AGROCAMPUS OUEST
CFR Rennes
65 rue de Saint-Brieuc
35 042 Rennes Cedex

UNIVERSITE RENNES 2
Campus Villejean
Pl. du recteur Henri Le Moal
35 043 Rennes cedex

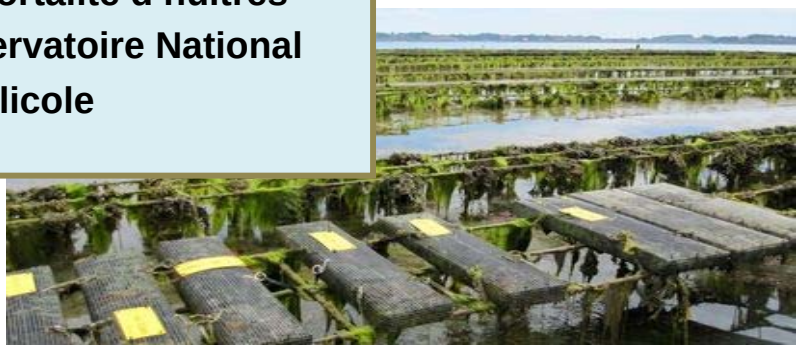
IFREMER
Station La Trinité sur Mer
12 rue des Résistants
56 470 La Trinité sur Mer

Mémoire de fin d'études

Master de l'Institut Supérieur des Sciences Agronomiques, Agroalimentaires, Horticoles et du Paysage

Année universitaire : 2011-2012
Spécialité : Statistique appliquée aux sciences agronomiques et agroalimentaires

Sujet du mémoire : Analyse statistique des données de mortalité d'huîtres acquises par l'Observatoire National Conchylicole



Par : Aude Jolivel

Maitre de stage : **Elodie FLEURY (Ifremer LER/MPL Trinité sur mer)**

☐ Bon pour dépôt (version définitive) Date :
Autorisation de diffusion : ☐ Oui ☐ Non Signature :

Devant le jury *:* Soutenu à Rennes, le 4 septembre 2012
Sous la présidence de : Jérôme Pagès (AGROCAMPUS OUEST)
Maître de stage : Elodie Fleury (IFREMER)
Enseignant référent : David Causeur (AGROCAMPUS OUEST)

"Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST"

Diffusion du mémoire

A remplir par l'auteur avec le maître de stage

Limites de la confidentialité

Mémoire de fin d'études

Consultable sur place : **x** oui o non

Reproduction autorisée : o oui **x** non

Prêt autorisé : o oui **x** non

Confidentialité absolue : o oui **x** non
(ni consultation, ni prêt)

Durée de la confidentialité : . . . . . .

Fiche de résumé du mémoire de fin d'études :

Résumé diffusable : **x** oui o non

Fait à : . . . . . La Trinité sur mer. . . . . **Le** : . . . . . .18/07/2012 . . . . . .

Le Maître de stage :
Signature et cachet de l'entreprise
Elodie FLEURY

Ifremer
LER / MPL
STATION DE LA TRINITÉ SUR MER

L'auteur :

Remerciements

Je tiens particulièrement à remercier ma maître de stage, Elodie Fleury, qui m’a fait confiance et apporté ses conseils tout au long de la rédaction de ce rapport. Merci pour son accueil, sa disponibilité et son enthousiasme, qui ont contribués à faire de ce stage une expérience très positive.

Un grand merci également à Aimé Langlade qui m’a fait partager son expérience, ses sorties en mer et qui m’a emmenée sur le terrain par tous les temps : j’ai découvert et adoré ! Merci de même à Jean-François Bouget avec qui j’ai fait de nombreuses marées.

Je remercie aussi Julien Normand, qui m’a guidée dans la compréhension des données, pour sa disponibilité et ses avis constructifs, Nathalie Cochennec-Laureau qui par sa connaissance du sujet m’a aidée à mieux comprendre le phénomène des mortalités, Jean-Yves Stanisière, qui a pris le temps de m’expliquer son travail et de s’intéresser au mien, Edouard Bédier, chef de station, qui est resté disponible pour répondre à mes questions.

Merci enfin à toute l’équipe de la station pour leur accueil chaleureux ainsi qu'a toutes les personnes qui ont contribué à faire de ce stage une expérience très enrichissante, tant sur le plan professionnel qu'humain.

Sommaire

1 Introduction 2
1.1 L'institut 2
1.2 Contexte et problématique 3
1.2.1 L'huître creuse 3
1.2.2 Apparition des mortalités estivales chez l'huître adulte 3
1.2.3 Depuis 2008 : surmortalités chez le naissain 4
2 Matériel et méthodes 8
2.1 Protocole de l'Observatoire Conchylicole National 8
2.1.1 Sites étudiés 8
2.1.2 Types de lots suivis 9
2.1.3 Fréquence des suivis 11
2.2 Variables mesurées lors du suivi 12
2.2.1 Mortalité 12
2.2.2 Croissance 12
2.2.3 Agents infectieux 13
2.2.4 Paramètres environnementaux 13
2.3 Mise en forme des données 15
2.4 Logiciels utilisés 16
3 Résultats 18
3.1 Caractéristiques des mortalités 18
3.1.1 Cinétiques et mortalité cumulée 18
3.1.2 Description des pics 21
3.2 Etude des facteurs influençant la mortalité 24
3.2.1 Relation entre mortalité et température 24
3.2.2 Facteurs biologiques et environnementaux impliqués dans le phénomène de mortalité et déterminant l'apparition des pics de mortalité 26
4 Discussion 32

ANNEXE I : Organigramme 37
ANNEXE II : Courbes de mortalité instantanée et cumulée 38
ANNEXE III : Description des pics (résultats de l'AFM) 40
ANNEXE IV : Modèle Mortalité - Température 44
ANNEXE V : Modèle de Cox 46
ANNEXE VI : Modèles étudiés 48
ANNEXE VI : Modèles étudiés 49
ANNEXE VII : Comparaison inter-poches des cinétiques de mortalité 53
ANNEXE VIII : Test de l'influence du comptage régulier des huîtres sur la mortalité 56

Table des illustrations

Figure 1 : Répartition des sites IFREMER en métropole 2
Figure 3 : Interactions entre huître, environnement et pathogènes (Sniesko, 1974) 4
Figure 4 : Sites suivis par l'Observatoire Conchylicole 8
Figure 5 : Poches sur tables ostréicoles d'un site-atelier 9
Figure 6 : Huîtres 18 mois et naissain 10
Figure 7 : Fréquence des suivis sur l'ensemble des sites-ateliers 11
Figure 8 : Suivi des poches de naissain 11
Figure 9 : Comptages et mortalité du naissain 12
Figure 10 : Biométries en laboratoire 13
Figure 11 : Sonde salinité température haute fréquence et sonde Smatch 14

Table des tableaux

Tableau 1 : Descriptif des lots suivis de 2009 à 2011 9
Tableau 2 : Description des jeux de données 16
Tableau 3 : Variables étudiées 28
Tableau 4 : Disponibilité des variables dans les sites suivis par l'Observatoire 28
Tableau 5 : Modèles testés 29
Tableau 6 : Résultats des modèles : variables significatives 29

Table des graphiques

Graphique 1 : Evolution du taux de mortalité moyen du naissain de captage Arcachon depuis 1995 sur les sites de l'Observatoire (données 1995-2008 issues du réseau REMORA).....5
Graphique 2 : Mortalité instantanée et cumulée – Naissain 2N, CNAR, Année 2011.....19
Graphique 3 : Evolution de la mortalité cumulée finale par année et par site.....19
Graphique 4 : Evolution de la mortalité cumulée finale par année et par site.....19
Graphique 5 : Description des différentes phases de mortalité.....20
Graphique 6 : Nombre de jours avant apparition du premier pic de mortalité selon les années (tous sites et lots confondus).....20
Graphique 7 : Variables descriptives des pics 21
Graphique 8 : Nuage des individus, plan 1-2 de l'AFM 22
Graphique 9 : Cercle de corrélation des variables, plan 1-2 de l'AFM 22
Graphique 10 : Relation entre passage des 16°C et mortalité 24
Graphique 11 : Températures centrées réduites 45 jours avant le premier pic de mortalité..25
Graphique 12 : Relation entre mortalité et moyenne et variance de la température.....25
Graphique 13 : Relation entre température et mortalité : cartographie des températures à risque.....26

1. Introduction

1 Introduction

1.1 L'institut

L'Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (IFREMER) dirigé par Jean-Yves Perrot est un **établissement public** sous la tutelle :

- Du ministère de l'Écologie
- Du ministère de l'Agriculture
- Et du ministère de l'enseignement supérieur et de la Recherche.

Il est composé de **5 centres** : Boulogne, Brest, Nantes, Toulon, Tahiti (auxquels sont rattachées des stations) et d'un siège social : Issy-les-Moulineaux. Il est présent dans **26 sites** répartis sur l'ensemble du littoral métropolitain et dans les DOM-TOM (Figure 1).

Station de la Trinité-sur-Mer

Figure 1 : Répartition des sites IFREMER en métropole

L'IFREMER contribue, par ses travaux et expertises, à la **connaissance des océans et de leurs ressources**, à la **surveillance du milieu marin et du littoral** et au **développement durable des activités maritimes**. À ces fins, il conçoit et met en œuvre des outils d'observation, d'expérimentation et de surveillance, et gère des bases de données océanographiques. Il est également responsable d'une part très importante de la flotte océanographique. L'IFREMER travaille en réseau avec la communauté scientifique française, mais aussi avec des organismes partenaires dans de nombreux pays.

J'ai effectué mon stage au sein du **laboratoire Environnement Ressources** basé dans la **station de La Trinité-sur-Mer** (Organigramme en ANNEXE 1). Plus particulièrement, j'ai intégré l'équipe de **l'Observatoire Conchylicole**.

1.2 Contexte et problématique

1.2.1 L'huître creuse

L'huître creuse ***Crassostrea Gigas*** (ou huître japonaise, Figure 2) est cultivée en France depuis les années 70. Elle a été importée pour répondre à la crise traversée par le secteur ostréicole suite à la disparition de l'huître portugaise *Crassostrea Angulata*, décimée par des épizooties[1]. Depuis cette date, la culture de l'huître *Crassostrea Gigas* a connu une expansion rapide.

Figure 2 : Huître creuse *Crassostrea Gigas*

La production de *C. Gigas* atteint aujourd'hui 4,4 millions de tonnes dans le monde, soit une valeur marchande de 3,22 milliards de dollars (les principaux pays producteurs sont la Chine, le Japon, la Corée et la France) (source FAO, 2007). Cette espèce représente 93% du marché ostréicole mondial et 98% du marché français. En France, où l'ostréiculture constitue 65% de la production conchylicole (**130 000 tonnes par an**, un chiffre d'affaire de 630 millions d'euros et plus de 2600 entreprises), la production de *C. Gigas* représente un enjeu socio-économique majeur (Site web du comité national de la conchyliculture : http://www.cnc-france.com). La compréhension biologique des crises de mortalité estivales qui ont récemment touché cette espèce et affecté l'ensemble de la filière (écloseurs, naisseurs, éleveurs…) est donc indispensable.

1.2.2 Apparition des mortalités estivales chez l'huître adulte

En France, les premières mortalités estivales d'huîtres *C.Gigas* ont été observées à partir de 1976 chez les huîtres adultes. Cependant, les causes responsables de ces mortalités demeuraient assez mal connues jusqu'à ces dernières années.

Par conséquent, l'IFREMER a initié en 2001, un programme multidisciplinaire nommé **MOREST** (Mortalités Estivales chez l'huître creuse *C. Gigas*) dont l'issue, en 2005, a permis de mettre en évidence plusieurs facteurs à risques tels que :

- Le statut de l'huître (âge, physiologie, nutrition, facteurs génétiques…)
- L'environnement (température, salinité, pollution, disponibilité trophique…)
- Les pathogènes (virus, bactéries)

Le diagramme de Sniesko (Figure 3), montre que ces facteurs n'interviennent pas toujours seuls et que leur combinaison peut avoir un effet aggravant (par exemple, une huître

[1] Maladie frappant, dans une région plus ou moins vaste, une espèce animale dans son ensemble.

génétiquement peu résistante sera encore plus vulnérable si le milieu est pollué). Les mortalités résultent donc en partie de leurs interactions.

