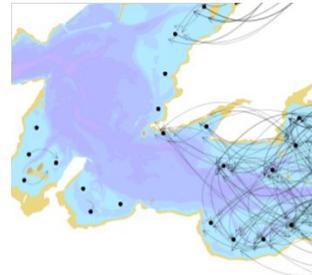
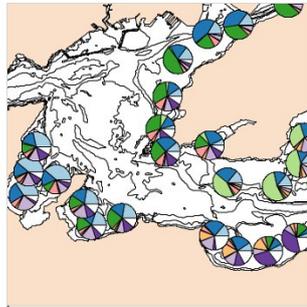
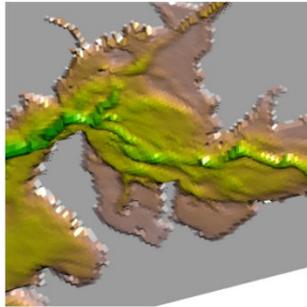




Etude de la connectivité potentielle en rade de Brest : application au cas de l'huître plate, *Ostrea edulis*

Ismaël BERNARD - LEMAR
Julie DUCHÊNE - LEMAR
Christian HILY - LEMAR
Pascal LAZURE - PHYSED - DYNECO - Ifremer
Stéphane POUVREAU - PFOM - LEMAR - Ifremer
Pierre BOUDRY - PFOM - LEMAR - Ifremer



Partenaires :



Financement :



21 mai 2014

Table des matières

| | |
|--|-----------|
| 1. Introduction générale | 5 |
| 2. Mise en place des simulations | 7 |
| 2.1. La modèle MARS 3D de la rade de Brest | 7 |
| 2.2. Lien entre la durée de vie larvaire et la température | 8 |
| 2.3. Définition des zones d'habitat potentiel | 9 |
| 2.4. Choix des vents | 9 |
| 2.5. Implémentation d'un positionnement particulier au sein de la colonne d'eau | 12 |
| 2.6. Influence du régime hydrique | 12 |
| 3. Résultats | 12 |
| 3.1. Analyse de la variabilité de la connectivité | 12 |
| 3.2. Cartes de connectivités potentielles moyennes | 15 |
| 4. Discussion | 17 |
| 4.1. Apports de ces simulations pour l'optimisation du captage de l'huître plate en rade de Brest | 17 |
| 4.2. Adéquation entre simulations et observations des stocks et du captage | 19 |
| 4.3. Mieux comprendre la dispersion larvaire | 19 |
| 5. Conclusion | 21 |
| A. Cartes des interdictions de pêches dans l'anse du Fret, issue de l'arrêté 2013/003 de la préfecture maritime atlantique. | 22 |
| Références | 24 |

1. Introduction générale

En 1911, GUÉRIN-GANIVET (1911) note déjà, à propos des gisements d’huîtres plates de la rade de Brest, qu’autrefois “les bancs naturels y étaient à la fois plus nombreux, plus étendus et plus riches, de même que les parcs exploités”. La situation de l’ostréiculture était telle à cette époque que, le 29 septembre 1890, des essais d’ensemencement de la rade de Brest avec 80000 huîtres portugaises avaient été effectué, sans succès. Il est donc remarquable que près de 100 ans après, ces préoccupations autour de l’huître plate n’aient pas perdu de leur actualité.

Aux problèmes de la surpêche des bancs d’huîtres (LAMBERT, 1938), se sont en effet substitués dans les années 1970, deux maladies parasitaires, la bonamiose (*Bonamia ostreae*) et la marteillose (*Marteilla refrigens*). Ces maladies, qui peuvent tuer l’huître plate avant sa commercialisation, ont peu à peu réduit la production française de cette espèce (GRIZEL, 1985). Dans ce contexte, le programme PERLE vise à relancer la culture de l’huître plate en développant des huîtres résistantes à partir desquelles de nouveaux bancs seraient constituer. Pour cela, les connaissances disponibles sur cette espèce doivent être actualisées.

L’huître plate *Ostrea edulis* est une espèce avec une reproduction différente de l’huître creuse *Crassostrea gigas*. La fécondation a ainsi lieu au sein de la cavité palléale de l’huître plate et est suivie par une phase d’incubation des jeunes larves qui peut durer de 8 à 10 jours (MARTEIL, 1960). Les larves commencent alors leur développement protégées dans la cavité palléale des huîtres mères, avec le bénéfice du flux de nourriture qui y est généré. La vie larvaire pélagique s’en trouve considérablement raccourcie par rapport à l’huître creuse, elle ne dure que de 1 à 2 semaines (MARTEIL, 1960, p. 392).

D’un point de vue ostréicole, l’important est la densité de naissains captés sur les collecteurs. Cette densité dépendra à la fois du stock de géniteurs potentiels et donc du nombre de larves produit, de la dispersion de ces larves et de leur survie. Il est possible de mettre en évidence un lien entre le captage de naissain, ou recrutement, et les concentrations de larves au stade évolué mesurées entre 1976 et 2010 à Quiberon (Fig. 1). Le grand nombre de données disponibles permet de dégager une tendance générale significative entre les deux variables mais reste associé à une très forte variabilité. Ceci indique que d’autres facteurs que l’abondance larvaire influencent la quantité de naissains captés. Une part de cette variabilité provient de la dispersion des larves par les courants et sera étudiée pour la rade de Brest.

Cette sous-action du programme PERLE a pour objectif d’étudier la phase de dispersion des larves en rade de Brest et son impact sur le lien entre la quantité de larves émises et la quantité de larves captées. Ce lien est sous l’influence de la dispersion et de la survie des larves mais seule la dispersion larvaire, avec différents forçages biophysiques du milieu, est considérée ici. Ce lien, qui possède une forte composante spatiale, est appelé connectivité. On parlera de connectivité potentielle dans le cas où, comme ici, l’emplacement et la densité des stocks ne sont pas inclus dans le calcul. Les effets de la localisation des zones d’émission et de captage, du comportement des larves, du vent ou de la durée de vie larvaire sur la connectivité potentielle en rade de Brest seront détaillés de manière théorique à travers l’utilisation d’un modèle hydrodynamique simulant la dispersion larvaire. Il s’agit également de comprendre, avec ces analyses, pourquoi la zone de Lomergat est une bonne zone de captage. Et enfin, cette sous-action vise à identifier les sites les plus

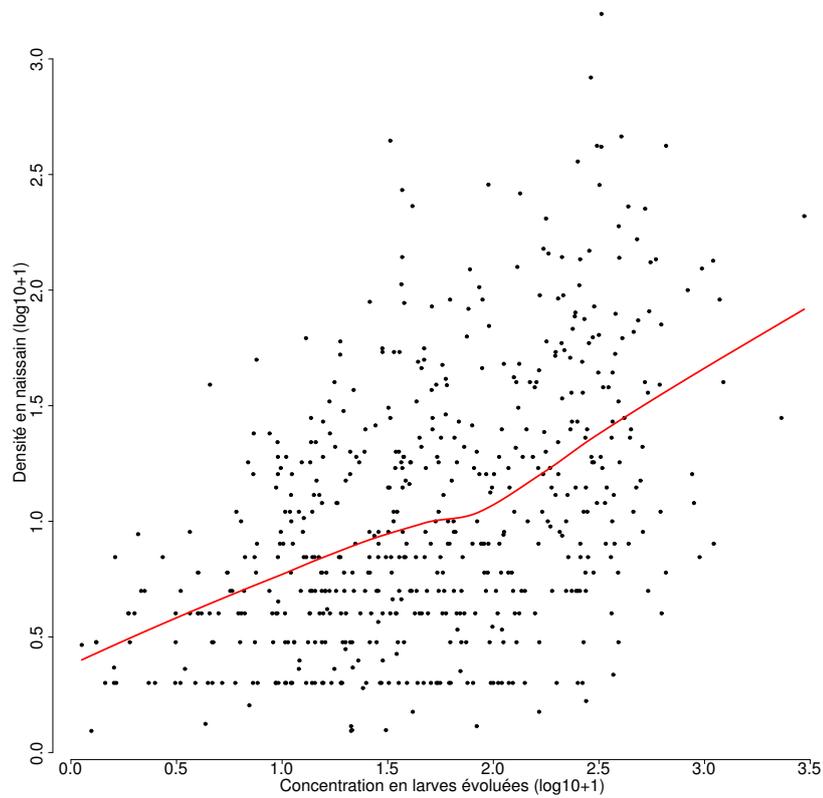


FIGURE 1 – Lien entre le recrutement, en densité de naissain, et la concentration de larves évoluées pour la baie de Quiberon de 1976 à 2010 ($n = 566$). La droite rouge présente le résultat d'une regression par polynômes locaux. Les données utilisées sont présentées dans GUYON (2011).

adéquats, d'un point de vue hydrodynamique, au repeuplement de l'huître plate en rade de Brest.

