la chlorophylle. Les niveaux atteints ici sont très faibles, les blooms phytoplanctoniques à Boyardville atteignent des niveaux trois fois plus élevés à cette période (www.ifremer.fr/lerpc). Le signal (figure 12) a été corrigé des erreurs de justesses initiales, et l'incertitude de mesure des capteurs est de 0,6 unités. Ce paramètre ne montre pas non plus de stratification de la colonne d'eau au point de mesure.

4.7. pH de l'eau

4.7.1. le marais réservoir

La dérive des capteurs au cours du temps semble la même (figure 13). La calibration en fin de mesure a montré une baisse du pH de 0,3 unités pH sur le capteur de surface. Les valeurs obtenues sont donc minorées par la dérive, et ont dû approcher de 8,6 en fin de campagne. Le capteur de fond, qui a été cassé avant la calibration finale, n'a pu être vérifié sur le banc de calibration. Ce dernier, avait toutefois été comparé avec le pH mètre de FMD et montrait une différence imperceptible de $3/100^{\circ}$ d'unité pH. La différence observée sur le graphe n'est pas significative, le capteur de fond ayant dès le départ montré une diminution de valeur de 0,2 unité pH. L'incertitude de mesure de ces capteurs est également de 0,2 unités. Il n'y a donc pas de stratification verticale au point considéré, mais cela ne signifie pas qu'il n'y en a pas ailleurs, la variabilité spatiale n'ayant pas été estimée.

Les variations nycthémérales sont visibles, mais restent relativement limitées (amplitude de 0,2 à 0,3 unité pH, proche de l'incertitude), comparées à des réserves moins profondes, ou plus riches en phytoplancton. Dans certains marais de la zone les amplitudes journalières de pH peuvent atteindre près de 1 unité pH, avec des pics dépassant 9,0 en fin de journée. Les maxima s'observent vers 19H-20H.

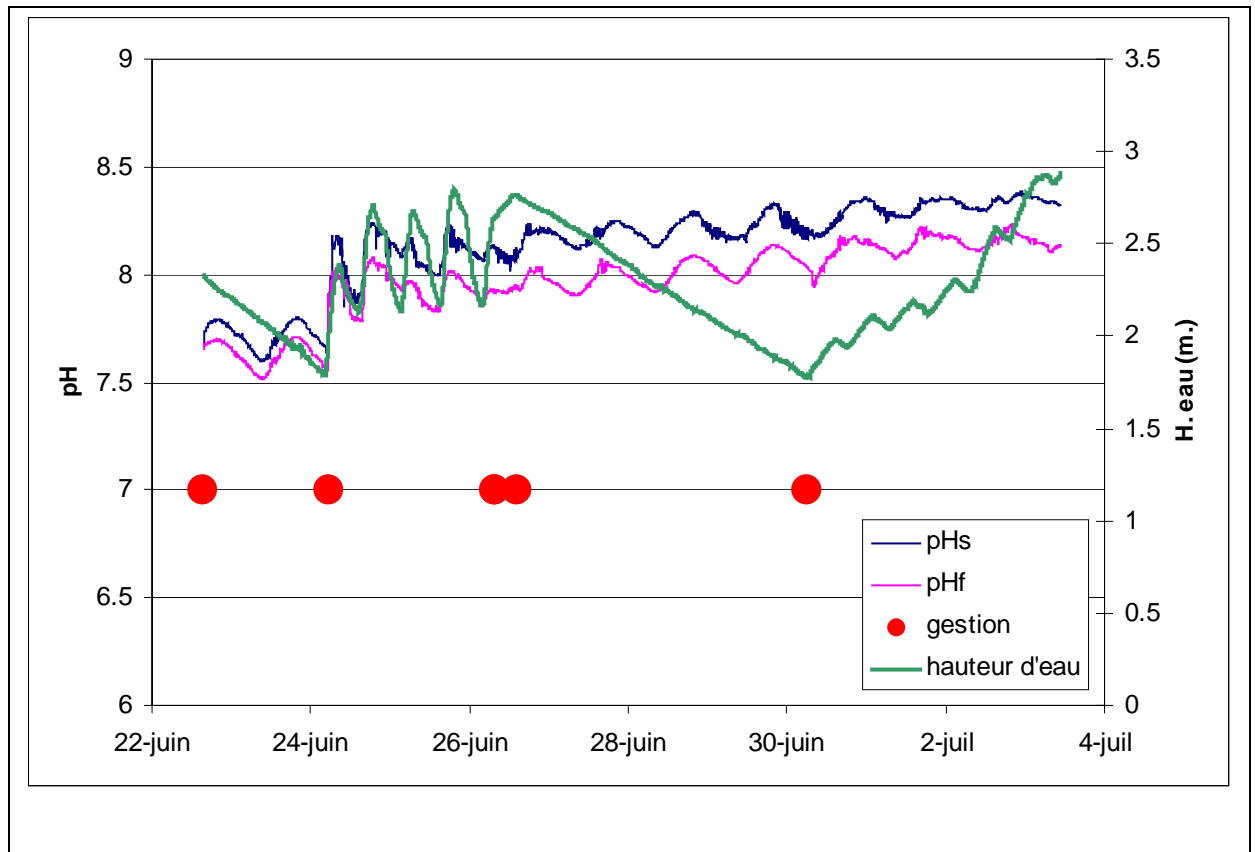


Figure 13 : pH de l'eau du marais-réservoir en surface et profondeur, mesurées par les deux sondes multiparamètres *in situ*.