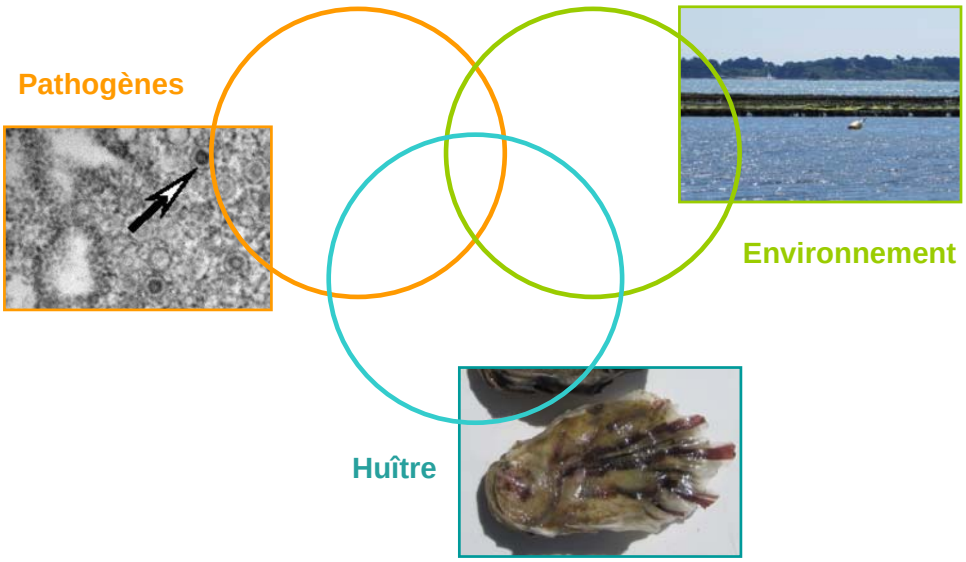


Figure 3 : Interactions entre huître, environnement et pathogènes (Sniesko, 1974)

Parallèlement au programme MOREST, des réseaux de surveillance existaient au sein de l'IFREMER :

- **Le réseau REMORA** (Réseau Mollusques des Rendements Aquacoles) qui permet un suivi des performances d'élevage (croissance, mortalité) de différents lots d'huîtres creuses.

- **Le réseau REPAMO** (Réseau de Pathologie des Mollusques), qui surveille l'état de santé des mollusques du littoral français métropolitain.

1.2.3 Depuis 2008 : surmortalités chez le naissain

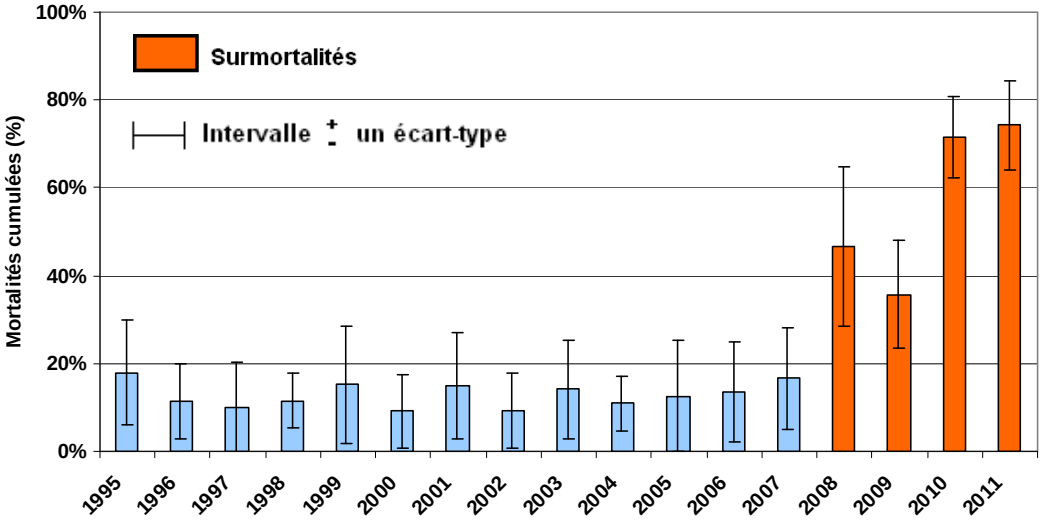
Depuis 2008, la filière ostréicole française doit faire face à des **surmortalités exceptionnelles** (aggravation par rapport à celles étudiées lors du programme MOREST) touchant les naissains[2] d'huîtres creuses *C. Gigas*. Elles sont aujourd'hui comprises entre **60 et 80%** sur l'ensemble des bassins conchylicoles du littoral français contre moins de 20% avant 2008 (Graphique 1).

Face à l'évolution constante de ce phénomène de mortalité, il est apparu indispensable de pouvoir disposer de séries temporelles relatives à la survie et à la croissance des huîtres en élevage dans les divers environnements conchylicoles mais aussi des paramètres environnementaux qui leurs sont associés. Pour cela, l'Ifremer met en œuvre depuis 2009 un **Observatoire Conchylicole**.

[2] Larves

L'Observatoire Conchylicole diffuse les courbes de mortalité et de croissance de lots d'huîtres sentinelles en temps quasi réel (http://wwz.ifremer.fr/observatoire_conchylicole) et émet des bulletins d'information bimensuels. Il permet une détection rapide des épisodes de mortalité anormale et bancarise en complément des données environnementales.

L'objectif principal de mon stage est **d'analyser les données acquises par l'Observatoire Conchylicole de 2009 à 2011 afin d'identifier les différents facteurs impliqués dans le phénomène des mortalités**.



Graphique 1 : Evolution du taux de mortalité moyen du naissain de captage Arcachon depuis 1995 sur les sites de l'Observatoire (données 1995-2008 issues du réseau REMORA)

Les données recueillies par l'Observatoire Conchylicole sont de deux types : biologiques (mortalité, croissance des huîtres) et physico-chimiques (température de l'eau, salinité, pression). Elles sont mesurées dans différents sites et sur plusieurs lots d'huîtres. De plus, elles peuvent être mises en relation avec des données de phytoplancton et des données de virus, provenant d'autres sources.

Dans un premier temps, mon travail a donc consisté à créer une base de données rassemblant les informations biologiques et environnementales disponibles sur la période étudiée, pour l'ensemble des sites et des lots.

A partir de cette base, j'ai pu caractériser les cinétiques de mortalité par leur intensité, les différentes phases qu'elles traversent et leur dynamique spatio-temporelle. J'ai ensuite mis en place des modèles statistiques permettant d'expliquer la mortalité par les facteurs biologiques et environnementaux dont nous disposions afin de retenir les plus impliqués dans le phénomène des mortalités.

La dernière partie de ce stage s'est intéressée au protocole de recueil des données afin d'y d'apporter des suggestions pour les années à venir.

2. Matériel et méthodes

2 Matériel et méthodes

2.1 Protocole de l'Observatoire Conchylicole National

2.1.1 Sites étudiés

L'acquisition des données biologiques et environnementales de l'Observatoire Conchylicole s'effectue sur **13 sites-ateliers** (Figure 4) qui ont été sélectionnés parmi les 43 stations suivies dans le réseau REMORA (permettant ainsi de continuer les séries historiques acquises dans le cadre de ce réseau).

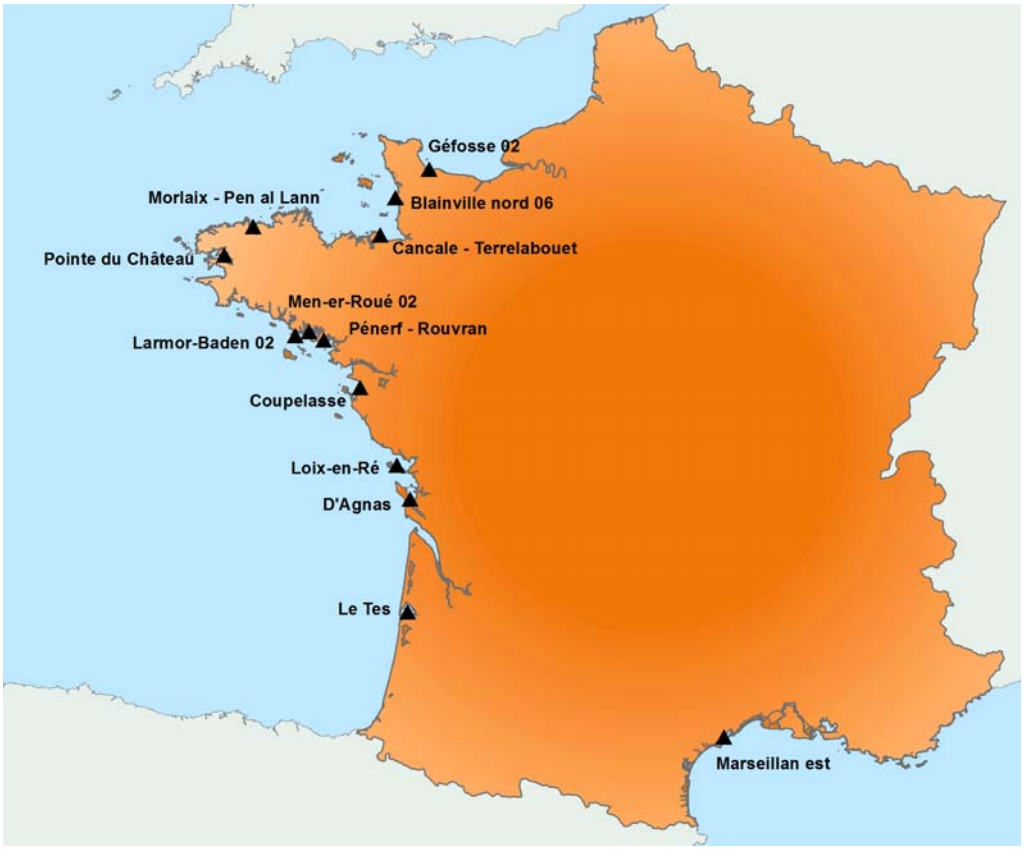


Figure 4 : Sites suivis par l'Observatoire Conchylicole

Les 13 sites-ateliers sont répartis le long des 3 façades littorales françaises, et ont été choisis dans les principaux bassins producteurs d'huîtres creuses. Parmi eux, deux sites se situent en eau profonde (non découvrants à marée basse) : le site de "Men Er Roué" en baie de Quiberon, et celui de "Marseillan est" sur l'étang de Thau. Dans ce rapport, nous ne prendrons pas en compte le site situé en méditerranée, celui-ci étant trop spécifique. Un rapport le concernant a d'ailleurs déjà été rédigé (F Pernet et al., 2011) ainsi que plus récemment un article (F Pernet et al., 2012).

2.1.2 Types de lots suivis

Un des objectifs de l'Observatoire Conchylicole est de prendre en compte la variabilité des cheptels utilisés par la filière conchylicole française. Pour cela, des lots sentinelles d'huîtres creuses de plusieurs classes d'âges, origines et ploïdies[3] ont été suivis chaque année sur les différents sites. On retrouve ainsi à chaque fois :

- un lot d'huîtres **diploïdes (2N) adultes (de 18 mois)** issues de captage naturel
- un ou plusieurs lots de **naissain diploïde (2N)** issus de captage naturel
- un ou plusieurs lots de **naissain triploïde (3N)** provenant d'écloserie

Trois poches de chaque lot sont préparées pour chacun des sites au laboratoire de La Trinité sur Mer puis positionnées simultanément sur les sites-ateliers (Figure 5) par les équipes des différents laboratoires côtiers. Une poche contient environ **300 huîtres** au début des suivis.