2. Mise en place des simulations

2.1. La modèle MARS 3D de la rade de Brest

Les simulations de la dispersion larvaire en rade de Brest ont été effectuées à l'aide du modèle MARS 3D (LAZURE et DUMAS, 2008). Dans le modèle, les larves ont été représentées par un traceur dissout. La bathymétrie du modèle (Fig. 2) est façonnée par la transgression holocène de l'ancien confluent entre l'Elorn, au nord, et l'Aulne, au sud de la Rade (STÉPHAN, 2011). Dans le modèle, la rade de Brest est découpée en 300 mailles en longitude et 121 en latitude, soit une résolution spatiale de 150 m en longitude comme en latitude. Sur la verticale, 10 mailles décrivent les différentes couches d'eau.

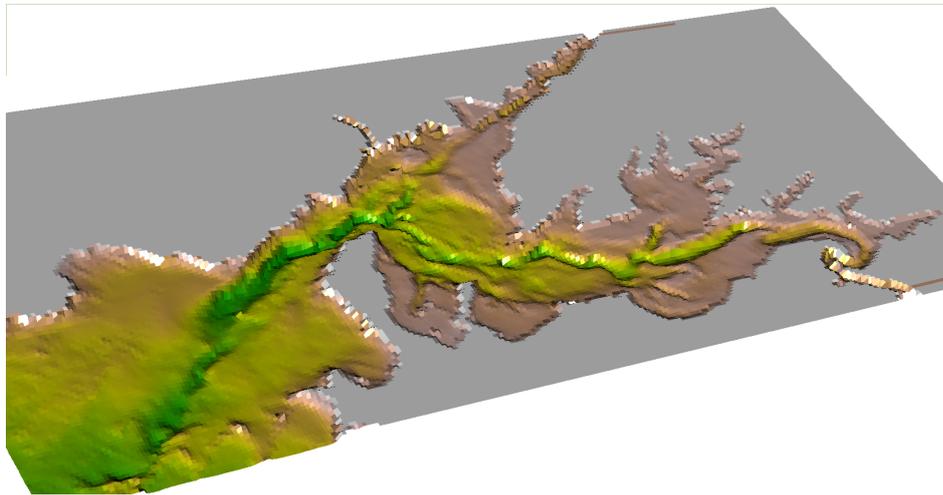


FIGURE 2 – Bathymétrie de la Rade de Brest utilisée dans le modèle.

Les connaissances sur l'écologie de l'huître plate en rade de Brest étant en cours d'acquisition au moment des simulations, cette première étude de la connectivité en rade de Brest reste théorique. De manière à obtenir une vision intégrée au maximum de la connectivité, l'effet de 6 facteurs différents à été pris en compte :

- la zone d'émission des larves,
- la zone de captage, c'est-à-dire de fixation des larves,
- le vent,
- la durée de vie larvaire,
- le débit des fleuves,
- le comportement des larves.

Pour chacun des facteurs, différentes modalités ont été définies de manière à simuler un ensemble représentatif de la variabilité de chacun de ces facteurs. Ainsi 32 zones d'émission des larves ont été définies, qui correspondent également aux zones de fixation. Les dispersions larvaires ont été soumises à 15 séquences réalistes de forçage de vent tandis que 3 durées de vie larvaire différentes ont été testées. Pour le débit des fleuves, deux cas ont été considérés, un cas d'étiage et un cas de crue et

l'effet du comportement a également été simulé selon deux modalités : une absence de migration larvaire et une migration plutôt vers le fond. L'ensemble de ces choix est décrit par la suite.

On note Q_{ij} la quantité de larves émises dans la zone i retrouvées dans la zone j , E_i la quantité de larves émises depuis la zone i et S_j , la surface de la zone d'arrivée j . Les connectivités correspondent alors aux ratios du nombre de larves dans une zone d'arrivée sur le nombre de larve émis par la zone de départ, standardisés par les surfaces des zones d'arrivée, soit $C_{ij} = \frac{Q_{ij}}{E_i S_j}$. Cette dernière standardisation par les surfaces des zones d'arrivée permet de comparer les connectivités pour des zones d'arrivée de surfaces différentes. Pour effectuer l'analyse de variance, les connectivités pour une même zone d'arrivée ont été sommées : $P_j = \sum_i C_{ij}$, P_j correspond alors à la probabilité théorique qu'une larve émise dans l'ensemble de l'habitat potentiel de la rade de Brest soit retrouvée au banc j au terme de la vie larvaire.

2.2. Lien entre la durée de vie larvaire et la température

Sur la base des données de MARTEIL (1960), de KORRINGA (1940) et R. Gonzalez (*com. pers.*, 2012), il apparaît que la durée larvaire de l'huître plate est peu sensible à la température (Fig. 3). Ainsi, la durée de la vie larvaire pourrait aller de 13 jours à 15°C à 6 jours à 30°C, mais varie seulement de 12 jours et demi à 11 jours entre 16 et 18°C.

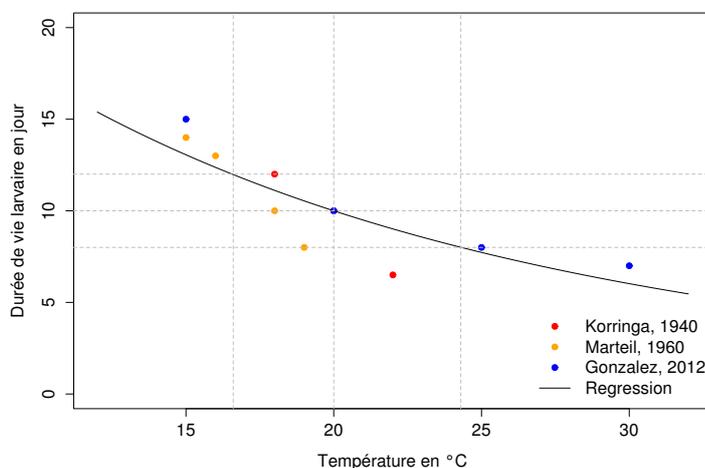


FIGURE 3 – Lien entre la température et la durée de vie larvaire selon la loi d'Arrhenius à partir de données historiques.

Si on considère la gamme de variation de température observée en rade de Brest (Fig. 4), il apparaît que, pour l'été, la principale source de variation est surtout spatiale, avec un gradient thermique côte-large moyen de 2°C à cette saison. A partir de ces données trois durées de vie larvaires différentes ont été considérées : 8, 10 et 12 jours, ce qui correspond à des développements larvaires à des températures respectives de 16,6, 20 et 24,3°C (Fig. 3).

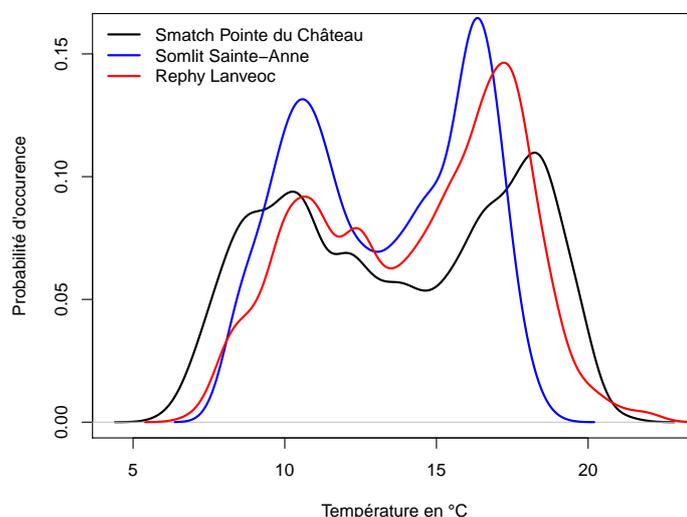


FIGURE 4 – Densité de probabilité pour différents suivis temporels de température, du plus océanique (Sainte-Anne) au plus interne (pointe du Château).