FMD explique les valeurs basses de pH constatées en début d'enregistrement, avant renouvellement, par les travaux effectués sur leurs forages situés en bordure de la réserve d'eau de mer. L'injection de plusieurs centaines de litres d'acide pur, qui ont pu se mettre en communication avec les eaux du marais-réservoir aurait entraîné une acidification de l'eau de mer.

Globalement il faut retenir que si, en début de campagne, pendant la période où le marais varangue, le pH oscille autour de 8, il augmente ensuite régulièrement pendant la période sans renouvellement. Le remplissage du marais par pompage ne semble pas limiter la hausse, mais cependant minimise apparemment l'amplitude nyctémérale. Le pH se situe en fin de période à des niveaux préjudiciables à la survie des larves de daurades selon le § 2.1.

4.7.2. l'eau prétraitée distribuée à la serre « éclosérie »

Les variations nyctémérales de pH constatées dans la lagune-réservoir (figure 13) se retrouvent avec une amplitude légèrement accentuée (0,4 unité d'amplitude) dans le bassin tampon (figure 14).

Il est à noter que le pH de l'eau est le plus élevé, de toutes les différentes stations observées, à la sortie des raceways. Par rapport à l'eau de la réserve l'élévation est en moyenne de 0,2 unités de pH. Les raisons de cette élévation de pH après les raceways devraient être mieux appréhendées. Il faudrait en trouver l'origine, et voir s'il serait possible de la supprimer. Des mesures plus rapprochées en entrée et sortie du pompage principal, et le long des raceways-décanteurs permettraient probablement de mieux localiser le phénomène.

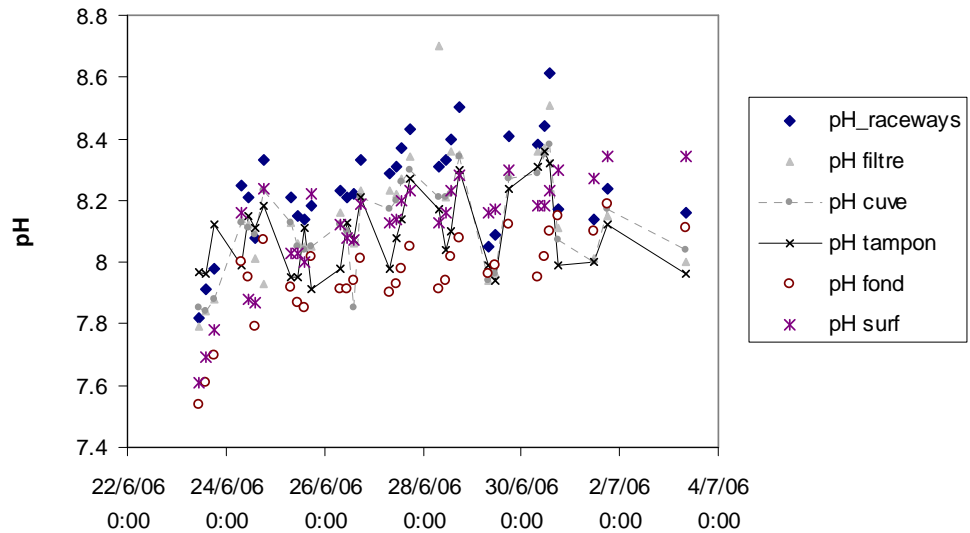


Figure 14 : Mesures discrètes du pH de l'eau et comparaison avec les données de la lagune aux mêmes heures d'observation.

Il n'est pas impensable d'imaginer qu'à d'autres périodes que celle observée, le pH maxi de fin de journée puisse dépasser les valeurs mesurées dans notre campagne, notamment si la lagune-réservoir s'enrichit en microalgues ou macroalgues. En effet la photosynthèse de ces algues peut provoquer des montées de pH liées à la consommation du gaz carbonique dissous de la lagune.

Il est indéniable que des valeurs supérieures aux limites proposées au chapitre 2 pour limiter la mortalité des larves, peuvent être atteintes dans l'eau de mer distribuée dans la partie larvaire.

4.8. Azote ammoniacal de l'eau prétraitée

4.8.1. l'eau prétraitée distribuée à la serre « éclosion »

L'eau n'a été prélevée qu'en fin de pré-traitement, soit au niveau de la cuve de tête qui distribue à l'éclosion. Les valeurs des analyses chimiques ont été transformées en mg/L de NH_3 , forme toxique.

La figure 15 montre que tous les prélèvements sont très inférieurs au seuil considéré comme acceptable pour les larves de daurade royale, âgées de 12 jours selon Parra et Yuféra (1999).