Figure 5 : Poches sur tables ostréicoles d'un site-atelier

La répartition des lots suivis chaque année est décrite par le tableau suivant :

Année	Adultes 2N	Naissain 2N captage naturel		Naissain 3N Ecloserie			Origine
		CNAR	CNMO	ETA	ETB	ETM	Captage
2009	✓	✓				✓	
2010	✓	✓		✓	✓		
2011	✓	✓	✓	✓			

Tableau 1 : Descriptif des lots suivis de 2009 à 2011

Les lots peuvent être issus de captage naturel (CN) ou provenir d'Ecloserie (ET). Ici, les lots issus de captage naturel ont été captés à Arcachon (CNAR) ou Marennes-Oléron (CNMO) et les lots d'écloserie proviennent de l'écloserie A (ETA), de l'écloserie B (ETB) ou d'un mélange d'écloseries (ETM). Dans la suite du rapport, nous utiliserons ces abréviations afin d'éviter toute confusion entre la provenance des lots et les sites sur lesquels ils sont

[3] La ploïdie caractérise le nombre d'exemplaires de chromosomes : une huître est **diploïde** si elle possède **2*n*** chromosomes organisés en *n* paires, **triploïde** si elle possède **3*n*** chromosomes. NB : Les huîtres triploïdes sont stériles.

positionnés.
Les seuls lots suivis sur plusieurs années consécutives (en orange dans le Tableau 1) sont les huîtres adultes, le naissain provenant d'Arcachon (suivis de 2009 à 2011) et celui provenant de l'écloserie A (suivi en 2010 et 2011). Les autres provenances n'ont été suivies que ponctuellement.

Les huîtres adultes ont des caractéristiques très différentes du naissain (Figure 6) et sont désormais très peu touchées par les épisodes de mortalité. Dans ce stage, nous nous intéresserons donc **seulement à l'étude des lots de naissain**.

Figure 6 : Huîtres 18 mois et naissain

La mise à l'eau des différents lots se fait entre les mois d'avril et de mai (date qui varie en fonction des années, des sites et des lots).

2.1.3 Fréquence des suivis

Chaque année, la fréquence de suivi des lots (Figure 7) est définie selon un calendrier commun aux différents sites de l'Observatoire. Le calendrier tient compte des périodes « à risque » pour les mortalités identifiées lors des années précédentes, notamment du passage de la température au dessus de 16°C, considéré comme indicateur du début des périodes à risques (N Cochennec-Laureau, 2010).

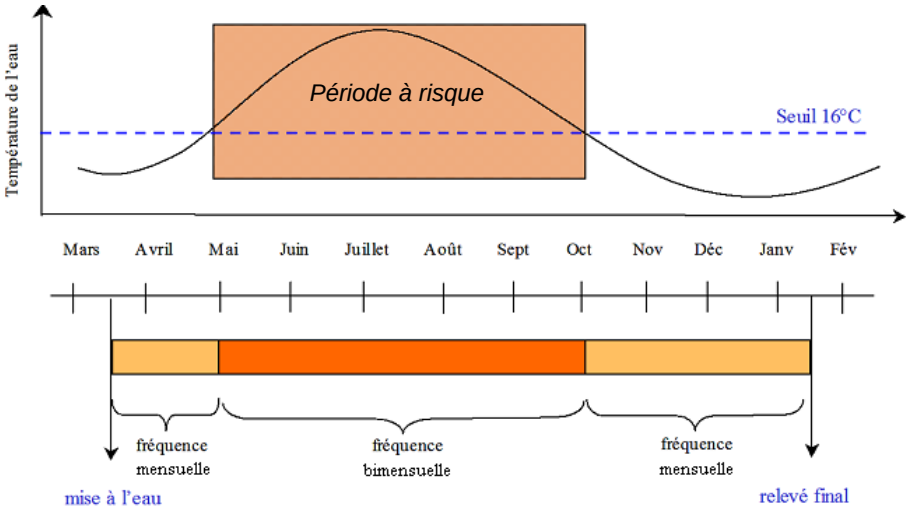


Figure 7 : Fréquence des suivis sur l'ensemble des sites-ateliers

En pratique, les suivis s'échelonnent du mois d'avril au mois de janvier selon une **fréquence mensuelle, et bimensuelle** sur la quasi-totalité des sites entre les mois de mai et octobre (période à risque). En 2009 et 2010 il y a eu entre 13 et 14 passages sur chaque site, en 2011 entre 14 et 15.

Seule une **poche (la poche 1)** de chaque lot de naissain est **suivie à chaque passage sur site**, les autres sont comptées en début et fin de suivi et des prélèvements sont parfois effectués dans la poche 2 (Figure 8).

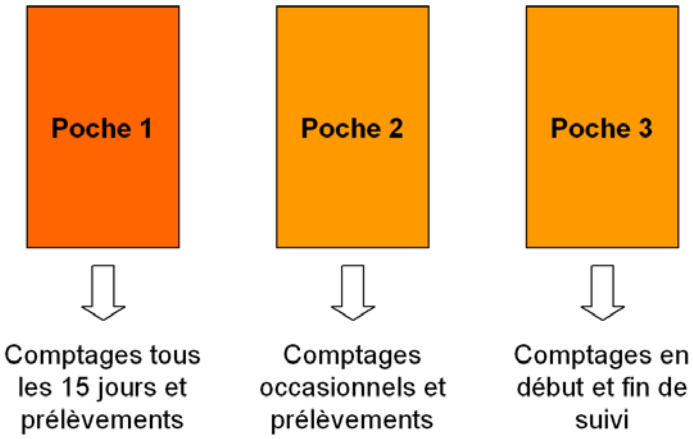


Figure 8 : Suivi des poches de naissain

2.2 Variables mesurées lors du suivi

2.2.1 Mortalité

Le suivi d'une poche consiste entre autres, à compter à chaque passage le nombre d'huîtres mortes et le nombre d'huîtres vivantes dans la poche 1 des lots de naissain (Figure 9).

Figure 9 : Comptages et mortalité du naissain

Ces dénombrements permettent de déterminer, pour chaque lot, deux taux de mortalité :

- le taux de **mortalité instantanée** (MI), constaté au temps (au passage) t :

$$\text{Mortalité instantanée}_{(t)} = \frac{\text{Nombre mortes}_{(t)}}{\text{Nombre mortes}_{(t)} + \text{Nombre vivantes}_{(t)}} = MI_{(t)}$$

- le taux de **mortalité cumulée** (MC) au temps t :

$$\text{Mortalité cumulée}_{(t)} = 1 - [\,(1 - MC_{(t-1)}) \times (1 - MI_{(t)})\,] = MC_{(t)}$$

La mortalité cumulée au début du suivi (t=0) est égale à la mortalité instantanée.

La mortalité cumulée est calculée à partir de la mortalité instantanée car cette formule permet de s'affranchir du nombre d'individus prélevés (pour analyses de virus notamment).

2.2.2 Croissance

La croissance et les paramètres biométriques des lots de naissain sont évalués à partir de mesures effectuées sur un échantillon de 10 individus par poche (30 individus en tout).

La longueur de la coquille est mesurée à l'aide d'un pied à coulisse. La masse de l'individu entier, de la coquille vide, et de la chair totale humide sont également mesurées à l'aide d'une balance de précision (Figure 10).

Ces mesures sont réalisées uniquement en début et fin de la période de suivi. En effet, les forts taux de mortalité observés sur certains sites empêchent la réalisation de biométries plus fréquentes, du fait du faible nombre d'individus survivants. De plus, la petite taille des individus lors de la mise à l'eau limite le nombre de paramètres mesurables.

Figure 10 : Biométries en laboratoire

Le **poids moyen** des individus de chaque lot de naissain est donc estimé, à chaque passage, à partir du poids total des individus vivants mesuré sur le terrain (à l'aide d'un peson) et du nombre d'individus vivants selon la formule :

$$\text{Poids moyen}_{\text{(lot naissain A)}} = \frac{\text{Poids total vivantes}_{\text{(lot naissain A)}}}{\text{Nombre vivantes}_{\text{(lot naissain A)}}}$$

2.2.3 Agents infectieux

Les lots suivis par l'Observatoire Conchylicole ont fait l'objet d'analyses pathologiques réalisées par des laboratoires départementaux. Elles ont pour but de rechercher les agents infectieux : Herpèsvirus (OsHV-1), *Vibrio splendidus* et *Vibrio aestuarianus,* car ce sont les agents infectieux les plus fréquemment associés aux mortalités (B. Guichard, 2010). En cas de présence d'un agent infectieux, l'analyse détermine sa fréquence de détection (en pourcentage) parmi les individus analysés (en général 12 individus par site pour OsHV-1 et 4 individus par site pour *Vibrio splendidus* et *Vibrio aestuarianus*).

Les analyses pathologiques sont effectuées avant la mise à l'eau des lots sur les différents sites et après chaque épisode de mortalités anormales (plus de 15% de mortalité sur le lot entre deux passages). Chaque année, les lots sont donc analysés une fois avant le début du suivi, puis, en fonction du nombre de pics de mortalité dans les différents sites, une à deux fois au cours du suivi (sauf en 2009, année pour laquelle dans chaque site, seul le premier lot touché par les mortalités à été analysé).

2.2.4 Paramètres environnementaux

Plusieurs types de paramètres environnementaux sont mesurés :

- Les paramètres **physicochimiques : température, salinité et pression** sont recueillis sur la plupart des sites à partir des sondes hautes fréquences installées au niveau des poches ou de la sonde Smatch la plus proche (Figure 11). Les sondes Smatch permettent une émission en temps réel et en continu des données. Les données émises par les sondes SMATCH sont consultables sur le site : http://www.ifremer.fr/co-en/eulerianNetwork?contextId=592&lang=en.

- Les paramètres concernant le **phytoplancton** : le développement spatio-temporel des espèces de phytoplancton est suivi dans le cadre du REPHY (Réseau de suivi du phytoplancton, site web : http://www.ifremer.fr/lerlr/surveillance/rephy.htm). Nous disposons donc de ces informations (à une fréquence bimensuelle) pour les sites de l'Observatoire situés proche d'un point REPHY (Géfosse 02, Pointe du Château, Men-er-Roué 02, Pénerf-Rouvran, Coupelasse, D'Agnas et Le Tes). Dans le cadre de ce stage, nous utiliserons principalement la Chlorophylle a et les phéopigments.

Figure 11 : Sonde salinité température haute fréquence et sonde Smatch

Les données collectées au cours du suivi sont saisies dans l'outil de stockage des données Quadrige², qui stocke les données issues de l'ensemble des réseaux de surveillance de l'IFREMER.

2.3 Mise en forme des données

Avant de débuter l'analyse statistique des données, la première étape a consisté à **mettre en place une base de données comprenant l'ensemble des informations collectées lors des suivis**. Cette étape a été nécessaire, du fait de la diversité des données à rassembler (environnementales, biologiques…) et de leurs différents formats (extractions Quadrige², fichiers résultats des sondes…).

Les variations dans les fréquences d'obtention des données (suivi mensuel à bimensuel pour les comptages de mortalité, suivi toutes les 15 à 30 minutes pour les paramètres physicochimiques mesurés par sonde, suivi bimensuel pour les données de phytoplancton) mais aussi les variations des pas de temps entre les mesures nous ont conduit à mettre en place trois jeux de données différents :

- Un jeu de données : **1 ligne = 1 poche** (pour un site, un passage et un lot)