2.3. Définition des zones d'habitat potentiel

Même si l'habitat de l'huître plate en rade de Brest était autrefois étendu, l'ensemble de la rade n'est pas propice au développement de bancs. Cette définition de l'habitat potentiel passe par la caractérisation des zones qui peuvent accueillir l'huître plate. Ce travail a été effectué à partir des premiers résultats des coups de drague à huîtres en rade de Brest (voir la partie inventaire des populations du rapport PERLE). En fonction de ces connaissances, cet habitat potentiel a été défini comme l'ensemble des zones comprises entre 0 et 10 m de fond sur sédiments non totalement vaseux. L'ensemble des mailles du modèle qui remplissaient ces conditions a été conservé, à l'exception des mailles situées dans les ports ou isolées qui ont été supprimées.

Ces mailles ont ensuite été découpées en 32 bancs de taille similaire à l'aide d'un algorithme de partitionnement (algorithme pam) avant une retouche manuelle de certains bancs situés sur des discontinuités de structures hydrodynamiques. Le résultat de ce découpage a permis de définir 32 bancs potentiels d'habitat dont les mailles ont été utilisées pour calculer les connectivités (Fig. 5), à la fois comme zone d'émission et zone de captage des larves.

2.4. Choix des vents

Le modèle a été forcé en vent avec les données issues du modèle ARPEGE, couvrant la période 1996-2011. Ces données décrivent les variations de vents avec une résolution spatiale de $0,5^\circ$ en latitude et en longitude et avec une résolution temporelle de 6h. De manière à bien échantillonner la variabilité locale des vents, une procédure spécifique a été mise au point.

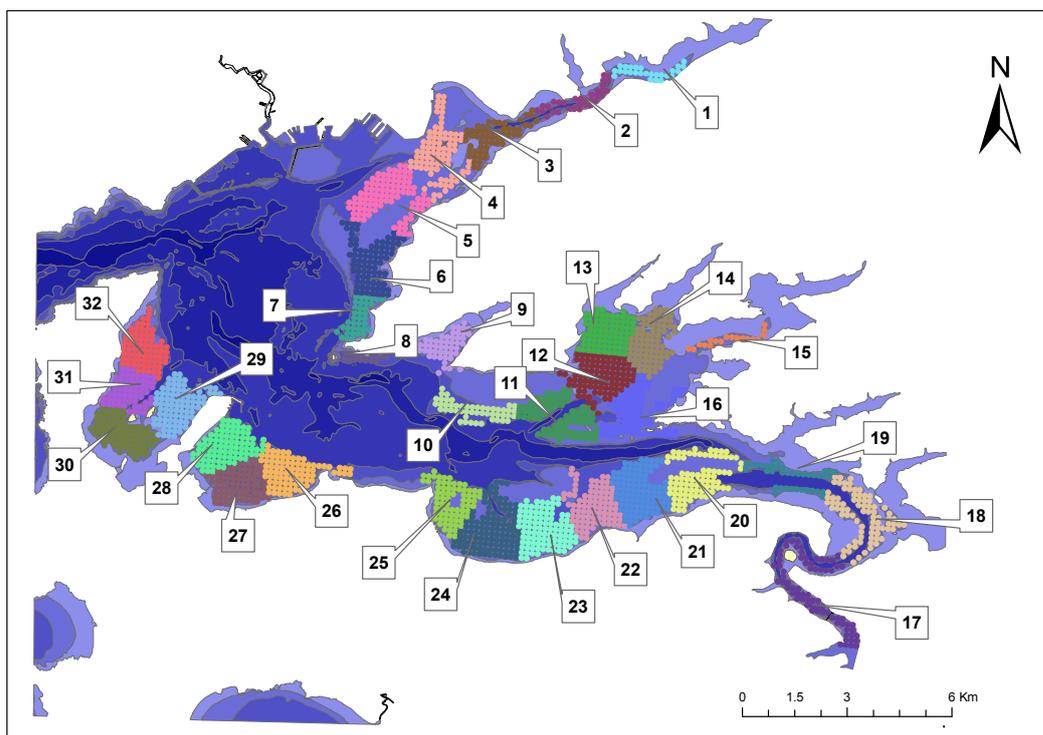


FIGURE 5 – Carte des 32 bancs découpés à partir de l’habitat potentiel de l’huître plate en rade de Brest et numérotation utilisée.

Cette procédure consiste tout d’abord à calculer des tensions de vents, c’est à dire à passer la force du vent au carré. Cela permet de mieux rendre compte de l’effet du vent sur les masses d’eau. Ensuite, les vents sont découpés en différentes séquences de vents, correspondant à la durée de vie larvaire classique, ici 12 jours. Pour chacune des périodes obtenues, les vents sont redécoupés en sous-périodes de 2 jours et la moyenne des tensions de vent zonale et méridienne est calculée. Au final, chacune des séquences de 12 jours est décrite par 12 variables. Le jeu historique de séquences a été extrait sur la période 1996-2011 pour la période estivale, de juin à septembre.

Pour regrouper les séquences similaires sur la base des 12 variables calculées, l’algorithme de partitionnement des données pam (MAECHLER et al., 2014) a été appliqué aux résultats de l’ACP effectué sur l’ensemble des séquences collectées. Ce type d’algorithme nécessite que l’utilisateur définisse le nombre de groupe souhaité. Ce degré de liberté a été optimisé de manière à ce que la variation intra groupe n’augmente plus lorsqu’on augmente le nombre de groupe. Au terme de la procédure, 15 séquences ont été définies (Fig. 6) en choisissant les séquences les plus proches du barycentre de chacun des groupes.

Ces séquences de vent s’étalent de 1996 à 2011 et sont dominées par des vents de sud-ouest ou de nord-est (Tab. 1). Les probabilités d’occurrence de vent des différents groupes décrits varient entre 3 et plus de 13%.

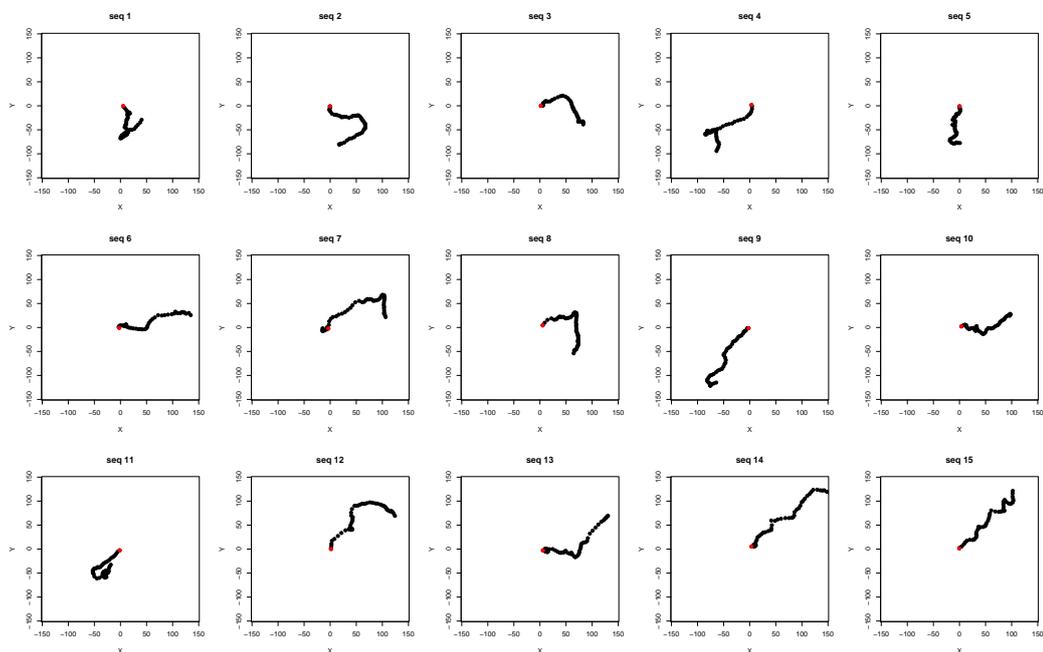


FIGURE 6 – Séquences de vent utilisées dans les simulations. Le point rouge représente le premier point de l'hodogramme.