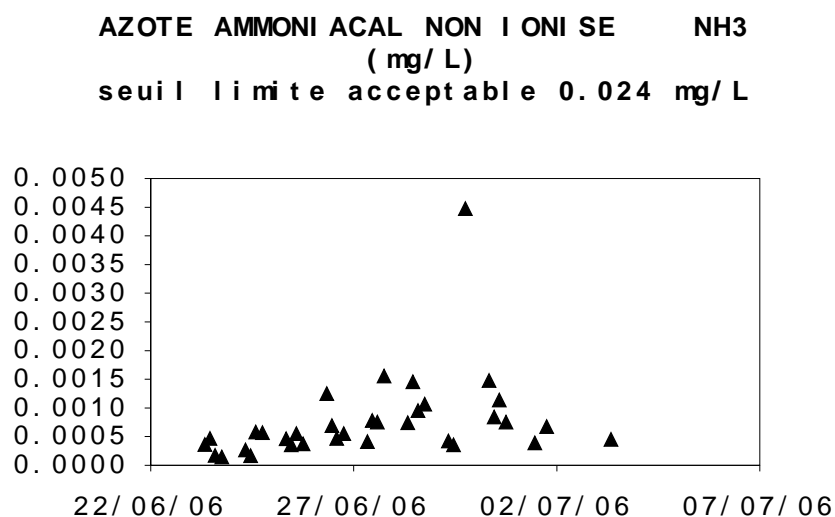


Figure 15 Concentration de l'azote ammoniacal non-ionisé dans l'eau prétraitée

En considérant que le seuil limite acceptable de la forme non ionisée de l'ammoniaque NH_3 est de 0,024 mg/l, il faudrait dépasser 0,2 mgN/L d'azote ammoniacal total à 26°C, 35 psu de salinité, et à pH de 8,5 pour être dans une zone à risque.

4.9. Le renouvellement en eau de mer de la réserve

La superficie du marais-réservoir, estimée d'après photo aérienne, est de 16772 m². Le résultat de calcul du volume instantané est présenté (fig16). Le débit est positif quand le marais s'alimente, négatif quand il se vide, par ouverture des

portes ou pompage. Le cas de figure où il est alimenté et pompé en même temps est évidemment indécidable sur le graphe, les renouvellements représentés sont donc les débits minimaux.

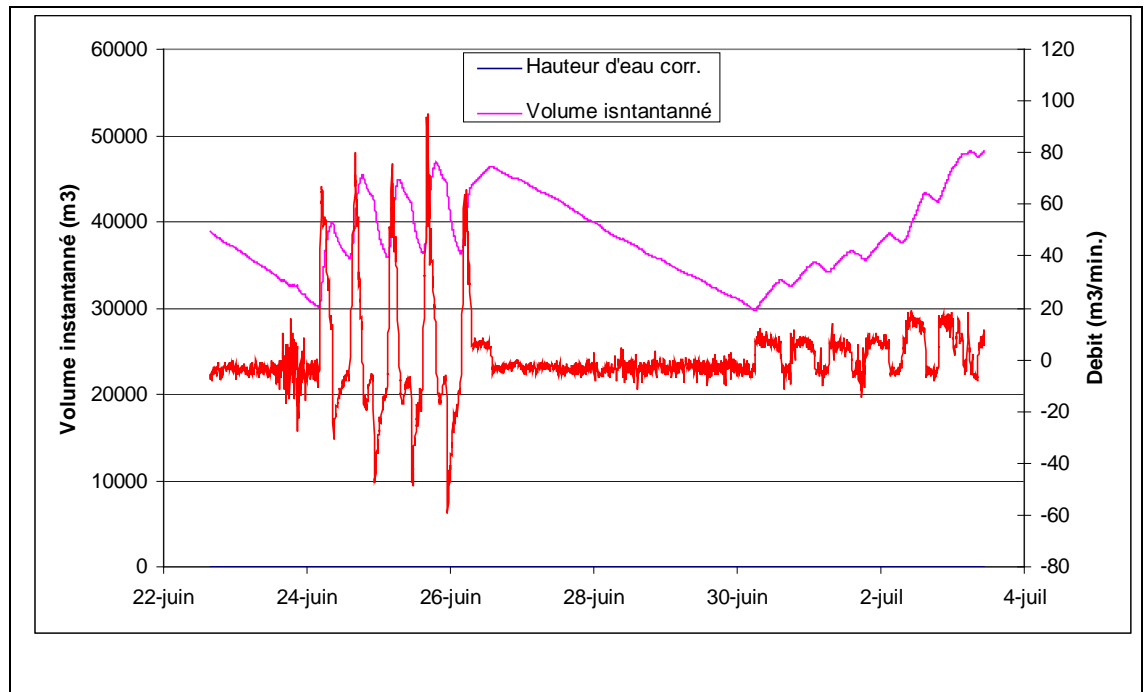


Figure 16 : Volume instantané et débit d'alimentation/pompage (m³/minute).