LieuOC	AnneesOC	DatePassageOC	AgePop	OriginePop	Captage	Poche	NbMort	NbViv	TotVivPoids	TotVivPoidsIndiv	MInstant	MCumul
Géfosse 02	2009	08/04/2009	Naissain	Captage naturel	Arcachon	1	8	298	700	2,348993289	2,614379085	2,614379085
Géfosse 02	2009	08/04/2009	Naissain	Captage naturel	Arcachon	3	9	298	710	2,382550336	2,931596091	2,931596091
Géfosse 02	2009	08/04/2009	Naissain	Captage naturel	Arcachon	2	6	298	690	2,315436242	1,973684211	1,973684211
Géfosse 02	2009	06/05/2009	Naissain	Captage naturel	Arcachon	1	3	290	1240	4,275862069	1,023890785	3,611501483
Géfosse 02	2009	08/06/2009	Naissain	Captage naturel	Arcachon	1	0	287	3160	11,01045296	0	3,611501483
Géfosse 02	2009	22/06/2009	Naissain	Captage naturel	Arcachon	1	27	230	3300	14,34782609	10,50583658	13,73791962
Géfosse 02	2009	22/06/2009	Naissain	Captage naturel	Arcachon	3	12	263			4,363636364	7,167308262
Géfosse 02	2009	22/06/2009	Naissain	Captage naturel	Arcachon	2	41	215			16,015625	17,67321135
Géfosse 02	2009	07/07/2009	Naissain	Captage naturel	Arcachon	1	15	185	3800	20,54054054	7,5	20,20757564
Géfosse 02	2009	21/07/2009	Naissain	Captage naturel	Arcachon	1	3	182	4700	25,82417582	1,621621622	21,50150685
Géfosse 02	2009	06/08/2009	Naissain	Captage naturel	Arcachon	1	7	175	5400	30,85714286	3,846153846	24,52067966
Géfosse 02	2009	19/08/2009	Naissain	Captage naturel	Arcachon	1	1	174	6000	34,48275862	0,571428571	24,95199007
Géfosse 02	2009	04/09/2009	Naissain	Captage naturel	Arcachon	1	0	174	6800	39,08045977	0	24,95199007
Géfosse 02	2009	17/09/2009	Naissain	Captage naturel	Arcachon	1	0	173	7000	40,46242775	0	24,95199007
Géfosse 02	2009	06/10/2009	Naissain	Captage naturel	Arcachon	1	0	141	6520	46,24113475	0	24,95199007
Géfosse 02	2009	21/10/2009	Naissain	Captage naturel	Arcachon	1	0	141	6900	48,93617021	0	24,95199007
Géfosse 02	2009	03/12/2009	Naissain	Captage naturel	Arcachon	1	0	141	7880	55,88652482	0	24,95199007
Géfosse 02	2009	13/04/2010	Naissain	Captage naturel	Arcachon	1	0	140			0	24,95199007
Géfosse 02	2009	08/04/2009	Naissain	Ecloserie	Mélange	1	0	471	300	0,636942675	0	0
Géfosse 02	2009	08/04/2009	Naissain	Ecloserie	Mélange	3	0	471	300	0,636942675	0	0
Géfosse 02	2009	08/04/2009	Naissain	Ecloserie	Mélange	2	3	471	290	0,615711253	0,632911392	0,632911392
Géfosse 02	2009	06/05/2009	Naissain	Ecloserie	Mélange	1	1	470	700	1,489361702	0,212314225	0,212314225

- Un jeu de données : **1 ligne = 1 passage** (pour un site, une année et un lot)

LieuOC	AnneesOC	DatePassageOC	AgePop	OriginePop	Captage	NbMort	NbViv	TotVivPoids	TotVivPoidsIndiv	MCumul	MInstant	Chloroa	Salinite	Pheo	Mo
Géfosse 02	2011	06/07/2011	Naissain	Captage naturel	Marennes-Olér	12	176	500	2,840909091	49,79170422	6,382978723	1,99	33,8	0,37	
Géfosse 02	2011	18/07/2011	Naissain	Captage naturel	Marennes-Olér	9	159	900	5,660377358	52,48143435	5,357142857	1,82	33,7	0,25	
Géfosse 02	2011	04/08/2011	Naissain	Captage naturel	Marennes-Olér	13	141	1500	10,63829787	56,49274184	8,441558442	1,13	33,5	0,05	
Géfosse 02	2011	18/08/2011	Naissain	Captage naturel	Marennes-Olér	13	129	1600	12,40310078	60,47580068	9,154929577	1,73	33,3	0,33	
Géfosse 02	2011	28/08/2011	Naissain	Captage naturel	Marennes-Olér	0	130	2100	16,15384615	60,47580068	0	2,39	33,6	0,4	
Géfosse 02	2011	12/09/2011	Naissain	Captage naturel	Marennes-Olér	1	130	2700	20,76923077	60,77751213	0,763358779	2,81	33,7	0,41	
Géfosse 02	2011	26/09/2011	Naissain	Captage naturel	Marennes-Olér	0	130	3000	23,07692308	60,77751213	0	2,67	33,8	0,23	
Géfosse 02	2011	25/10/2011	Naissain	Captage naturel	Marennes-Olér	0	129	3900	30,23255814	60,77751213	0	0,64	33,8	0,53	
Géfosse 02	2011	24/11/2011	Naissain	Captage naturel	Marennes-Olér	0	130	4200	32,30769231	60,77751213	0	0,43	34,6	0,25	
Géfosse 02	2009	08/04/2009	Naissain	Captage naturel	Arcachon	8	298	700	2,348993289	2,614379085	2,614379085	3,43	32,94	0,05	
Géfosse 02	2009	06/05/2009	Naissain	Captage naturel	Arcachon	3	290	1240	4,275862069	3,611501483	1,023890785	7,67	33,11	2,96	
Géfosse 02	2009	08/06/2009	Naissain	Captage naturel	Arcachon	0	287	3160	11,01045296	3,611501483	0	9,11	33,09	0,17	
Géfosse 02	2009	22/06/2009	Naissain	Captage naturel	Arcachon	27	230	3300	14,34782609	13,73791962	10,50583658	6,12	33,23	0,05	
Géfosse 02	2009	07/07/2009	Naissain	Captage naturel	Arcachon	15	185	3800	20,54054054	20,20757564	7,5	5,33	33,62	0,05	

- Un jeu de données : **1 ligne = 1 an** (pour un site et un lot)

LieuOC	Annees	AgePop	OriginePop	Captage	TotVivPoid	TotVivPoidsIndi	MCumul	DatePic1	DureePic1	MTotPic1	MIMaxPic1	NbPics	ChloaAirePOF	Cl
Coupelasse	2009	Naissain	Captage naturel	Arcachon	3600	27,90697674	47,91699302	24/06/2009	29	33,63636364	33,63636364	1	420,745	
Coupelasse	2009	Naissain	Ecloserie	Mélange	2100	23,07692308	72,65903204	26/05/2009	57	65,16853933	50,52631579	1	420,745	
Coupelasse	2010	Naissain	Captage naturel	Arcachon	1940	19,4	73,20341443	15/06/2010	47	64,41906874	48,55875831	2	251,44	
Coupelasse	2010	Naissain	Ecloserie	ETA	2312	15,837414	58,43583937	14/06/2010	18	25,12820513	25,12820513	3	143,64	
Coupelasse	2010	Naissain	Ecloserie	ETB	1810	17,251832	68,53464097	14/06/2010	32	62,59541985	56,23409669	1	143,64	
Coupelasse	2011	Naissain	Captage naturel	Arcachon	1270	20,15873016	80,43478261	05/05/2011	56	74,8447205	49,06832298	1	112,795	
Coupelasse	2011	Naissain	Captage naturel	Marennes-Oléron	2310	15,60810811	58,06887568	18/05/2011	13	29,46428571	29,46428571	2	112,795	
Coupelasse	2011	Naissain	Ecloserie	ETA	5600	28,86597938	43,33712885	05/05/2011	28	35,92814371	28,29581994	1	112,795	
D'Agnas 03	2009	Naissain	Captage naturel	Arcachon	7000	37,23404255	30,56312417	27/05/2009	48	24,07407407	9,259259259	1	239,615	
D'Agnas 03	2009	Naissain	Ecloserie	Mélange	2900	43,93939394	71,83887221	27/05/2009	64	64,38679245	52,83018868	1	239,615	
D'Agnas 03	2010	Naissain	Captage naturel	Arcachon	2200	26,19047619	75,31203895	14/06/2010	34	69,76127321	66,84350133	1	193,89	
D'Agnas 03	2010	Naissain	Ecloserie	ETA	3200	29,62962963	64,77484529	14/06/2010	20	32,59493671	32,59493671	2	67,965	
D'Agnas 03	2010	Naissain	Ecloserie	ETB	3450	28,99159664	68,36065572	14/06/2010	48	64,43298969	55,15463918	1	67,965	
D'Agnas 03	2011	Naissain	Captage naturel	Arcachon	1490	29,21568627	81,46031582	16/05/2011	42	74,91039427	68,45878136	2	305,39	
D'Agnas 03	2011	Naissain	Captage naturel	Marennes-Oléron	1300	22,80701754	83,94896676	16/05/2011	42	78	64	2	305,39	

Nous disposons donc de données à trois échelles différentes : la poche, le passage et l'année (Tableau 2).

Jeu de données	Individu	Nombre d'individus
Données par poche	Une poche pour un site, un passage et un lot donnés	2003
Données par passage	Un passage pour un site, une année et un lot donnés	1264
Données par an	Une année pour un site et un lot donnés	96

Tableau 2 : Description des jeux de données

Nous avons ainsi pu calculer des indicateurs environnementaux appropriés pour chacun des jeux de données (par exemple, dans le jeu de données par passage, la variable « chlorophylle *a* » correspond au taux de chlorophylle *a* au passage. Dans le jeu de données annuel la variable « chlorophylle *a* » correspond par contre à la somme de chlorophylle *a* mesurée dans le site sur une période). Les variables retenues dans les différentes bases de données seront détaillées dans le rapport au fur et à mesure des analyses réalisées (à titre indicatif, il y a entre 20 et 30 variables par jeu de données).

Des analyses descriptives sur les jeux de données ainsi obtenus ont permis de détecter et corriger (voire supprimer) les valeurs aberrantes (liées à la saisie dans la base de données, au dysfonctionnement des sondes, …). Une imputation des valeurs manquantes a également été effectuée : ainsi, les poids manquants à un passage on été estimés à l'aide d'une régression linéaire en fonction des poids aux passages précédents et suivants, les rares autres valeurs manquantes ont été imputées par la moyenne.

2.4 Logiciels utilisés

Les analyses statistiques présentées dans ce rapport ont été réalisées sous R (versions 2.12.2 à 2.14.2) et SAS (version 9.1).

3. Résultats

3 Résultats

L'analyse des données de l'Observatoire Conchylicole comprend deux parties. La première vise à caractériser l'apparition et l'évolution des mortalités chez les différents lots de naissain selon les années et les lots. La seconde a pour but de hiérarchiser l'influence des facteurs biologiques et environnementaux impliqués dans ces mortalités.

3.1 Caractéristiques des mortalités

L'étude des caractéristiques de la mortalité est une étape qui a pour but :

- **De comparer les cinétiques de mortalité** selon les années, les lots et les sites mais aussi de mettre en évidence l'impact de ces critères, à savoir : Les mortalités ont-elles la même importance tous les ans ? Y a-t-il des lots et des sites plus touchés que les autres ?

- **De décrire le mécanisme de déclenchement des mortalités** : A quelle période apparaît le premier pic de mortalité? Cela dépend-il des années, des sites ou encore des lots ?

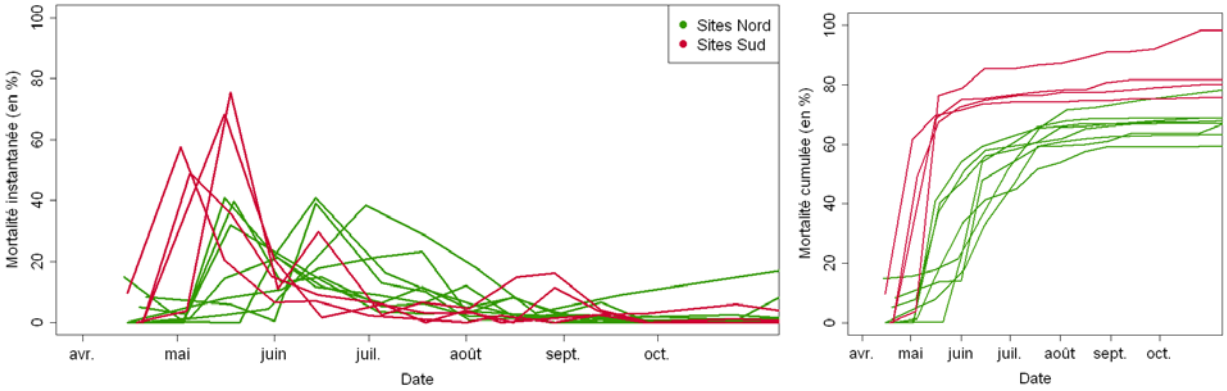
- **De comprendre les liens entre les différents pics de mortalité** : Peut-on dire que plus le pic a lieu tôt plus il est fort ? Le nombre de pics est-il lié à l'intensité du premier pic ?

- **D'étudier l'impact des caractéristiques des pics sur la mortalité** : Le nombre de pics est-il lié à l'intensité de la mortalité ?

Dans un premier temps, nous nous appuierons sur les courbes de mortalité instantanées et cumulées pour décrire le phénomène des mortalités, puis, grâce à une analyse factorielle nous étudierons les sites, les années et les lots du point de vue des caractéristiques de leurs cinétiques de mortalité.