TABLE 1 – Description des 15 séquences de vents choisies, avec les probabilités d'occurrence des groupes représentés, sur la période 1996-2011.

| N° | Date de début | Caractéristiques de la séquence | p |
|----|------------------|--|-------|
| 1 | 17 juin 2001 | Vent faible de nord puis sud-ouest | 7,55 |
| 2 | 29 juin 1997 | Vent de nord et ouest puis nord-est | 8,25 |
| 3 | 30 juillet 2000 | Vent faible de sud-ouest puis nord-ouest | 8,25 |
| 4 | 12 juin 1996 | Vent fort de nord-est puis faible de nord | 3,07 |
| 5 | 23 juillet 2001 | Vent faible de secteur nord | 12,26 |
| 6 | 3 juillet 2001 | Vent d'ouest faible puis fort | 5,9 |
| 7 | 1 juin 1999 | Vent fort de sud-ouest puis faible du nord | 4,01 |
| 8 | 5 juin 1999 | Idem mais sequence de nord plus longue | 5,9 |
| 9 | 5 septembre 2007 | Vent continu de nord-est | 5,42 |
| 10 | 4 juin 2000 | Vent faible d'ouest puis de sud-ouest | 13,21 |
| 11 | 1 juin 2009 | Vent faible de nord-est puis faible de sud-ouest | 4,25 |
| 12 | 23 juillet 2005 | Vent fort de sud-ouest et sud puis ouest | 4,25 |
| 13 | 24 août 2006 | Vent d'ouest puis fort de sud-ouest | 5,19 |
| 14 | 13 juin 2011 | Vent fort de sud-ouest | 5,66 |
| 15 | 23 juillet 2009 | Vent modéré de sud-ouest | 6,84 |

2.5. Implémentation d'un positionnement particulier au sein de la colonne d'eau

L'importance du comportement des larves pour leur déplacement a été mis en avant dans de nombreuses études (e.g. NORTH et al., 2008), le plus important étant le comportement des larves sur la verticale. Cependant, l'implémentation d'un tel comportement reste délicat tant les mesures sur le terrain sont rares et souvent difficiles à interpréter (RABY et al., 1994).

Pour l'huître plate, des recherches anciennes font état de différences de concentration en larves entre le fond et la surface lors des périodes ensoleillées (MARTEIL, 1960, p. 396). L'Ifremer disposait par ailleurs de séries de pêches de larves à 1 m de la surface et 1 m du fond (voir GUYON, 2011, pour une présentation de ces données). Ces données ont donc permis d'évaluer la pertinence d'implémenter un comportement larvaire. Elles montrent que pour deux sites de la baie de Quiberon, Men Er Roué et Beaumer, et sur la période de 1984 à 1999, les larves sont pour près de 75 % des cas trouvées en concentrations plus importantes au fond par rapport à la surface (Fig. 7). Ce constat ne change pas en fonction du site de pêche ou si on considère uniquement les larves évoluées.

2.6. Influence du régime hydrique

L'influence de l'Aulne ou de l'Elorn sur la dispersion larvaire a été testée en réalisant les simulations selon 2 scénarios différents de débits. Deux années particulièrement contrastées ont donc été choisies : une pluvieuse, 2007 et une sèche, 2003 (Fig. 8). Ces deux années caractérisent ainsi la gamme de variabilité de débit de ces fleuves en été.

3. Résultats

3.1. Analyse de la variabilité de la connectivité

Pour l'ensemble des combinaisons des différentes modalités des facteurs pris en compte, une valeur de connectivité potentielle a été calculée. Il est ainsi possible de regarder quelle est la part de variabilité expliquée par chacun des facteurs pris en compte. De la même manière que dans des études côtières précédentes (BERNARD et al., 2012), c'est le banc d'arrivée qui porte une part très importante de cette variance, près de 84 % (Tab. 2). Viennent ensuite certaines interactions de second ordre comme l'interaction entre le mouvement des larves et la zone d'arrivée, 3,9 %, ou l'interaction entre le vent et la zone d'arrivée 3%. Ces interactions de second ordre expliquent une part de variance plus importante que l'effet du mouvement ou du vent seul. Cela veut dire que ces facteurs sont plus particulièrement importants pour certaines zones de la rade de Brest.

Pour étudier ces interactions, la décomposition de la variance a été spatialisée pour chacune des zones d'arrivée (Fig. 9). Cette carte fait apparaître quatre grandes zones en rade de Brest. Tout d'abord une zone, de l'embouchure de l'Elorn à la pointe de l'Armorique, où les facteurs dominant sont le vent et le mouvement des larves. L'estuaire de l'Elorn est effectivement une zone orientée selon les vents dominants qui auront un effet accentué ici, et cette circulation sera également affectée par le positionnement des larves dans la colonne d'eau. Viennent ensuite les zones de la baie de Daoulas, pour lesquelles la connectivité est principalement influencée

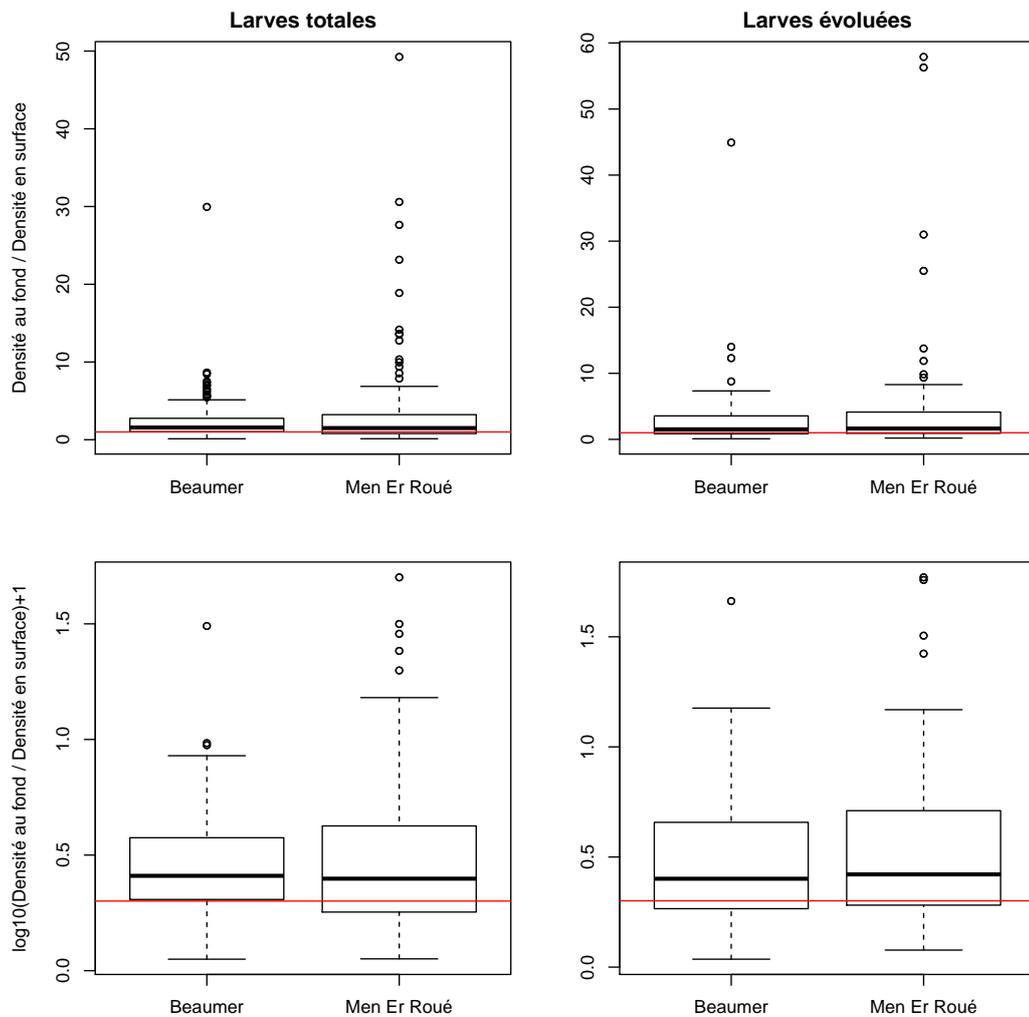


FIGURE 7 – Boxplot des ratios entre les concentrations de larves au fond et en surface pour les sites de Men Er Roué et de Beaumer de 1984 à 1999. Les ratios sont donnés pour l’ensemble des larves ou pour uniquement les larves les plus évoluées et sans transformation ou avec une transformation par la fonction $\log_{10}(x + 1)$. Pour une localisation précise des sites, voir GUYON (2011, p. 5).