La période où la réserve est alimentée par la marée, et où elle varangue, montre des différences de niveau de l'ordre de 10 000 m³ par marée sur un volume maximum de 46 000 m³, soit un renouvellement de 21 % par marée, donc de 42 % par jour.

La période où la réserve n'est pas alimentée nous permet une estimation de la consommation moyenne horaire de l'écloserie. Celle-ci a consommé, entre le 26 juin 13H45 et le 30 juin 17H50, un volume total de 13963 m³, en 100 heures soit un débit horaire moyen de 140 m³/heure.

D'autre part, après reprise de l'alimentation, le 30 juin à 17 h 50, sur une période de 24 heures, on observe

- une première hausse de niveau correspondant à un volume de 2916 m³,
- une baisse par pompage de l'écloserie, de 1213 m³,
- un second apport de 2477 m³,
- une autre consommation de 962 m³.

Ces volumes correspondent à 5392 m³ d'apport d'eau neuve, 2175 m³ de consommation de l'écloserie. Le calcul précédent donnait une estimation de 140 m³/h de l'écloserie, donc un volume théorique sur 24 h de 3360 m³/24 h.

La différence ($3360 \text{ m}^3 - 2175 \text{ m}^3 = 1185 \text{ m}^3$) peut probablement être attribuée au pompages simultanés, alimentation du marais et écloserie. L'apport d'eau neuve journalier en période de pompage peut alors être estimé à :

$$1185 + 5392 = 6577 \text{ m}^3.$$

Cela correspond à un apport de 20% du volume initial de la réserve en début des 24 h considérées, soit pratiquement deux fois moins que l'alimentation gravitaire.

5. Discussion et recommandations

5.1. Qualité des eaux de la lagune-réservoir

La lagune, malgré sa profondeur pouvant atteindre près de 3 mètres, ne montre pas de variations significatives de qualité dans la zone de pompage entre la surface et le fond, et n'est donc pas stratifiée dans cette partie. On se gardera de généraliser à l'ensemble de la lagune, notamment dans l'extrémité ouest, moins brassée par l'aspiration de la pompe, ou par les échanges par l'écluse placée à l'Est.

La turbidité est faible (< 4 NTU) même en période d'alimentation en eau de mer par pompage comme par gravité, l'effet de vents d'ouest de 10 nœuds n'entraîne pas de turbidité élevée.

La biomasse microalgale était limitée (< 3 $\mu\text{g/L}$ de chlorophylle) durant la période de suivi de juin 2006. Il est conseillé d'éviter de faire rentrer une eau trop riche en sels nutritifs³ (Azote, Phosphore) pour ne pas développer un bloom micro- ou macro-algal qui aurait le désavantage de pouvoir faire monter de façon plus importante le pH de la lagune.

L'alimentation par gravité, deux fois plus importante que par pompage sur la période d'étude, semble stabiliser le pH moyen journalier, ce qui n'est pas le cas de celle par pompage, qui ne l'empêche pas d'augmenter régulièrement. Il paraît donc judicieux d'envisager une amélioration de la capacité de renouvellement de la réserve, avec évacuation partielle de l'eau stagnante.

Il est probable que la variabilité spatiale de la qualité d'eau est plus importante que la stratification horizontale. En particulier, la zone Est Sud-Est doit présenter des variations plus importantes, étant moins bien renouvelée que la zone située entre le canal et la pompe d'alimentation de l'écloserie. En période sans renouvellement, la variabilité spatiale pourrait contribuer à l'évolution des paramètres physico-chimiques de l'eau pompée. Il pourrait être envisagé d'améliorer le renouvellement par vidange partielle dans le marais contigu (marais palourdes) dans le coin Sud Est, qui, utilisé comme "réserve basse" permettrait d'optimiser les renouvellements gravitaires et d'homogénéiser l'ensemble de la masse d'eau de la lagune-réservoir.

³ une baisse de salinité de l'eau implique souvent une augmentation des sels nutritifs, car l'eau douce en contient généralement des concentrations beaucoup plus importantes que celles contenues dans l'eau de mer.

5.2. Qualité des eaux arrivant à l'écloserie

Les variations nyctémérales de pH constatées dans le marais-réservoir, sont également retrouvées au niveau de l'eau ayant traversé le système de pré-traitement. Il y a un réel risque de mortalité vis à vis des jeunes larves de daurades royales, lorsque le pH dépasse 8,2. L'azote ammoniacal, par contre, aux concentrations détectées, garde un niveau tout à fait acceptable.

Nous recommandons d'examiner précisément, EN FIN DE JOURNEE (16 heures ou plus), le pH simultanément dans le bac tampon de l'écloserie et dans les bacs larvaires, en notant bien l'heure de mesure. Le pH mètre devra être étalonné quotidiennement, ou du moins vérifié sur le tampon basique.