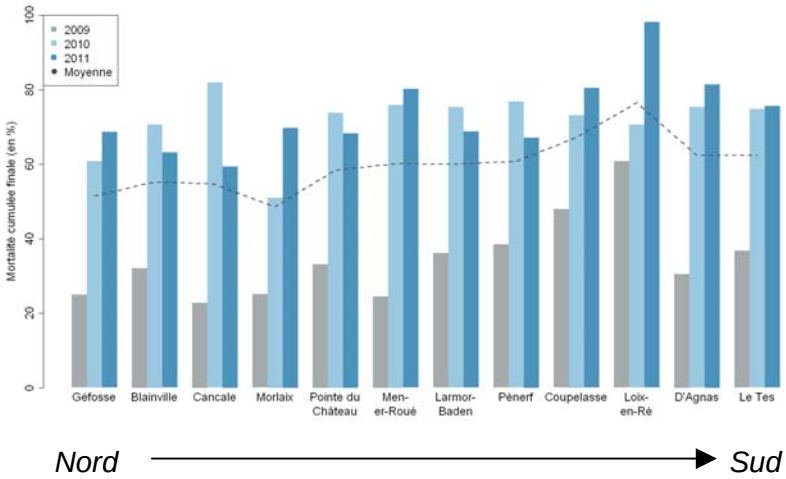
3.1.1 Cinétiques et mortalité cumulée

Les courbes de mortalité instantanée et cumulée mettent respectivement en évidence la dynamique d'apparition des pics et l'évolution de la mortalité dans le temps. Un exemple est présenté Graphique 2 (l'ensemble des courbes de mortalité par année et par lot est disponible en ANNEXE II). L'observation des courbes de mortalité (Graphique 2 et ANNEXE II) montre que ce sont les sites les plus aux sud qui sont les premiers touchés par les mortalités. Ce sont aussi ceux qui connaissent les taux de mortalité les plus importants, ceux-ci allant d'environ 60% au nord à 90% dans le sud pour le naissain issu du captage naturel.

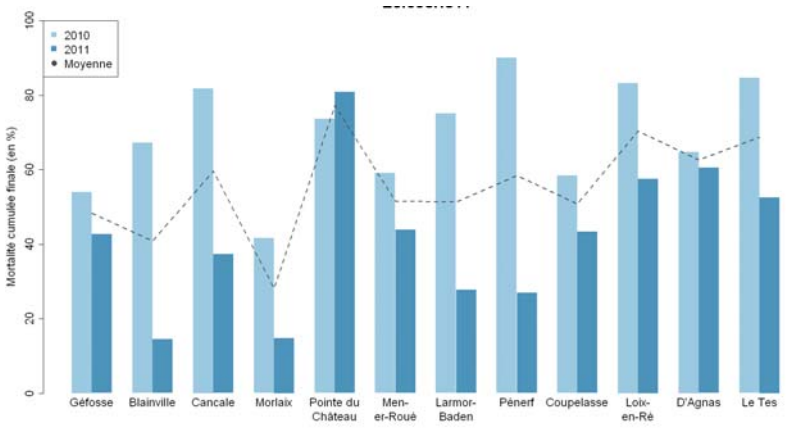


Graphique 2 : Mortalité instantanée et cumulée – Naissain 2N, CNAR, Année 2011

Le suivi du naissain captage naturel Arcachon (CNAR) de 2009 à 2011 (Graphique 3) confirme cette tendance. Notons que les faibles taux de 2009 ne sont pas représentatifs de la mortalité de l'année, il s'agit en fait d'un effet lot : cette année là, la mortalité des poches suivies a été inférieure à la mortalité observée au niveau national. Les huîtres triploïdes semblent, notamment en 2011, moins touchées que les autres par les mortalités (le test Kruskall-Wallis[4] de comparaison des proportions moyennes de mortalité en fonction de l'origine du lot met en évidence une différence significative entre Captage naturel et Ecloserie) et de façon beaucoup plus hétérogène (Graphique 4).



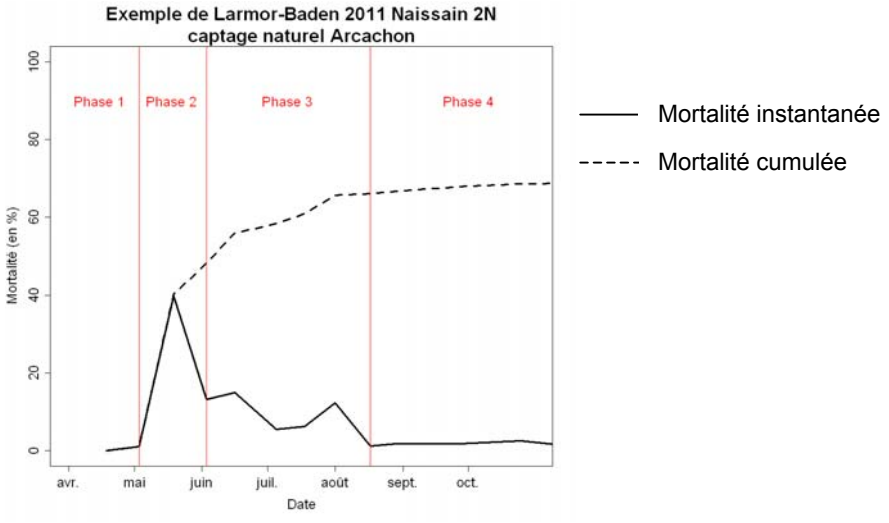
Graphique 3 : Evolution de la mortalité cumulée finale par année et par site Naissain 2N, CNAR



Graphique 4 : Evolution de la mortalité cumulée finale par année et par site Naissain 3N, ETA

[4] Test non paramétrique car hypothèse de normalité non vérifiée au sein des deux sous populations

Le nombre de pics de mortalité, leur date de départ, leur intensité et leur durée varient en fonction des sites, des années et des lots étudiés. On retrouve cependant à chaque fois quatre phases distinctes dans l'apparition et l'évolution des mortalités. Elles sont visibles sur l'exemple ci-dessous (Graphique 5).



Graphique 5 : Description des différentes phases de mortalité

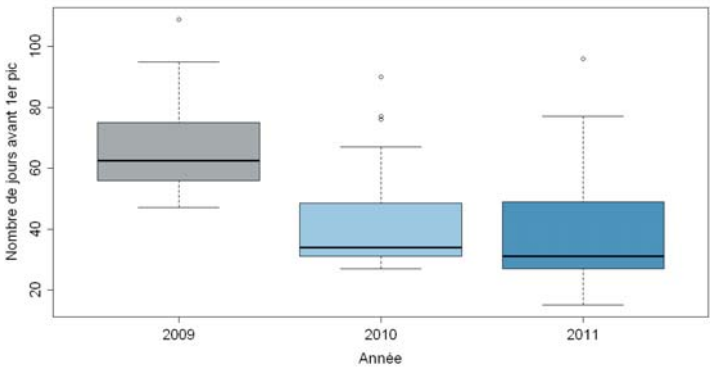
Phase 1, Mise à l'eau : Elle est caractérisée par de très faibles taux de mortalité qui correspondent en fait à la mortalité liée au stress induit par le transfert sur les différents sites.

Phase 2, Démarrage des surmortalités : Cette phase correspond à l'observation d'un premier pic important de mortalité.

Phase 3, Répliques de surmortalités : Durant cette phase, des pics plus faibles que le premier peuvent avoir lieu (rarement plus de deux).

Phase 4, Fin des surmortalités : Les taux de mortalité se stabilisent à un niveau faible, correspondant au taux de mortalité « naturel ».

Chaque année, la phase de mise à l'eau a lieu en avril, parfois en mai pour le naissain d'écloserie. La période d'apparition du premier pic varie ensuite de mai à juillet, selon les sites mais aussi selon les années. Les épisodes de mortalité sont ainsi apparus de plus en plus tôt de 2009 à 2011 (Graphique 6).



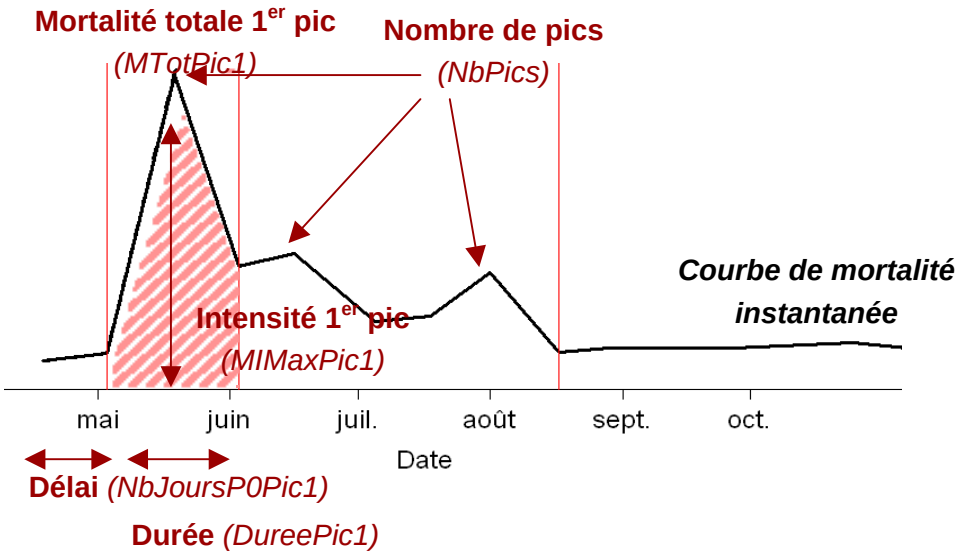
Graphique 6 : Nombre de jours avant apparition du premier pic de mortalité selon les années (tous sites et lots confondus)

Les lots issus du captage naturel et ceux provenant d'écloserie semblent par contre être touchés après un délai similaire (le test Kruskall-Wallis de comparaison du nombre moyen de jours avant le premier pic en fonction de l'origine du lot ne met pas en évidence de différence significative entre Captage naturel et Ecloserie).

3.1.2 Description des pics

Comme décrit précédemment, la date de déclenchement des pics, leur intensité et leur durée, diffèrent en fonction des sites, des années et des lots étudiés. Pour mieux caractériser ces différences, nous avons synthétisé les cinétiques de mortalité en retenant leurs principales caractéristiques (Graphique 7) :

- Le nombre de pics (NbPics)
- Le délai avant apparition du premier pic (NbJrsP0Pic1), en nombre de jours
- La durée du premier pic (DureePic1) , en nombre de jours
- La mortalité totale du premier pic (MTotPic1) et la mortalité totale ramenée à la durée du pic (MTotJourPic1), en pourcentage
- L'intensité du pic (Mortalité instantanée maximale observée pendant le pic : MIMaxPic1 et mortalité journalière maximale : MIMaxJourPic1) , en pourcentage

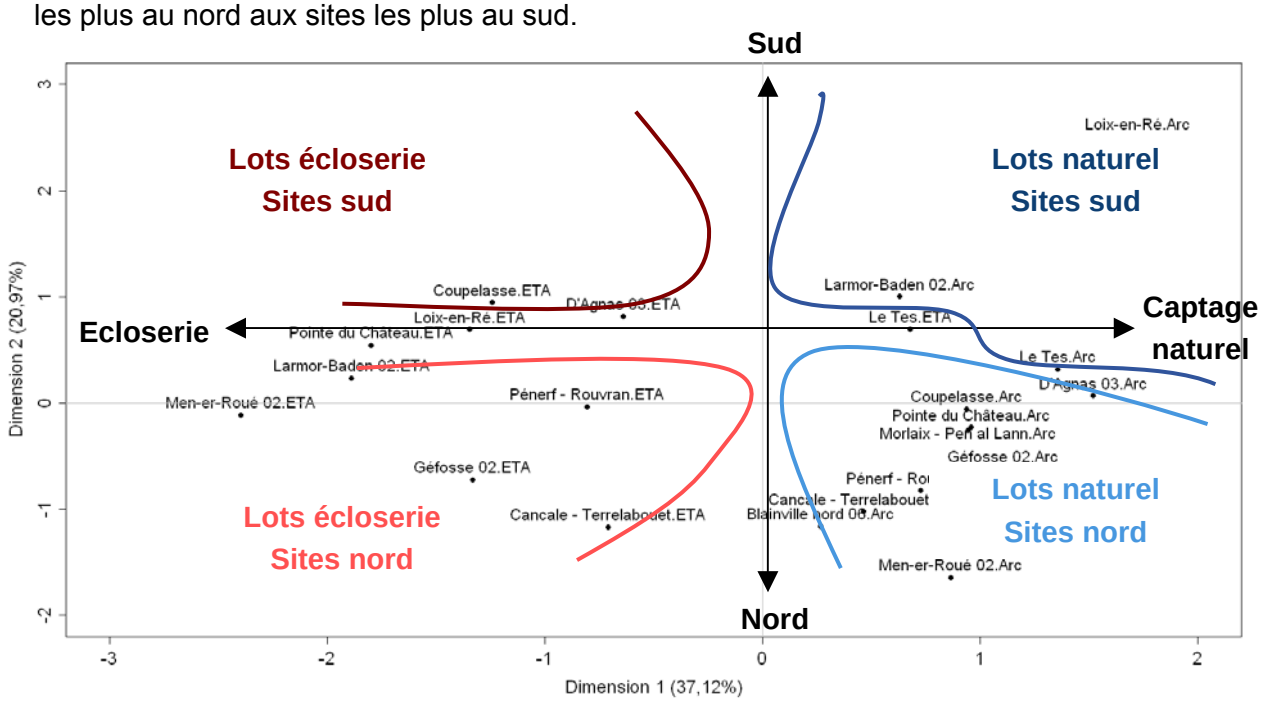


Graphique 7 : Variables descriptives des pics

Nous disposons ainsi chaque année de descriptions des cinétiques de mortalité pour chaque site et chaque captage (Structure des données présentée en ANNEXE III). Une analyse factorielle multiple (une année correspondant à un groupe, avec en actif les lots CNAR et ETA – les autres n'étant suivis que ponctuellement – et les années 2010 et 2011), nous a permis de synthétiser ces informations et d'étudier les couples (Site ; Captage) du point de vue de leurs cinétiques de mortalité.