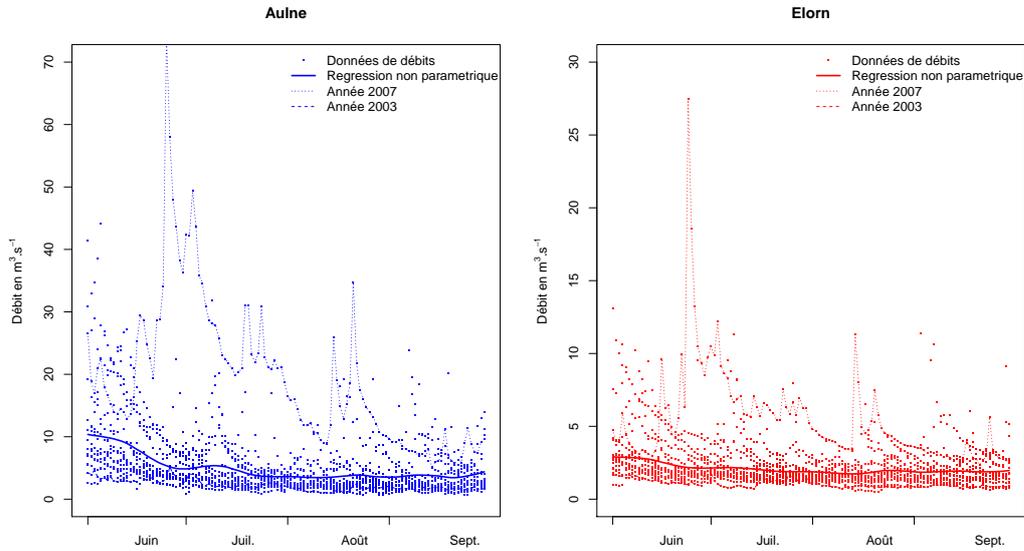


FIGURE 8 – Caractérisation de la variabilité inter-annuelle des débits de l’Aulne et de l’Elorn en période estivale pour les années de 1996 à 2011. Deux années particulières ont été représentées : une année exceptionnellement sèche, 2003, et une année exceptionnellement humide, 2007.

TABLE 2 – Décomposition de la variance pour les connectivités sommées sur les bancs de départ. Le tableau donne le pourcentage de variabilité expliqué par l’ensemble des facteurs et interactions de second ordre (DVL : Durée de Vie Larvaire; Mouv : Mouvement des larves; Arrivées : zones de captage).

| | Pourcentage de variance expliquée |
|----------------|-----------------------------------|
| DVL | 1,00 |
| Vent | 0,55 |
| Débit | 0,03 |
| Mouv | 0,14 |
| Arrivée | 83,77 |
| DVL :Vent | 0,08 |
| DVL :Débit | <0,01 |
| Vent :Débit | 0,04 |
| DVL :Mouv | <0,01 |
| Vent :Mouv | 0,05 |
| Débit :Mouv | 0,10 |
| DVL :Arrivée | 0,88 |
| Vent :Arrivée | 3,04 |
| Débit :Arrivée | 1,04 |
| Mouv :Arrivée | 3,91 |
| Autre | 5,37 |

par le débit des fleuves et de manière secondaire par le vent. Des débits importants de l'Aulne et de l'Elorn permettent une alimentation de la baie de Daoulas par des bancs en dehors de la baie alors que ce n'est pas le cas en cas d'étiage marqué. L'effet du vent dans cette zone s'explique par son exposition aux vents dominants de sud-ouest. La troisième zone s'étend de l'estuaire de l'Elorn à l'anse de Poulmic. Cette zone est marquée par l'importance de l'interaction entre l'effet du débit et du mouvement des larves, avec des facteurs secondaires multiples et variables dans la zone. Ceci témoigne de la complexité de l'alimentation larvaire dans la zone, soumise à l'influence combinée de multiples facteurs. Des débits importants peuvent y créer une stratification verticale qui interagit alors avec l'inclusion dans le modèle d'un comportement sur la verticale des larves. Enfin, la quatrième zone correspond à l'anse du Fret et à la baie de Roscanvel pour lesquelles la durée de vie larvaire est un facteur important. Pour cette zone éloignée des autres d'un point de vue hydrodynamique, une vie larvaire plus longue permet une alimentation par des bancs plus lointains.

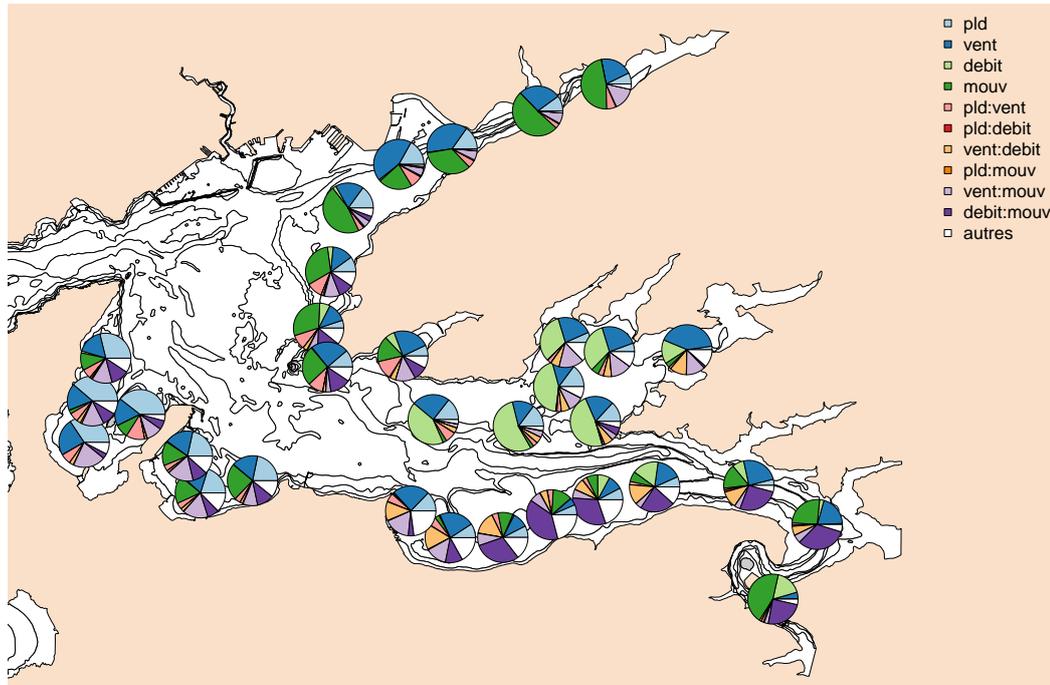


FIGURE 9 – Analyse de variance spatialisée de la connectivité en fonction des facteurs pris en compte.

3.2. Cartes de connectivités potentielles moyennes

Au vu de l'importance des facteurs spatiaux dans l'analyse de variance, il est primordial de représenter la spatialisation de la connectivité. L'ensemble des connectivités a donc été moyenné par zone d'émission et de captage. Avec 32 bancs différents, cela fait un peu plus de mille combinaisons à représenter. Deux représentations sont alors possibles, soit sous la forme d'une matrice de connectivité complète (Fig. 10), avec une spatialisation implicite, soit sous une forme cartographique mais,

pour des raisons de lisibilité, en ne représentant que les connectivités les plus fortes (Fig. 11).