Si les pH des bacs larvaires peuvent dépasser en fin de journée (18-20h) des valeurs de 8,2, il est conseillé fortement de mettre en place sur le réseau de la serre larvaire un système de régulation de pH par ajout d'acide chlorhydrique commercial, pour maintenir en permanence un $\text{pH} \leq 7,8$ et éviter un risque de mortalité dû à un pH trop basique, comme le recommande Parra et Yufera (2002). Un système de pompe-doseuse combinée à un pHmètre, avec ralentissement de l'injection d'acide lorsque l'on approche de la valeur de régulation est disponible sur le marché (photo 2). Un test pourrait être fait avec un tel système, en comparant, sur des larves provenant d'une même ponte, des bassins traités et des bassins témoins.



Photo 2 : pHmètre pilotant une pompe doseuse pour correction de pH

Si, et seulement si, après cette disposition, les mortalités de larves persistent encore, il faudra se tourner probablement vers une analyse plus complète de la chimie et de la biologie de l'eau de mer de la lagune.

La réunion de restitution des résultats a eu lieu à FMD le 27 septembre 2006 avec la participation pour l'IFREMER de Olivier Le Moine et Jérôme Hussenot, et pour FMD de Olivier Flahou et Sophie Cariou.

6. Bibliographie

- Aminot A., K erouel R., 2004. d'Alain Aminot et Roger K erouel intitulée « Hydrologie des écosystèmes marins ; paramètres et analyses » (336 p.,
- Brownell, C.L., 1980. Water quality requirements for first-feeding in marine fish larvae. II. pH, oxygen, and carbon dioxide. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 44, 285-298.
- Hussenot, J., Le Moine, O., Lagardère, F., 1991. L'levage larvaire extensif du bar (*Dicentrarchus labrax*) et de la daurade royale (*Sparus aurata*) en milieu naturel stimul e par fertilisation dans les marais sales de la cote atlantique, France. ICES marine science symposia.
- Kikkawa, T., Kita, J., Ishimatsu, A., 2004. Comparison of the lethal effect of CO₂ and acidification on red sea bream (*Pagrus major*) during the early developmental stages. *Marine Pollution Bulletin* 48, 108-110.
- Parra, G., Yufera, M., 1999. Tolerance response to ammonia and nitrite exposure in larvae of two marine fish species (gilthead seabream *Sparus aurata* L. and Senegal sole *Solea senegalensis* Kaup). *Aquaculture Research* 30, 857-863.
- Parra, G., Yufera, M., 2002. Tolerance response to water pH in larvae of two marine fish species, gilthead seabream, *Sparus aurata* (L.) and Senegal sole, *Solea senegalensis* (Kaup), during development. *Aquaculture Research* 33, 747-752.

7. ANNEXES

7.1. ANNEXE 1 : Programme de travail retenu dans le devis du 19 juin 2006.



DEVIS

19 Juin 2006/JH v3

IFREMER
Thème Aquaculture
Programme « Durabilité »

Ferme Marine de Douhet SA
BP 4
17840 La Brée les Bains

Objet : Qualité de l'eau alimentant la ferme marine

Suite aux visites sur site le 30 mai et le 15 juin 2006 de Jérôme Hussenot, vous trouverez une proposition de programme de travail à réaliser par l'Ifremer qui nous l'espérons répondra à votre demande. Elle entre dans le cadre de la lettre-contrat de collaboration FMD-IFREMER en cours de renouvellement.

Programme de travail

- D. Examen et interprétation des données acquises par FMD sur les réserves d'eau depuis 2003
- E. Etude de la variabilité jour/nuit de la qualité de l'eau alimentant la ferme.
- F. Discussion et proposition d'un plan d'amélioration.

Méthode proposée

- D. Traitement des données acquises, discussion des paramètres observés, réunion de restitution.
- E. Mise en place durant 10 jours du 22 juin au 3 juillet 2006) de 2 sondes YSI multiparamètres (dans la lagune-réservoir au point de pompage, une en surface et une au fond).
- F. Réunion de restitution des résultats et propositions de solution pour améliorer la qualité de l'eau (études complémentaires sur la lagune, traitement de l'eau d'alimentation).

Livrables

- D. Fiche synthétique de présentation des données hydro fournies
- E. Comparaison graphique des données acquises sur les deux stations de mesure (prise d'eau, en surface et au fond)
- F. Rapport technique