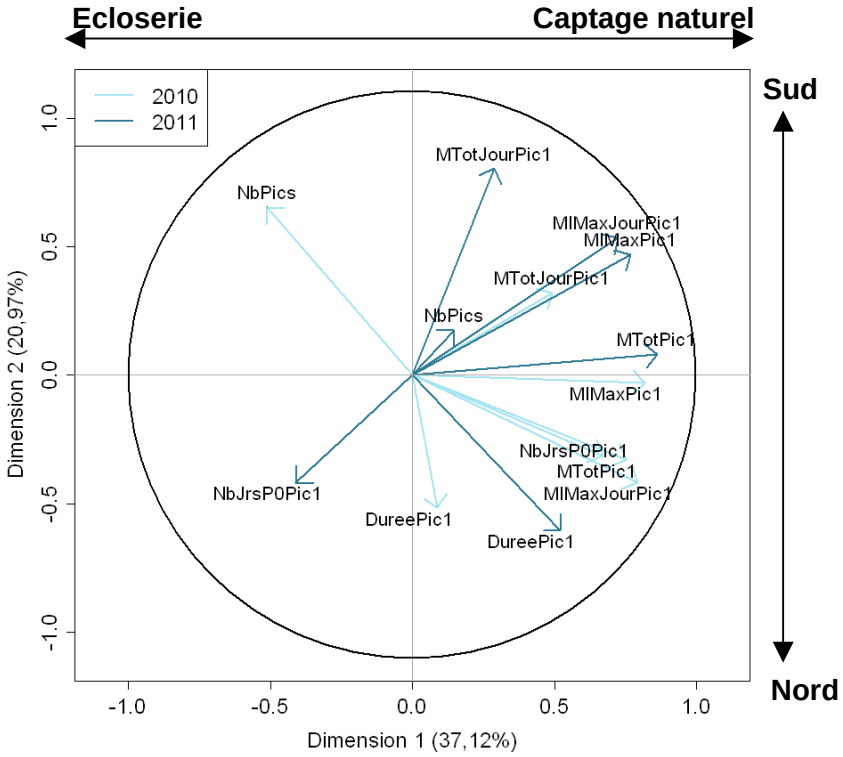
Le plan 1-2 de l'AFM explique 58% de la variabilité des individus. Le nuage des individus

(Graphique 8) a une forme allongée, les couples (Site ; Captage) sont répartis dans l'espace et éloignés de l'origine : l'analyse réussi donc bien à les différencier. Nous voyons clairement une séparation des lots selon leurs caractéristiques. En effet, l'axe 1 sépare les lots provenant de l'écloserie A et ceux provenant d'Arcachon alors que l'axe 2 oppose les sites les plus au nord aux sites les plus au sud.



Graphique 8 : Nuage des individus, plan 1-2 de l'AFM

Le cercle de corrélation des variables (Graphique 9) permet d'étudier les liaisons entre les variables et de caractériser les lots par leurs cinétiques de mortalité.



<u>Interprétation des Graphiques 8 et 9 :</u>

Les individus se situent du côté des variables pour lesquelles ils prennent de fortes valeurs et à l'opposé de celles pour lesquelles ils prennent de faibles valeurs.

Graphique 9 : Cercle de corrélation des variables, plan 1-2 de l'AFM

Les variables sont pour la plupart bien représentées sur le plan 1-2 (à part pour la variable NbPics de 2011, les flèches sont toutes éloignées du centre du graphique), elles sont donc interprétables. Quelle que soit l'année, l'axe 1 est toujours un gradient de l'intensité du premier pic de mortalité.

De manière générale, le plan 1-2 permet une comparaison des cinétiques de mortalité :

- Entre les origines : Quelle que soit l'année **le naissain issu du captage naturel Arcachon est beaucoup plus touché par les mortalités** (MTotPic1, MIMaxPic1) que le naissain issu de l'écloserie A

- Entre les sites : **Les pics ont lieu plus tard au nord qu'au sud** (NbJrsP0Pic1)**, ils y sont aussi plus longs** (DureePic1) **et moins intenses** (avec une mortalité totale ramenée au nombre de jours MTotJourPic1 plus faible)

- Entre les années : Si on retrouve les mêmes tendances en 2010 et 2011, ces deux années ont quand même des profils spécifiques : en 2011 la mortalité totale du premier pic a été plus importante au sud (avec des mortalités instantanées maximales journalières (MIMaxJourPic1) élevées) qu'au nord tandis qu'en 2010 on observe l'effet inverse : la mortalité totale du premier pic a été plus importante au nord qu'au sud

La représentation des individus partiels, c'est-à-dire des individus du point de vue de chacune des années (ANNEXE III), complète cette description puisqu'elle montre qu'en 2011 les différences de cinétiques entre nord et sud sont beaucoup plus marquées qu'en 2010, année où le premier pic de mortalité est apparu presque simultanément dans l'ensemble des lots. Remarquons aussi une uniformisation du lot de naissain triploïde au cours des années.

Ces résultats appuient ce que nous avions observé graphiquement. De plus, bien que l'analyse n'ait été réalisée que sur les lots CNAR et ETA et les années 2010 et 2011, l'introduction des autres lots et de l'année 2009 en illustratifs dans l'AFM confirme les résultats précédents (ces lots et l'année 2009 ont été retirés des graphiques présentés dans ce rapport pour plus de clarté).

D'autre part, les plans 1-2 et 3-4 de l'AFM (ANNEXE III) permettent de comprendre les liens entre les différents pics de mortalité. Il semble ainsi que :

- Il y a eu en 2010 plus de pics de mortalité (NbPics) au sud qu'au nord ce qui est particulièrement visible chez le naissain provenant de l'écloserie A

- Plus le premier pic à lieu (NbJrsP0Pic1) **tôt plus il est fort** (MTotPic1) (coefficient de corrélation négatif entre les variables NbJrsP0Pic1 et MTotPic1)

- Plus le premier pic est **important** (MTotPic1) **moins il y a de pics** (NbPics)

(coefficient de corrélation négatif entre les variables MTotPic1 et NbPics)

- **Plus il y a de pics** (NbPics) **moins la mortalité est élevée** (MTotPic1)

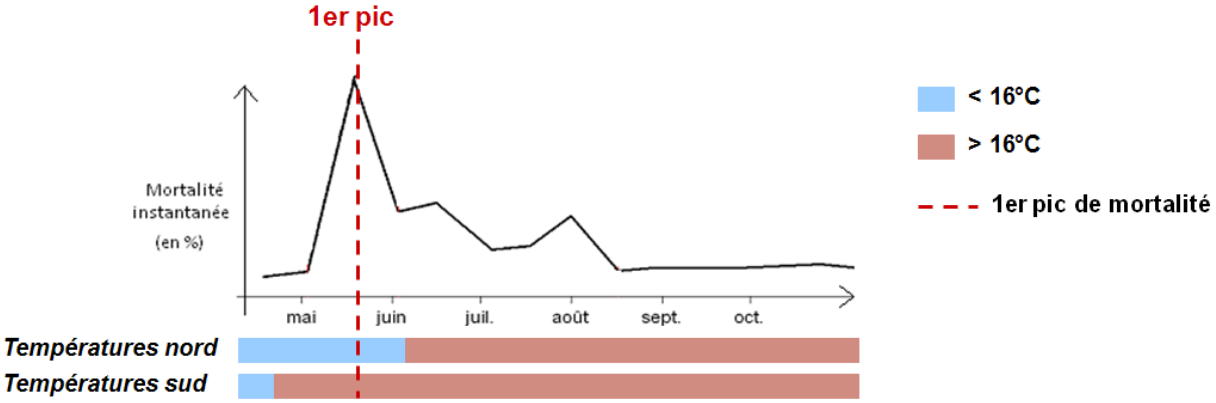
Quel que soit le site, l'année et le lot, le premier pic est toujours le plus important : il dure en moyenne 33 jours (±3,5) et a une mortalité totale de 48,5% (±4,22). Lorsqu'il y en a plusieurs, les pics suivants sont beaucoup plus faibles. En effet, le deuxième pic dure en moyenne 23,5 jours (± 6) et a une mortalité totale d'environ 26% (± 6,36).

3.2 Etude des facteurs influençant la mortalité

Après avoir caractérisé les cinétiques de mortalité, nous nous intéressons maintenant à l'étude des facteurs influençant la mortalité. Dans une première partie nous étudierons uniquement le lien entre mortalité et température, puis, à l'aide de différents modèles nous sélectionnerons les facteurs biologiques et environnementaux (paramètres physico-chimiques et données de phytoplancton) expliquant le mieux la mortalité.

3.2.1 Relation entre mortalité et température

Le passage des 16°C est considéré comme seuil déclencheur des mortalités. Cependant, les premiers pics apparaissent parfois avant le passage de ce seuil dans les sites situés au nord et largement après dans les sites situés au sud (Graphique 10).



Graphique 10 : Relation entre passage des 16°C et mortalité

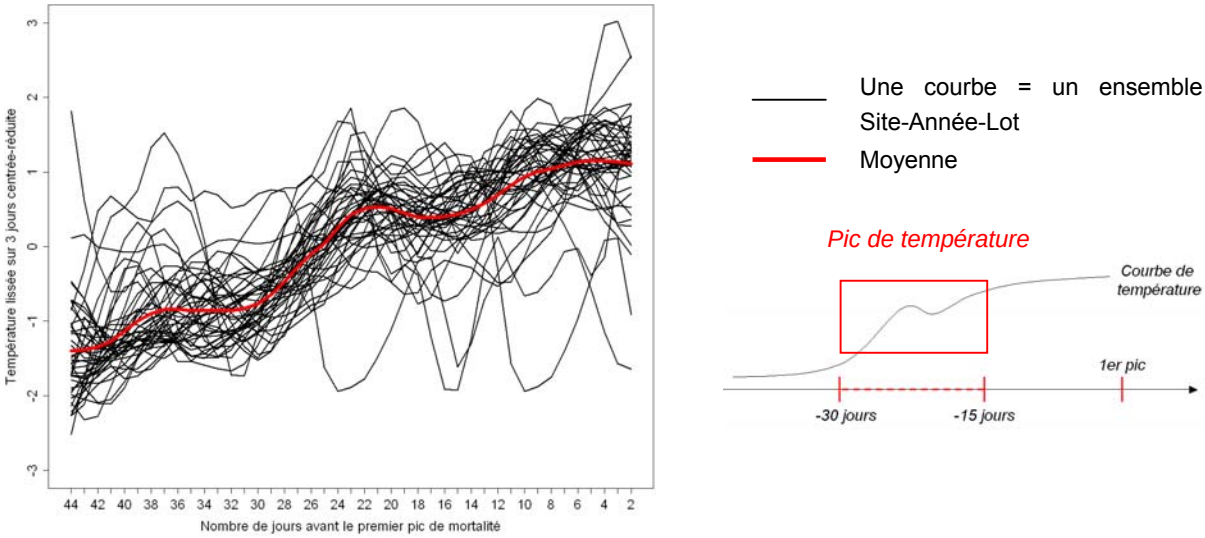
Nous avons donc cherché à préciser la relation entre température et déclenchement des mortalités.