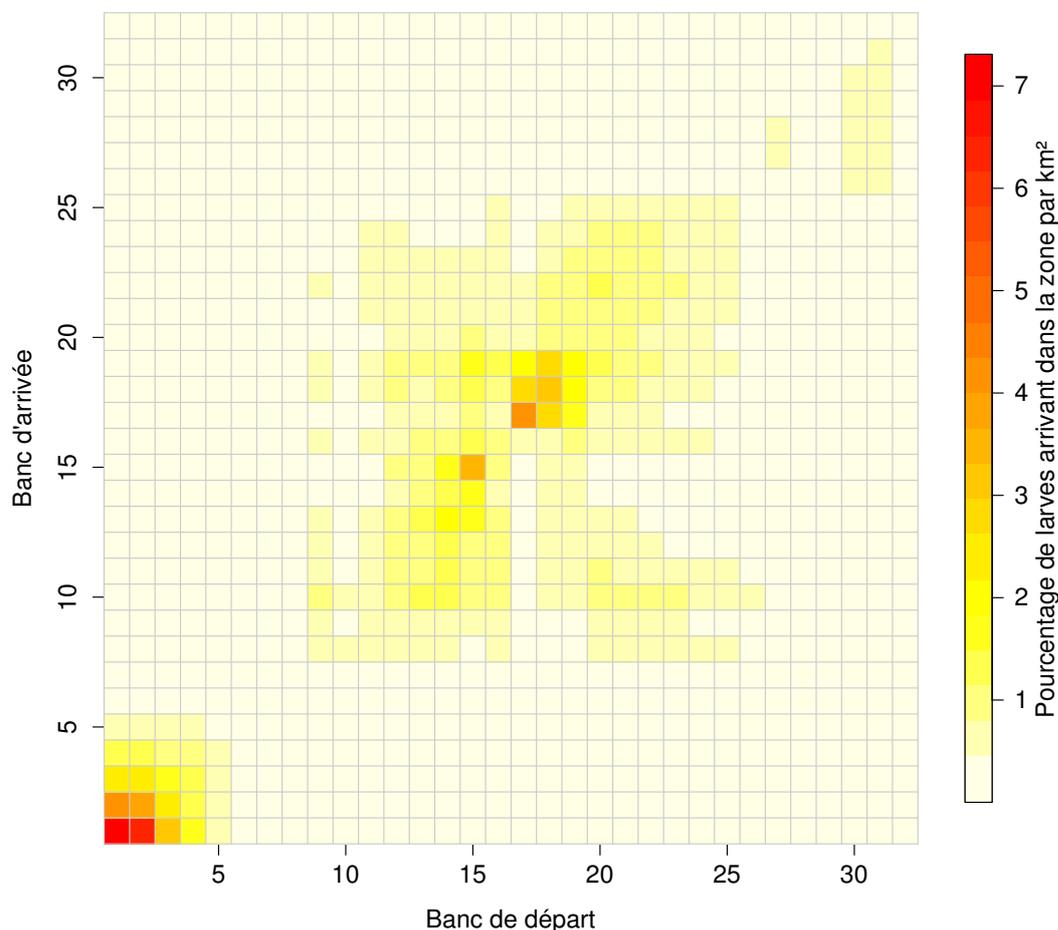


FIGURE 10 – Représentation matricielle de la connectivité potentielle moyenne pour les différents bancs de la rade de Brest, en pourcentage. Voir la figure 5 pour la correspondance des numéros de bancs.

Les deux représentations font apparaître de très fortes connectivités au sein de l'estuaire de l'Elorn, supérieures à 5 % de larves récupérées par km² (bancs 1 à 5), connectivités qui diminuent au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'embouchure. C'est ici qu'on trouve les plus fortes valeurs moyennes en rade de Brest mais l'Elorn apparaît fortement déconnectée des autres zones de la rade de Brest, avec les bancs du nord de la pointe de l'Armorique très peu alimentés par d'autres zones. Un second pôle de connectivité important apparaît dans l'estuaire de l'Aulne (bancs 17 à 19), avec des connectivités comprises entre 2 et 4 % des larves. Les zones de l'Aulne sont également alimentées par les bancs de la baie de Daoulas ainsi que les bancs à l'ouest de l'estuaire, jusqu'à l'anse de Poulmic. En troisième place, vient la baie de Daoulas, avec des connectivités de l'ordre de 2 % entre les bancs à l'intérieur de la baie et une alimentation possible par les bancs autour des concessions de captage de Lomergat. Le quatrième pôle de connectivités importantes est constitué par les bancs au sud-ouest de l'estuaire de l'Aulne, autour de Lomergat. Cette zone ne présente pas des connectivités élevées, entre 0.5 et 1 % en moyenne, mais bénéficie

d'apports potentiels par un grand nombre de bancs. Enfin, il faut également noter qu'à l'ouest de la rade de Brest, du côté de l'anse du Fret et de la baie de Roscanvel, les connectivités sont globalement faibles, inférieures en moyenne à 0,5 %. Ces zones se situent probablement, avec la pointe de l'armorique, dans l'aire d'influence du Goulet et subissent par conséquent de fortes dilutions.

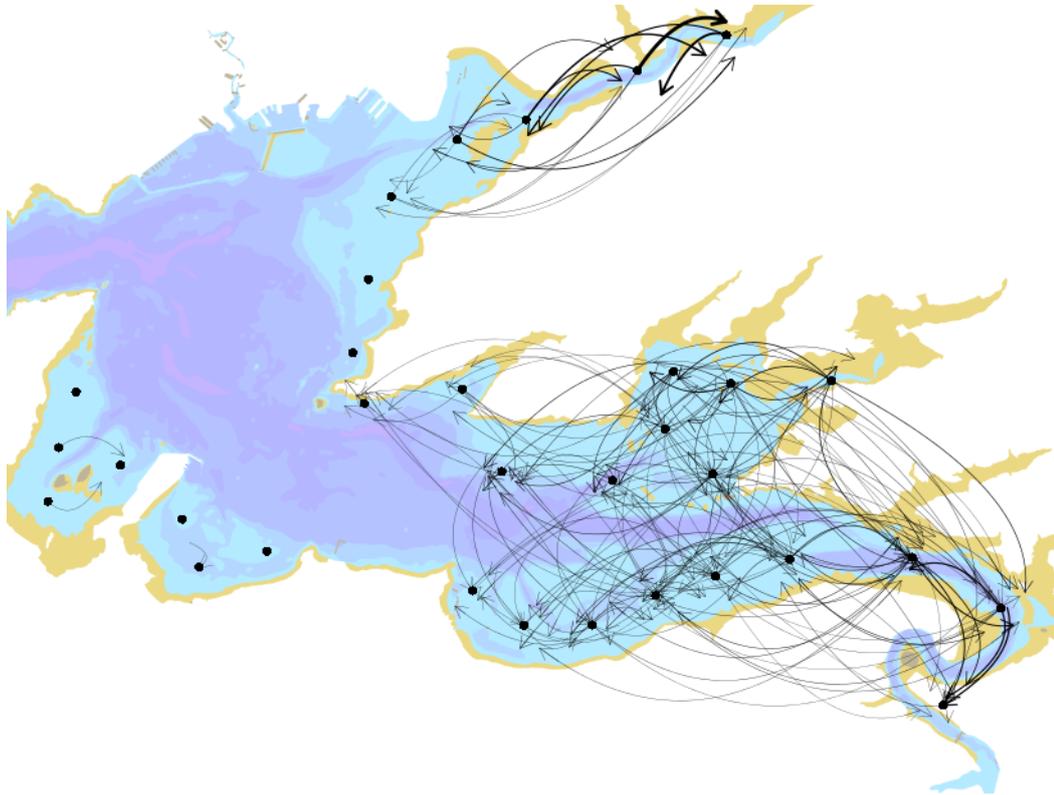


FIGURE 11 – Représentation cartographique des 20 % des connectivités potentielles les plus élevées. Les points noirs représentent les barycentres des zones tandis que l'épaisseur des flèches est proportionnelle aux pourcentages de connectivité.

4. Discussion

4.1. Apports de ces simulations pour l'optimisation du captage de l'huître plate en rade de Brest

La rade de Brest, de par la complexité de sa géographie, présente une forte spatialisation de la connectivité. Le choix des zones de captage ou des zones de repeuplement aura donc un impact important sur la probabilité d'alimentation en larves des capteurs. Cette étude montre que c'est l'estuaire de l'Elorn qui possède les pourcentages de connectivité les plus forts. Cependant, l'intérêt de cette zone doit être nuancé à la lumière de son isolement du reste de la rade de Brest et de la qualité de l'habitat incertaine, notamment avec une pollution par des métaux lourds, zinc, nickel et cadmium (ANONYME, 2005, p. 36).

L'estuaire de l'Aulne, étendu jusqu'à la baie de Daoulas et l'anse de Poulmic, apparaît plus prometteur tant les échanges y sont complexes et variés, ces zones s'alimentant les unes les autres. La baie de Daoulas (bancs 14 à 16) et l'embouchure de l'Aulne (bancs 18 à 21) sont ainsi de bonnes zones pour installer un banc source au vu du nombre de bancs alimentés et de la rétention des larves qui y sont libérées. Cette proposition n'est cependant basée que sur les effets de l'hydrodynamique de la rade de Brest décrit dans le modèle, effets auxquels il faudra ajouter les couches de contraintes imposées par la prévalence de *Bonamia ostreae* et *Martelia refringens* et par la possibilité d'obtenir des concessions.

Pour améliorer spécifiquement le captage à Lomergat, le placement idéal d'un banc de repeuplement du point de vue de la connectivité est un peu en amont, au nord de la presqu'île de Landevennec (Fig. 12). Comme le montre la carte des facteurs influant la connectivité, ce résultat pourrait être précisé en affinant la description du comportement larvaire dans le modèle.