7.2. ANNEXE 2 :Spécifications de la sonde YSI 6600

Typical Performance Specifications		
Dissolved Oxygen % Saturation	Range Resolution Accuracy	0 to 500% 0.1% 0 to 200%: $\pm 2\%$ of reading or 2% air saturation, whichever is greater; 200 to 500%: $\pm 6\%$ of reading
Dissolved Oxygen mg/L	Range Resolution Accuracy	0 to 50 mg/L 0.01 mg/L 0 to 20 mg/L: $\pm 2\%$ of reading or 0.2 mg/L, whichever is greater; 20 to 50 mg/L: $\pm 6\%$ of reading
Conductivity †	Range Resolution Accuracy	0 to 100 mS/cm 0.001 to 0.1 mS/cm (range-dependent) $\pm 0.5\%$ of reading + 0.001 mS/cm
Temperature	Range Resolution Accuracy	-5 to +45°C 0.01°C $\pm 0.15^\circ\text{C}$
pH	Range Resolution Accuracy	0 to 14 units 0.01 unit ± 0.2 unit
ORP	Range Resolution Accuracy	-999 to +999 mV 0.1 mV ± 20 mV
Salinity	Range Resolution Accuracy	0 to 70 ppt 0.01 ppt $\pm 1\%$ of reading or 0.1 ppt, whichever is greater
Shallow Depth	Range Resolution Accuracy	0 to 30 feet (0 to 9 m) 0.001 feet (0.001 m) ± 0.06 feet (± 0.02 m)
Medium Depth	Range Resolution Accuracy	0 to 200 feet (0 to 61 m) 0.001 feet (0.001 m) ± 0.4 feet (± 0.12 m)
Deep Depth	Range Resolution Accuracy	0 to 656 feet (0 to 200 m) 0.001 feet (0.001 m) ± 1 feet (± 0.3 m)
Vented Level	Range Resolution Accuracy	0 to 30 feet (0 to 9 m) 0.001 feet (0.0003 m) ± 0.01 feet (0.003 m)
Turbidity	Range Resolution Accuracy Depth	0 to 1,000 NTU 0.1 NTU $\pm 5\%$ of reading or 2 NTU, whichever is greater 200 feet (60.96 m)
Chlorophyll	Range Resolution Depth	0 to 400 µg/L 0.1 µg/L Chl; 0.1% FS 200 feet (60.96 m)
Rhodamine	Range Resolution Accuracy Depth	0 to 200 µg/L; 0 to 100% FS 0.1 µg/L; 0.1% FS ± 1.0 µg/L; 5% of reading 200 feet (60.96 m)
Ammonia/Ammonia*	Range Resolution Accuracy Depth	0 to 200 mg/L-N 0.001 to 1 mg/L-N (range-dependent) $\pm 10\%$ of reading or 2 mg/L, whichever is greater 50 feet (15.2 m)
Nitrate *	Range Resolution Accuracy Depth	0 to 200 mg/L-N 0.001 to 1 mg/L-N (range-dependent) $\pm 10\%$ of reading or 2 mg/L, whichever is greater 50 feet (15.2 m)
Chloride *	Range Resolution Accuracy Depth	0 to 1,000 mg/L 0.001 to 1 mg/L (range-dependent) $\pm 15\%$ of reading or 5 mg/L, whichever is greater 200 feet (60.96 m)
Open-Channel Flow	Calculated measurement, requires vented level	

7.3. ANNEXE 3 :Fichiers fournis sur le CDRom

- Rapport final au format pdf	RapFMD-Ifr_oct06
- Fichier des données acquises :	fmdtot.xls
- Fichier complémentaire de mesures discrètes :	FMD_mes_discr.xls
- Calcul de la fraction de l'azote ammoniacal non-ionisé :	NH3calc.xls
- Générateur de tableau de la fraction d'azote ammoniacal non-ionisée pour différentes salinités :	ammonia_swt.xls
publication de Parra et Yufera (1999) tolérance de NH3	parra1999.pdf
Publication de Parra et Yufera (2002) tolérance du pH	parra2002.pdf

7.4. ANNEXE 4 : Table permettant de calculer la fraction molaire de l'azote ammoniacal total⁴ correspondant à la forme non-ionisée N-NH₃ pour une salinité fixe de 35 psu

La table est générée par le fichier Excel « ammonia_swt.xls » établi par Colt. Ce fichier est fourni sur le CDRom joint à l'étude. Il permet de produire les tables pour d'autres salinités