Pour cela, nous disposons des températures moyennes journalières de chacun des sites. Les températures sur la période entre deux passages se caractérisent par leur moyenne et leur variance.

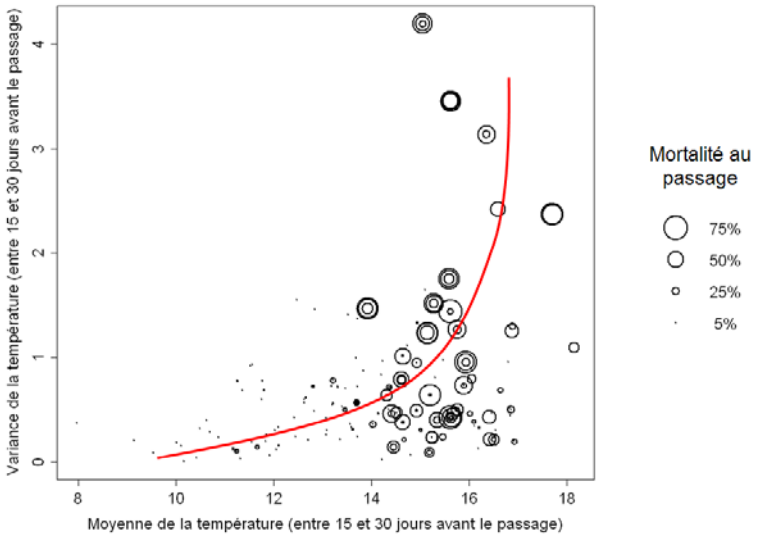
Nous cherchons ainsi à savoir si le déclenchement de la mortalité est lié :

- Au passage d'un seuil de température
- A un choc (pic de température)
- A la combinaison du passage d'un seuil et d'un choc

L'étude des températures durant les 45 jours précédent le premier pic pour chaque site, année et lot a mis en évidence l'existence d'un pic de température entre 15 et 30 jours avant le premier pic de mortalité, et ce quels que soient le site, l'année et le lot étudiés (Graphique 11). Nous supposons que ce pic de température peut être déclencheur des mortalités. Nous nous sommes donc intéressés aux températures dans la période allant de 15 à 30 jours avant chaque passage pour chaque ensemble Site-Année-Lot précédant le premier pic de mortalité.



Graphique 11 : Températures centrées réduites 45 jours avant le premier pic de mortalité



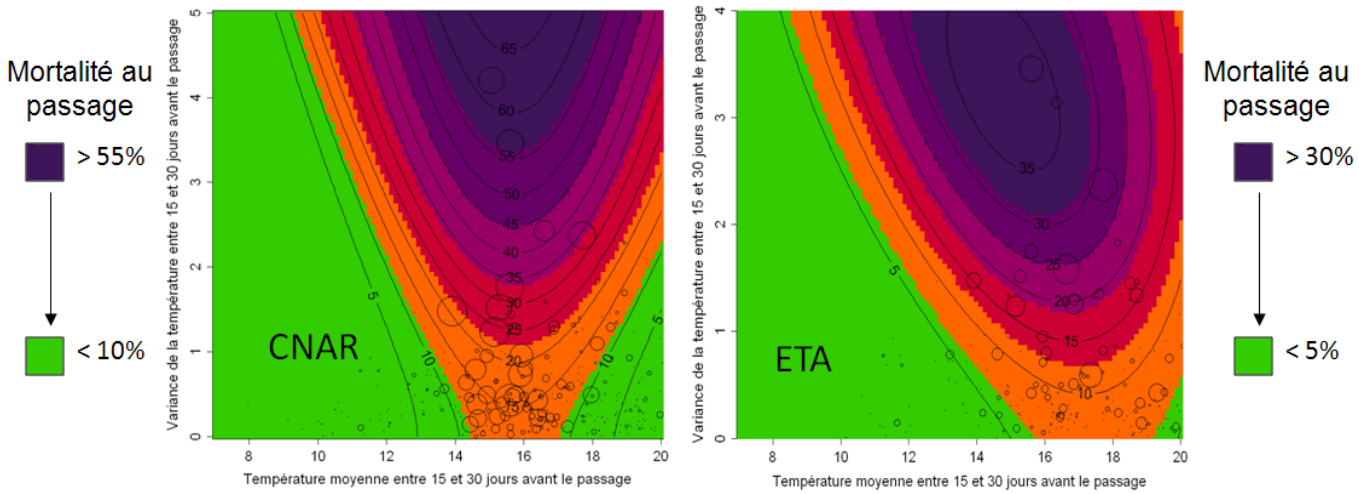
Un point = un passage (pour un ensemble Site-Année-Lot)

La taille d'un point est proportionnelle au taux de mortalité du passage correspondant

Graphique 12 : Relation entre mortalité et moyenne et variance de la température

Le Graphique 12 met clairement en évidence une relation entre moyenne et variance de la température entre 15 et 30 jours avant le passage et la mortalité du passage : il montre en effet que plus la température et la variance augmentent, plus la mortalité est importante.

Nous avons donc construit un modèle linéaire généralisé, permettant de prédire la mortalité à partir des caractéristiques des huîtres (Site, année) et des moyennes et variance des températures de 15 à 30 jours avant le premier pic (détail en ANNEXE IV). Grâce à ce modèle, nous avons pu réaliser une cartographie des températures à risques en estimant le taux de mortalité pour chaque couple (moyenne ; variance) et chaque ensemble (Site ; Année) d'un plan discrétisé puis en le moyennant (Graphique 13).



Graphique 13 : Relation entre température et mortalité : cartographie des températures à risque

Les graphiques ci-dessus mettent bien en évidence la relation entre température et mortalité. Ainsi, la période du **passage des 16° est effectivement une période à risque**. Notons que les températures à risques sont plus élevées pour les huîtres provenant de l'écloserie A que pour celles issues du captage naturel Arcachon.

Les chocs de température jouent eux aussi un rôle clé : **plus la variation de température est forte, plus la mortalité est importante**, ainsi même si le seuil des 16°C n'a pas encore été franchi, une variation importante de température peut entraîner des mortalités.

3.2.2 Facteurs biologiques et environnementaux impliqués dans le phénomène de mortalité et déterminant l'apparition des pics de mortalité

Nous savons que d'autres facteurs que la température entrent en jeu dans le déclenchement des mortalités (Sniesko, 1974). Nous avons donc mis en place plusieurs modèles permettant de sélectionner les variables et les interactions entre variables les plus explicatives : des régressions linéaires généralisées et des modèles de Cox (définition en ANNEXE V).

Ces modèles ont été appliqués aux données par an et par passage (Tableaux de données disponibles paragraphe 2.3, page 14). Cependant, en résumant l'ensemble des passages de l'année en une seule observation par lot et par site, les données annuelles masquent les variations des paramètres entre les passages. Par exemple, deux sites peuvent être exposés au même taux de chlorophylle *a* sur une même période mais avoir connu des variations de chlorophylle *a* bien différentes au cours de cette même période. Sur le jeu de données annuel, les modèles mettent plus difficilement en évidence les facteurs source de mortalité.

Nous avons donc centré notre étude sur les données par passage (un individu = un passage pour un site, une date et un lot donné) et nous avons étudié les variables explicatives suivantes :

Variables site	**LieuOC :** Site observatoire **AnneesOC :** Année observatoire **OriginePop :** Origine du lot **Captage :** Captage du lot **L'effet captage est imbriqué dans l'interaction AnneesOC:OriginePop**
Variables croissance	**TotVivPoidsIndiv :** Poids moyen d'une huître au passage **TxCroisPassage :** Taux de croissance depuis le passage précédent
Variables température	**MoyTemp1530 :** Température moyenne de 15 à 30 jours avant le passage **VarTemp1530 :** Variance de la température de 15 à 30 jours avant le passage
Variables pathogènes	**FreqOSHV1Init :** Fréquence de détection de l'Herpès virus avant la mise à l'eau des lots **FreqOSHV1 :** Fréquence de détection de l'Herpès virus après le premier pic de mortalité **FreqSpl :** Fréquence de détection de *Vibrio Splendidus* avant la mise à l'eau des lots **FreqSplInit :** Fréquence de détection de *Vibrio Splendidus* après le premier pic de mortalité **FreqAes :** Fréquence de détection de *Vibrio aestuarianus* avant la mise à l'eau des lots **FreqAesInit :** Fréquence de détection de *Vibrio aestuarianus* après le premier pic de mortalité
Variables phyto et salinité	**Chloroa :** Chlorophylle *a* au passage **Pheo :** Phéopigments au passage **Salinite :** Salinité au passage

Variable exondation	**TexondPred7[5] :** Temps d'exondation durant les 7 jours précédant le passage

Tableau 3 : Variables étudiées

Notons que les variables : Chloroa, Pheo, Salinite et TexondPred7 ne sont pas renseignées pour tous les sites (Tableau 4). Nous débuterons donc les analyses sans ces données et nous ne les ajouterons que dans un second temps.

	Géfosse 02	Blainville nord 06	Cancale - Terrelabouet	Morlaix - Pen al Lann	Pointe du Château	Men-er-Roué 02	Larmor-Baden 02	Pénerf - Rouvran	Coupelasse	Loix-en-Ré	D'Agnas 03	Le Tes
Chloroa, Pheo, Salinite	✓				✓	✓			✓		✓	✓
TexondPred7	✓	✓	✓		✓		✓	✓	✓			

Tableau 4 : Disponibilité des variables dans les sites suivis par l'Observatoire

De plus, les variables de température ont été découpées en classes pour prendre en compte la non linéarité de l'effet température et les variables de croissance ont été transformées en log pour obtenir une distribution plus adaptée à l'étude. Nous avons aussi étudié l'effet des interactions d'ordre deux (ayant une signification biologique).

Deux types de modèles peuvent permettre d'étudier les données :

- Le **modèle linéaire généralisé**, pour déterminer le risque de mortalité en fonction des différents facteurs

- Le **modèle de Cox**, pour expliquer le délai de survenue d'un pic, donc le risque instantané d'apparition d'un pic en fonction des différents facteurs.

Nous les avons donc appliqués aux données par passage. Les modèles présentés dans ce rapport sont les suivants (Détails en ANNEXE VI) :

Type de modèle	Modèle
	Mortalité = Variables site + Variables croissance + Variables température + Variables pathogènes + interactions d'ordre 2

[5] Les temps d'exondation sont des estimations. Ils ont été estimés grâce à un modèle linéaire construit à partir des temps d'exondation enregistrés par les sondes Température - Salinité pour l'année 2012, des coefficients de marée et des données de vent provenant d'Arpège (modèle météo France).

Modèle linéaire généralisé	Mortalité = Variables site + Variables croissance + Variables température + Variables pathogènes+ Variables phytoplancton et salinité + Variable exondation + interactions d'ordre 2
Modèle de Cox	Délai avant pic = Variables site + Variables croissance + Variables température + Variables pathogènes + interactions d'ordre 2
	Délai avant pic = Variables site + Variables croissance + Variables température + Variables pathogènes+ Variables phytoplancton et salinité + Variable exondation + interactions d'ordre 2

Tableau 5 : Modèles testés

Une procédure de sélection de variables descendante (partant du modèle complet, contenant l'ensemble des variables et enlevant tout à tour celles qui sont les moins significatives) a été appliquée à chacun des modèles afin de retenir les facteurs les plus significatifs.

Ces facteurs sont résumés dans le Tableau 6 (Interprétation détaillée en ANNEXE VI).