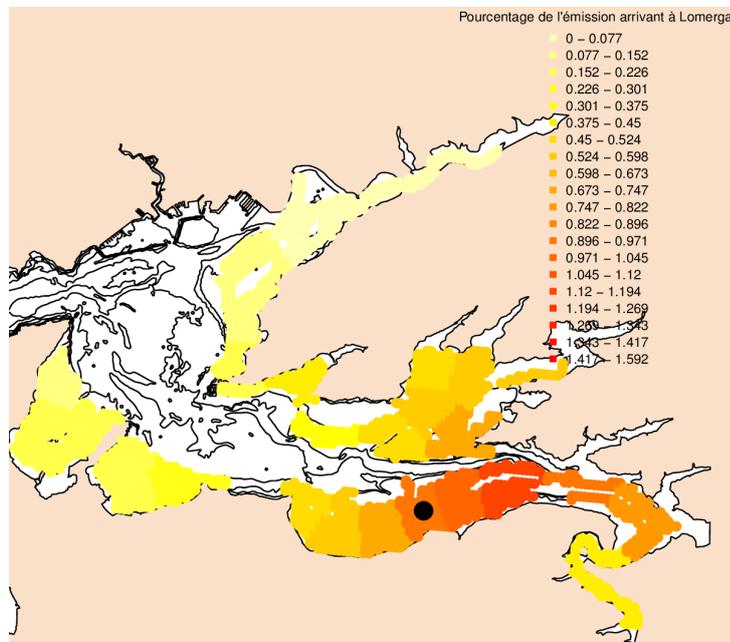


FIGURE 12 – Carte des contributions des bancs à la zone de captage de Lomergat, signalée par un point noir. Les connectivités sont exprimées en pourcentage des larves émises.

Une autre remarque importante concerne l'interprétation des résultats pour expliquer la variabilité interannuelle du captage. Le champ des dispersions larvaires possibles a en effet été passé au crible grâce au calcul de plus de 180000 valeurs de connectivité. Ceci permet de mettre en avant l'importance des facteurs géographiques devant l'impact d'autres facteurs comme la durée de vie larvaire ou le régime de vent. Il convient cependant de nuancer l'impact du positionnement géographique des stocks sur la variabilité interannuelle du captage en remarquant que le facteur d'emplacement des stocks ne peut pas être modifié rapidement d'une année sur l'autre. En effet, même avec un ré-ensemencement artificiel, les stocks de géniteurs évolueront lentement, à l'échelle de la décennie, alors que l'effet du vent

pourra être radicalement différent dès le mois suivant, tout comme la durée de vie larvaire ou le débit des fleuves. Ainsi, même avec l'importance de la localisation des stocks montrée dans cette étude, ce sont bien les autres facteurs bioclimatiques qui pourront expliquer la variabilité interannuelle du captage dans une zone précise.

4.2. Adéquation entre simulations et observations des stocks et du captage

Les simulations présentées ici sont des simulations théoriques, c'est à dire que les résultats rendent compte de l'hydrodynamique de la dispersion larvaire et de sa variabilité en fonction de quelques facteurs comme le vent, le débit, la durée de vie larvaire ou le comportement des larves. Ainsi, seules les connectivités potentielles sont présentées ici, sans préjugés sur les stocks en place. Pour obtenir des connectivités plus réalistes, il convient ensuite de multiplier les connectivités par les stocks présents au sein de chaque banc de départ (THOMAS, DUMAS et ANDRÉFOUËT, 2014; WATSON et al., 2010). Ceci a pour effet de fortement modifier les matrices de connectivité en donnant un poids plus important aux bancs où se trouvent les stocks. Par exemple, il n'existe actuellement plus d'huîtres plates au nord du pont de l'Iroise d'après les témoignages et le travail de terrain. La zone de connectivités très fortes de l'embouchure de l'Elorn ne se traduit donc pas par de fortes densités de captage dans cette zone.

A titre d'essai, les densités de captage observées sur les collecteurs placés en 2012 en différents lieux de la rade de Brest peuvent être utilisés pour vérifier l'adéquation entre les connectivités calculées et les variations spatiales observées pour le captage. Pour cela et aux vues des premières observations de terrain, il a été supposé que l'ensemble des huîtres plates se situait sur une seule des zones utilisées dans le modèle. Et pour chaque banc, nous avons cherché si il y avait une correspondance, en tant que relation linéaire, entre les variations spatiales de captage et la connectivité potentielle moyenne calculée à partir de chaque banc (Fig. 13). Cet exercice pointe, en 2012, les bancs 26 à 28, dans l'anse du fret, comme zone où pourrait se trouver un stock important d'huîtres creuses pour expliquer la spatialisation du captage observé cette année-là.

Cette indication repose sur peu de données mais est confortée par la découverte de peuplements de bonnes densités avec des individus de belles tailles et en bonne santé dans l'anse du Fret. D'autres récifs sont peut-être présents dans la zone d'interdiction de navigation en vigueur autour de l'île Longue (Annexe A). Il est alors probable que les zones d'interdiction de pêche aient contribué, au fil des années, à constituer une réserve d'huîtres plates qui alimente en larves les zones de captage, particulièrement Lomergat. Il serait intéressant d'évaluer, dans la mesure du possible, le stock d'huîtres plates dans ces zones. De la même manière, des comptages plus nombreux et plus précoces des densités de naissains d'huîtres plates pourraient améliorer la compréhension de l'alimentation du site de Lomergat à travers la dispersion larvaire.

4.3. Mieux comprendre la dispersion larvaire

En comparaison avec l'huître creuse *Crassostrea gigas*, la dispersion larvaire de l'huître plate pourrait être plus sensible à la biologie. Si les huîtres creuses éjectent spermatozoïdes et ovules pour une fécondation dans la colonne d'eau, l'huître plate

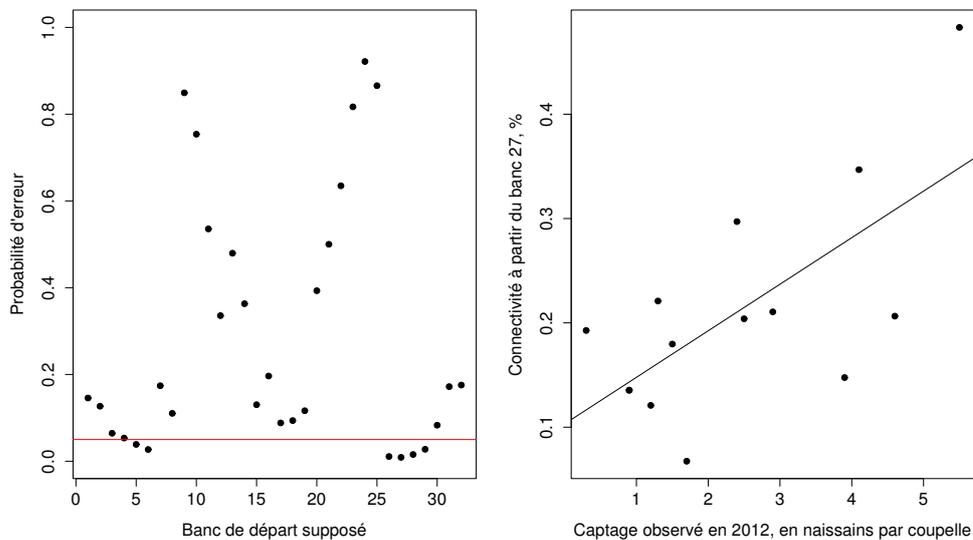


FIGURE 13 – Probabilité d’erreur sur le lien entre captage et connectivité si on suppose que l’ensemble du stock se trouve en un banc (figure de gauche). La ligne montre la limite de significativité à 5 %. Exemple de relation entre captage et connectivité pour les observations de 2012 et le banc 27 (figure de droite).

a évoluée vers une phase d’incubation au sein de l’huître mère (Ó FOIGHIL et TAYLOR, 2000). La vie larvaire de l’huître plate débute lorsque la larve est alors à un stade beaucoup plus évolué que pour l’huître creuse. Ses fonctions de nutrition et de locomotion sont pleinement fonctionnelles et vont donc induire un comportement plus complexe dès le début de la dispersion.