Mole Fraction of Un-ionized Ammonia																
(Percent = Mole Fraction X100)																
Salinity = 35 g/kg (or ppt)																
Temp (C)	pH															
	7.0	7.1	7.2	7.3	7.4	7.5	7.6	7.7	7.8	7.9	8.0	8.1	8.2	8.3	8.4	8.5
0	4.44E-04	5.59E-04	7.04E-04	8.86E-04	1.12E-03	1.40E-03	1.77E-03	2.22E-03	2.80E-03	3.52E-03	4.43E-03	5.57E-03	7.00E-03	8.79E-03	0.011	0.014
1	4.83E-04	6.09E-04	7.66E-04	9.64E-04	1.21E-03	1.53E-03	1.92E-03	2.42E-03	3.04E-03	3.83E-03	4.81E-03	6.05E-03	7.61E-03	9.56E-03	0.012	0.015
2	5.26E-04	6.62E-04	8.33E-04	1.05E-03	1.32E-03	1.66E-03	2.09E-03	2.63E-03	3.31E-03	4.16E-03	5.23E-03	6.58E-03	8.27E-03	1.04E-02	0.013	0.016
3	5.71E-04	7.19E-04	9.05E-04	1.14E-03	1.43E-03	1.80E-03	2.27E-03	2.86E-03	3.59E-03	4.52E-03	5.68E-03	7.15E-03	8.98E-03	1.13E-02	0.014	0.018
4	6.21E-04	7.81E-04	9.83E-04	1.24E-03	1.56E-03	1.96E-03	2.47E-03	3.10E-03	3.90E-03	4.91E-03	6.17E-03	7.76E-03	9.75E-03	1.22E-02	0.015	0.019
5	6.74E-04	8.48E-04	1.07E-03	1.34E-03	1.69E-03	2.13E-03	2.68E-03	3.37E-03	4.24E-03	5.33E-03	6.70E-03	8.41E-03	1.06E-02	1.33E-02	0.017	0.021
6	7.31E-04	9.20E-04	1.16E-03	1.46E-03	1.83E-03	2.31E-03	2.90E-03	3.65E-03	4.59E-03	5.78E-03	7.26E-03	9.12E-03	1.15E-02	1.44E-02	0.018	0.023
7	7.92E-04	9.97E-04	1.26E-03	1.58E-03	1.99E-03	2.50E-03	3.15E-03	3.96E-03	4.98E-03	6.26E-03	7.87E-03	9.88E-03	1.24E-02	1.56E-02	0.020	0.024
8	8.58E-04	1.08E-03	1.36E-03	1.71E-03	2.15E-03	2.71E-03	3.41E-03	4.29E-03	5.39E-03	6.78E-03	8.52E-03	1.07E-02	1.34E-02	1.69E-02	0.021	0.026
9	9.30E-04	1.17E-03	1.47E-03	1.85E-03	2.33E-03	2.93E-03	3.69E-03	4.64E-03	5.84E-03	7.34E-03	9.22E-03	1.16E-02	1.45E-02	1.82E-02	0.023	0.029
10	1.01E-03	1.27E-03	1.59E-03	2.01E-03	2.52E-03	3.18E-03	3.99E-03	5.02E-03	6.32E-03	7.94E-03	9.97E-03	1.25E-02	1.57E-02	1.97E-02	0.025	0.031
11	1.09E-03	1.37E-03	1.72E-03	2.17E-03	2.73E-03	3.43E-03	4.32E-03	5.43E-03	6.83E-03	8.58E-03	1.08E-02	1.35E-02	1.70E-02	2.13E-02	0.027	0.033
12	1.18E-03	1.48E-03	1.86E-03	2.35E-03	2.95E-03	3.71E-03	4.67E-03	5.87E-03	7.38E-03	9.27E-03	1.16E-02	1.46E-02	1.83E-02	2.30E-02	0.029	0.036
13	1.27E-03	1.60E-03	2.01E-03	2.53E-03	3.19E-03	4.01E-03	5.04E-03	6.34E-03	7.97E-03	1.00E-02	1.26E-02	1.58E-02	1.98E-02	2.48E-02	0.031	0.039
14	1.37E-03	1.73E-03	2.17E-03	2.74E-03	3.44E-03	4.33E-03	5.44E-03	6.85E-03	8.60E-03	1.08E-02	1.36E-02	1.70E-02	2.13E-02	2.67E-02	0.033	0.042
15	1.48E-03	1.87E-03	2.35E-03	2.95E-03	3.72E-03	4.67E-03	5.88E-03	7.39E-03	9.28E-03	1.17E-02	1.46E-02	1.83E-02	2.30E-02	2.88E-02	0.036	0.045
16	1.60E-03	2.01E-03	2.53E-03	3.19E-03	4.01E-03	5.04E-03	6.34E-03	7.96E-03	1.00E-02	1.26E-02	1.58E-02	1.98E-02	2.48E-02	3.10E-02	0.039	0.048
17	1.72E-03	2.17E-03	2.73E-03	3.43E-03	4.32E-03	5.43E-03	6.83E-03	8.58E-03	1.08E-02	1.35E-02	1.70E-02	2.13E-02	2.66E-02	3.33E-02	0.042	0.052
18	1.86E-03	2.34E-03	2.94E-03	3.70E-03	4.65E-03	5.85E-03	7.36E-03	9.24E-03	1.16E-02	1.46E-02	1.83E-02	2.29E-02	2.87E-02	3.58E-02	0.045	0.056
19	2.00E-03	2.52E-03	3.17E-03	3.99E-03	5.01E-03	6.30E-03	7.92E-03	9.95E-03	1.25E-02	1.57E-02	1.97E-02	2.46E-02	3.08E-02	3.85E-02	0.048	0.060
20	2.15E-03	2.71E-03	3.41E-03	4.29E-03	5.39E-03	6.78E-03	8.52E-03	1.07E-02	1.34E-02	1.69E-02	2.11E-02	2.65E-02	3.31E-02	4.13E-02	0.051	0.064
21	2.32E-03	2.92E-03	3.67E-03	4.62E-03	5.80E-03	7.29E-03	9.17E-03	1.15E-02	1.44E-02	1.81E-02	2.27E-02	2.84E-02	3.55E-02	4.43E-02	0.055	0.068
22	2.49E-03	3.14E-03	3.95E-03	4.96E-03	6.24E-03	7.84E-03	9.85E-03	1.24E-02	1.55E-02	1.95E-02	2.44E-02	3.05E-02	3.81E-02	4.75E-02	0.059	0.073
23	2.68E-03	3.37E-03	4.24E-03	5.33E-03	6.70E-03	8.43E-03	1.06E-02	1.33E-02	1.67E-02	2.09E-02	2.62E-02	3.27E-02	4.09E-02	5.09E-02	0.063	0.078
24	2.88E-03	3.62E-03	4.56E-03	5.73E-03	7.20E-03	9.05E-03	1.14E-02	1.43E-02	1.79E-02	2.24E-02	2.81E-02	3.51E-02	4.38E-02	5.45E-02	0.068	0.084
25	3.09E-03	3.89E-03	4.89E-03	6.15E-03	7.73E-03	9.71E-03	1.22E-02	1.53E-02	1.92E-02	2.40E-02	3.01E-02	3.76E-02	4.69E-02	5.83E-02	0.072	0.089
26	3.32E-03	4.17E-03	5.25E-03	6.60E-03	8.30E-03	1.04E-02	1.31E-02	1.64E-02	2.06E-02	2.58E-02	3.22E-02	4.02E-02	5.01E-02	6.23E-02	0.077	0.095
27	3.56E-03	4.48E-03	5.63E-03	7.08E-03	8.90E-03	1.12E-02	1.40E-02	1.76E-02	2.20E-02	2.76E-02	3.45E-02	4.30E-02	5.36E-02	6.66E-02	0.082	0.102
28	3.82E-03	4.80E-03	6.04E-03	7.59E-03	9.54E-03	1.20E-02	1.50E-02	1.88E-02	2.36E-02	2.95E-02	3.69E-02	4.60E-02	5.73E-02	7.10E-02	0.088	0.108
29	4.09E-03	5.15E-03	6.47E-03	8.13E-03	1.02E-02	1.28E-02	1.61E-02	2.02E-02	2.53E-02	3.16E-02	3.95E-02	4.92E-02	6.11E-02	7.58E-02	0.094	0.115
30	4.38E-03	5.51E-03	6.93E-03	8.71E-03	1.09E-02	1.37E-02	1.72E-02	2.16E-02	2.70E-02	3.38E-02	4.22E-02	5.25E-02	6.52E-02	8.08E-02	0.100	0.122
31	4.69E-03	5.90E-03	7.42E-03	9.32E-03	1.17E-02	1.47E-02	1.84E-02	2.31E-02	2.89E-02	3.61E-02	4.50E-02	5.60E-02	6.95E-02	8.60E-02	0.106	0.130
32	5.02E-03	6.32E-03	7.94E-03	9.97E-03	1.25E-02	1.57E-02	1.97E-02	2.47E-02	3.09E-02	3.86E-02	4.81E-02	5.98E-02	7.41E-02	9.15E-02	0.113	0.138
33	5.37E-03	6.76E-03	8.49E-03	1.07E-02	1.34E-02	1.68E-02	2.11E-02	2.64E-02	3.30E-02	4.12E-02	5.13E-02	6.37E-02	7.89E-02	9.73E-02	0.120	0.146
34	5.75E-03	7.22E-03	9.08E-03	1.14E-02	1.43E-02	1.80E-02	2.25E-02	2.82E-02	3.52E-02	4.39E-02	5.46E-02	6.78E-02	8.39E-02	1.03E-01	0.127	0.155
35	6.14E-03	7.72E-03	9.70E-03	1.22E-02	1.53E-02	1.92E-02	2.40E-02	3.00E-02	3.75E-02	4.68E-02	5.82E-02	7.22E-02	8.92E-02	1.10E-01	0.134	0.163
36	6.56E-03	8.25E-03	1.04E-02	1.30E-02	1.63E-02	2.05E-02	2.56E-02	3.20E-02	4.00E-02	4.99E-02	6.20E-02	7.68E-02	9.48E-02	1.16E-01	0.142	0.173
37	7.01E-03	8.81E-03	1.11E-02	1.39E-02	1.74E-02	2.18E-02	2.73E-02	3.42E-02	4.26E-02	5.31E-02	6.59E-02	8.16E-02	1.01E-01	1.23E-01	0.151	0.182
38	7.48E-03	9.40E-03	1.18E-02	1.48E-02	1.86E-02	2.33E-02	2.91E-02	3.64E-02	4.54E-02	5.65E-02	7.01E-02	8.66E-02	1.07E-01	1.31E-01	0.159	0.192
39	7.98E-03	1.00E-02	1.26E-02	1.58E-02	1.98E-02	2.48E-02	3.10E-02	3.88E-02	4.83E-02	6.01E-02	7.44E-02	9.19E-02	1.13E-01	1.38E-01	0.168	0.203
40	8.51E-03	1.07E-02	1.34E-02	1.68E-02	2.11E-02	2.64E-02	3.30E-02	4.12E-02	5.14E-02	6.38E-02	7.90E-02	9.75E-02	1.20E-01	1.46E-01	0.177	0.213

⁴ l'analyse chimique donne la somme N-NH₃ + N-NH₄⁺