Un comportement particulièrement important pour la dispersion est le placement vertical des larves dans la colonne d’eau (HERBERT et al., 2012 ; METAXAS et SAUNDERS, 2009). S’il est admis que les larves de l’huître plate se placent préférentiellement au fond (MARTEIL, 1960, p. 396), ce que confirme l’analyse des données historique de la baie de Quiberon, ce positionnement n’a rien de systématique et ses facteurs de variations ne sont pas connus. Ainsi, est-ce que les larves d’huîtres plates présentent un comportement de migrations verticales en lien avec la marée, les cycles circadiens, la stratification haline ou la nourriture disponible ? Ces éléments sont à étudier pour cette espèce car ils peuvent modifier la dispersion larvaire à l’échelle de la rade de Brest, particulièrement dans la zone d’intérêt de l’estuaire de l’Aulne.

Le comportement de l’huître plate ne s’arrête pas aux migrations verticales : la larve compétente de l’huître plate est capable d’un choix actif lors de la fixation qui se traduit par une exploration par reptation du substrat (CRANFIELD, 1973). Des conditions de lumière et de nourriture favorables (BAYNE, 1969), la présence de biofilms particuliers (TRITAR, PRIEUR et WEINER, 1992), certaines molécules chimiques (MESIAS-GANSBILLER et al., 2013) peuvent attirer les larves et déclencher la fixation. Ces études ont cependant été réalisées en milieu contrôlé et le

comportement de fixation des larves en mer reste peu connu. Sur ce sujet, les différents tests de captage réalisés dans le programme PERLE rendent compte de la finesse des préférences de substrat des larves à petite échelle spatiale. La densité de fixation des larves dans une zone dépendra donc également de l'abondance dans la zone de substrats favorables à la fixation, effet qui n'a pas été pris en compte ici.

5. Conclusion

Du point de vue des connectivités calculées dans cette étude, la rade de Brest présente trois zones distinctes :

- une zone de connectivités faibles, défavorable à l'alimentation en larves des autres bancs de la rade de Brest, située autour du Goulet et comprenant la baie de Roscanvel ainsi que la pointe de l'Armorique ;
- une zone avec de fortes connectivités internes mais isolée du reste de la rade de Brest, constituée par l'estuaire de l'Elorn ;
- une zone de connectivités moyennes et complexes de l'estuaire de l'Aulne à l'anse de Poulmic en passant par la baie de Daoulas.

Cette dernière grande zone est, du point de vue de l'étude de l'hydrodynamique, la plus favorable à un repeuplement de la rade de Brest en favorisant les taux de rétention des larves issues des géniteurs qui y seront placés. Statuer sur la présence de bancs importants dans l'anse du Fret pourrait également largement améliorer la compréhension de l'alimentation en larves des parcs de captage en rade de Brest.

Le comportement de la larve de l'huître plate reste peu connu dans le milieu et devrait être étudié de manière plus approfondie pour pouvoir affiner le calcul des dispersions larvaires en rade de Brest. En ce sens, des expériences de suivis des migrations verticales des larves dans la colonne d'eau sur plusieurs cycles de marée ainsi qu'une cartographie des densités de captage d'huîtres plates pourraient permettre d'affiner le modèle de dispersion.

Références

- ANONYME (2005). *Reseau R.A.D.E.- bassin versant bilan de la qualite physico-chimique, biologique et bacteriologique des eaux*. Rapp. tech. Brest Métropole Océane.
- BAYNE, B. L. (1969). « The gregarious behaviour of the larvae of *Ostrea edulis* L. at settlement ». In : *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 49 (02), p. 327–356.
- BERNARD, I. et al. (2012). *Etude d'opérations de repeuplement orienté dans deux sites français de captage de l'huître creuse (Crassostrea gigas)*. Rapport. 51 p. Ifremer.
- CRANFIELD, H. (1973). « Observations on the behaviour of the pediveliger of *Ostrea edulis* during attachment and cementing ». In : *Marine Biology* 22 (3), p. 203–209.
- GRIZEL, H. (1985). « Etude des recentes épizooties de l'huître plate *Ostrea edulis* Linne et de leur impact sur l'ostreiculture bretonne ». Thèse de doct. Université des sciences et techniques du Languedoc.
- GUÉRIN-GANIVET, J. (1911). « Notes préliminaires sur les gisement de mollusques des côtes de France. La Rade de Brest. » In : *Bulletin de l'Institut Océanographique* 195, 16 p.
- GUYON, C. (2011). « Climat et reproduction de l'huître plate, *Ostrea edulis*, en Baie de Quiberon : 35 ans de données revisitées. » Mém.de mast. Université Pierre et Marie Curie.
- HERBERT, R. J. H. et al. (2012). « Invasion in tidal zones on complex coastlines : modelling larvae of the non-native Manila clam, *Ruditapes philippinarum*, in the UK ». In : *Journal of Biogeography* 39 (3), p. 585–599.
- KORRINGA, P. (1940). « Experiments and observations on swarming, pelagic life and setting in the european flat oyster, *Ostrea edulis* ». Thèse de doct. Amsterdam.
- LAMBERT, L. (1938). « Les gisements naturels d'huîtres indigènes (*Ostrea edulis*) et d'huîtres portugaises (*Gryphea angulata*) sur les côtes françaises ». In : *Revue des Travaux de l'Institut des Pêches Maritimes* 11, p. 465–476.
- LAZURE, P. et F. DUMAS (2008). « An external-internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS) ». In : *Advances in Water Resources* 31 (2), p. 233–250.
- MAECHLER, M., P. ROUSSEUW, A. STRUYF, M. HUBERT et K. HORNIK (2014). *cluster : Cluster Analysis Basics and Extensions*. R package version 1.15.2.
- MARTEIL, L. (1960). « Ecologie des huîtres du Morbihan *Ostrea edulis* LINNE et *Gryphaea angulata* LAMARCK ». In : *Revue des Travaux de l'Institut des Pêches Maritimes* 24 (3), p. 326–346.
- MESIAS-GANSBILLER, C., A. SILVA, V. MANEIRO, A. PAZOS, J. L. SANCHEZ et M. L. PÉREZ-PARALLÉ (2013). « Effects of chemical cues on larval settlement of the flat oyster (*Ostrea edulis* L.) : A hatchery approach ». In : *Aquaculture* 376–379, p. 85–89.
- METAXAS, A. et M. SAUNDERS (2009). « Quantifying the "bio-" components in biophysical models of larval transport in marine benthic invertebrates : advances and pitfalls ». In : *Biological Bulletin* 216 (3), p. 257–272.
- NORTH, E. W., Z. SCHLAG, R. R. HOOD, M. LI, L. ZHONG, T. GROSS et V. S. KENNEDY (2008). « Vertical swimming behavior influences the dispersal of si-

- culated oyster larvae in a coupled particle-tracking and hydrodynamic model of Chesapeake Bay ». In : *Marine Ecology Progress Series* 359, p. 99–115.
- Ó FOIGHIL, D. et D. J. TAYLOR (2000). « Evolution of parental care and ovulation behavior in oysters ». In : *Molecular phylogenetics and evolution* 15 (2), p. 301–313.
- RABY, D., Y. LAGADEUC, J. J. DODSON et M. MINGELBIER (1994). « Relationship between feeding and vertical distribution of bivalve larvae in stratified and mixed waters ». In : *Marine Ecology Progress Series* 103, p. 275–284.
- STÉPHAN, P. (2011). « Colmatage sédimentaire des marais maritimes et variations relatives du niveau marin au cours des 6 000 dernières années en rade de Brest (Finistère) ». In : *Norôis* (3), p. 9–37.
- THOMAS, Y., F. DUMAS et S. ANDRÉFOUËT (2014). « Larval Dispersal Modeling of Pearl Oyster *Pinctada margaritifera* following Realistic Environmental and Biological Forcing in Ahe Atoll Lagoon ». In : *PLoS ONE* 9 (4), e95050–.
- TRITAR, S., D. PRIEUR et R. WEINER (1992). « Effects of bacterial films on the settlement of the oysters, *Crassostrea gigas* Thunberg, 1793 and *Ostrea edulis*, Linnaeus, 1750 and the scallop *Pecten maximus* Linnaeus, 1758 ». In : *Journal of Shellfish Research* 11 (2), p. 325–330.
- WATSON, J. R., S. MITARAI, D. A. SIEGEL, J. E. CASELLE, C. DONG et J. C. MCWILLIAMS (2010). « Realized and potential larval connectivity in the Southern California Bight ». In : *Marine Ecology Progress Series* 401, p. 31–48.