Effets	Modèle linéaire généralisé		Modèle de Cox	
LieuOC	✓		✓	
AnneesOC	✓		✓	
OriginePop	✓	Ecloserie -	✓	Ecloserie -
Captage	✓		✓	
TotVivPoidsIndiv	✓	-	✓	-
TxCroisPassage	✓	+	✓	+
MoyTemp1530	✓	+	✓	+
VarTemp1530	✓	+	✓	+
FreqOSHV1	✓	+	✓	+
FreqSpl			✓	+
FreqAes	✓	+	✓	+
Chloroa	✓	-		
Pheo	✓	-		
Salinite			✓	-
TExondPred7	✓	-	✓	-

Tableau 6 : Résultats des modèles : variables significatives

Légende Tableau 6

✓ Effet significatif

- Une augmentation de la valeur de la variable diminue le risque (de mortalité pour le modèle linéaire généralisé / d'apparition d'un pic pour le modèle de Cox)

+ Une augmentation de la valeur de la variable augmente le risque

Les résultats des deux modèles concordent et la plupart des facteurs sont significatifs, confirmant ainsi que le phénomène des surmortalités est multifactoriel. Les facteurs qui ressortent le plus sont ceux concernant la croissance, la température et le virus : ce sont les principaux facteurs de risque.

De nombreuses interactions sont également significatives, notamment l'interaction entre moyenne et variance de la température et les interactions entre les différents agents pathogènes (ANNEXE VI pour plus de détails).

4. Discussion

4 Discussion

Dans la première partie de ce rapport, nous avons étudié les cinétiques de mortalité de l'ensemble des lots de naissain suivis par l'Observatoire Conchylicole de 2009 à 2011. Nous avons pu remarquer un schéma comparable dans l'apparition des mortalités quelques soient les sites et les années. En effet, les mortalités apparaissent en moyenne 48 jours après le premier passage sur site et de manière assez brusque. De plus, le premier pic de mortalité est toujours le plus important et il est parfois suivi de quelques répliques beaucoup plus faibles. Une analyse descriptive nous a ensuite permis de caractériser l'évolution spatio-temporelle des mortalités : les premiers pics apparaissent d'abord dans les sites les plus au sud (Le Tès, D'Agnas, Loix, Coupelasse) puis, de mai à juillet, les mortalités atteignent progressivement les sites les plus au nord (Géfosse, Blainville, Cancale). Notons que, de 2009 à 2011, les mortalités sont apparues de plus en plus tôt (60 jours en moyenne après la mise à l'eau en 2009 contre 30 jours en 2011). L'analyse a également mis en évidence que les sites situés au sud présentent des premiers pics de mortalité plus importants que ceux situés au nord. Enfin, des différences de mortalité selon l'origine des lots sont observées : les lots d'écloserie sont moins touchés que les lots issus de captage naturel, et ce quelles que soient les années. Les données de mortalité récemment recueillies par l'Observatoire Conchylicole en 2012 confirment ce que nous avons détaillé dans ce rapport : en date du 9 août 2012, le taux de mortalité moyen des lots issus du captage naturel Arcachon (CNAR) était de 60,7% contre 49,6% pour le naissain provenant de l'écloserie A (ETA). Par ailleurs, une classification des sites selon les cinétiques de mortalité observées en 2012 (non présentée ici) a mis en évidence des similarités de cinétiques entre les zones géographiques : les sites situés au sud ont des cinétiques similaires (premier pic plus tôt et fort), de même que les sites situés au nord (premier pic plus tardif et moins important qu'au sud).

Dans un deuxième temps, le lien entre la température et la mortalité a été étudié. Ce facteur (et notamment le passage des 16°C), est en effet présenté comme l'un des principaux facteurs déclencheurs des mortalités dans de nombreux articles, mais ce lien n'avait jamais été démontré statistiquement. Nous avons ainsi pu confirmer que le passage des 16°C constitue une période à risque, mais aussi mettre en évidence le rôle des variations de température dans le déclenchement des pics de mortalité : le déclenchement des pics ne semble pas seulement lié au passage d'un seuil de température mais peut aussi être lié à une augmentation brutale de la température.

Les recherches bibliographiques ont montré que l'année, le site d'élevage, la provenance des huîtres et la température ne sont pas les seuls facteurs qui entrent en jeu dans l'apparition des mortalités (F Pernet et al., 2011). Nous avons donc, dans une dernière partie, approfondi l'étude en mettant en relation la mortalité avec différents facteurs tels que la croissance de l'huître, les données environnementales, les temps d'exondation des poches et les résultats des analyses pathogènes. Plusieurs modèles ont ainsi été étudiés : des modèles linéaires généralisés pour expliquer le taux de mortalité aux différents

passages de l'Observatoire par ces différents facteurs et un modèle de Cox, afin de sélectionner les facteurs les plus impliqués dans le risque d'apparition d'un pic. Ces modèles nous ont permis de retenir plusieurs variables explicatives de la mortalité. Ainsi, l'augmentation du taux de croissance, de la température et du taux d'agents pathogènes détectés dans l'huître sont des facteurs de risque. En effet, un taux de croissance élevé fragilise l'huître qui utilise l'essentiel de son énergie pour se développer et a donc moins de ressources à consacrer à sa défense (confirmant ainsi les résultats obtenus pas Fleury et al., 2011). La température est quant à elle source de stress pouvant provoquer des perturbations dans la physiologie de l'huître, notamment en terme de défenses immunitaires. L'effet de diminution du risque de mortalité associé au temps d'exondation pourrait être lié à une diminution du temps d'exposition de l'huître aux agents pathogènes présents dans l'eau (OSHV1 et surtout *Vibrio Aestuarianus* qui semble avoir un impact très important sur la mortalité, bien que cela reste à confirmer par des analyses supplémentaires). Des taux de chlorophylle *a*, de phéopigments et de salinité élevés semblent également diminuer le risque mais nous disposons de trop peu de données pour conclure sur leur effet. Les interactions entre facteurs ont elles aussi un rôle important, notamment les interactions entre moyenne et variance de la température et les interactions entre pathogènes. L'interaction entre origine et année est elle aussi intéressante : elle montre chez le naissain d'écloserie une diminution du risque de mortalité au fur et à mesure des années. Cette évolution pourrait être due à un processus de sélection induit par les techniques mêmes de production en écloserie : chaque année, les huîtres réutilisées pour la production en écloserie sont celles qui ont survécu aux mortalités, ce sont donc les plus résistantes.

Pour finir, nous avons étudié le protocole de l'Observatoire Conchylicole afin d'y apporter des suggestions pour les années à venir. Pour ce faire, la représentativité des poches suivies, puis l'impact des comptages réguliers des huîtres sur la mortalité ont été étudiés.

L'Observatoire suit trois poches de chaque lot de naissain sur chaque site, dont une seule régulièrement utilisée pour les comptages (les deux autres poches servant aux prélèvements pour analyses pathologiques ou biométriques). Un échantillon de trois poches d'un même mot comptées régulièrement a mis en évidence une variabilité inter poches qui peut être importante (ANNEXE VII). Le choix de ne suivre qu'une seule poche est donc discutable en terme de représentativité, une étude a d'ailleurs été menée pour proposer un plan d'expérience permettant de tester cet effet poche. Cependant, les contraintes techniques du suivi sur site (nombre d'agents nécessaire, temps d'accessibilité aux sites contraint par les marées…) rendent sa mise en oeuvre difficile.

Nous nous sommes enfin intéressés à l'impact des comptages réguliers sur la mortalité. Les analyses montrent que les comptages effectués tous les quinze jours augmentent le risque de mortalité (Etude en ANNEXE VIII). En effet, le fait de vider les poches tous les 15 jours pour les compter est source de stress et fragilise le naissain. Il serait donc intéressant d'améliorer le protocole en mettant en place des techniques qui nécessitent moins de manipulations, en fixant le naissain sur des plaques plutôt que de le mettre en poche.

Notons enfin que le plan d'expérience de l'observatoire ne permet pas de différencier l'effet de la ploïdie de celui de l'origine puisque tous les lots triploïdes proviennent d'écloserie et tous les lots diploïdes de captage naturel or cette distinction pourrait être intéressante à étudier dans le futur.

Bibliographie

Cochennec-Laureau N et al. Les surmortalités des naissains d'huîtres creuses, *Crassostrea gigas* : acquis des recherches en 2010. Ifremer, 2010. 30p.

Comité national de la conchyliculture (2009). Les Statistiques. http://www.cnc-france.com/ (Consulté le 03/07/2012).

Fleury E et al (2010). Microarray-based identification of gonad transcripts differentially expressed between lines of Pacific oyster selected to be resistant or susceptible to summer mortality. Marine Biotechnology. 12, 326-339.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (2007). Fisheries and Aquaculture Department – Aquaculture resources – *Crassostrea gigas*. http://www.fao.org/fishery/culturedspecies/Crassostrea_gigas/en (Consulté le 03/07/2012).

Guichard B et al. Bilan 2010 du réseau REPAMO. Ifremer, 2010. 23p.

Normand J. Réseaux ressources : fiabiliser l'acquisition de la données biologique. Ifremer, 2011. 4p.

Observatoire Conchylicole National (2010). Observatoire Conchylicole. http://wwz.ifremer.fr/observatoire_conchylicole (Consulté le 27/02/2012).

Pernet F et al. (2012). Mass mortalities of Pacific oysters *Crassostrea gigas* reflect infectious diseases and vary with farming practices in the Mediterranean Thau lagoon, France. Aquaculture environment interaction. Vol 2:215-237. 23p.

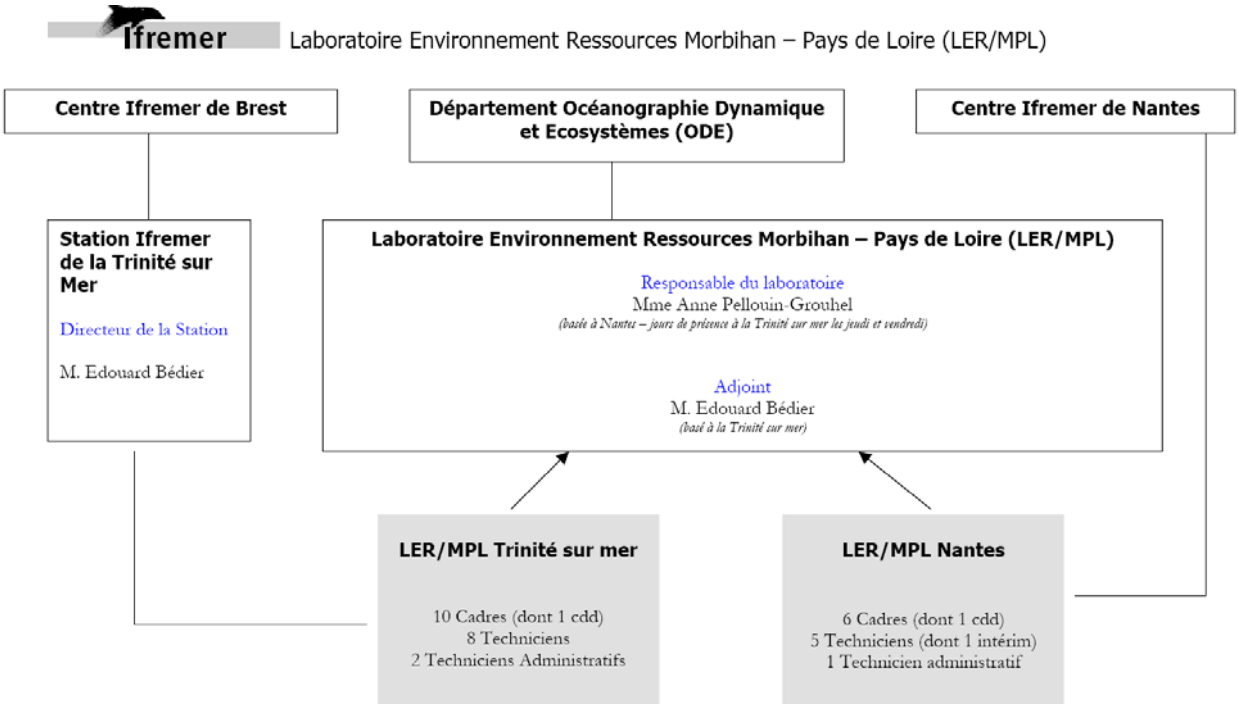
Pernet F et al. Rapport final du programme de recherche sur les mortalités d'huîtres creuses *Crassostrea Gigas* dans l'étang de Thau. Ifremer, 2011. 75p.

Samain J-F et al. Mortalités estivales de l'huître creuse *Crassostrea Gigas* – Défi Morest. Ifremer, 2005. 331p.

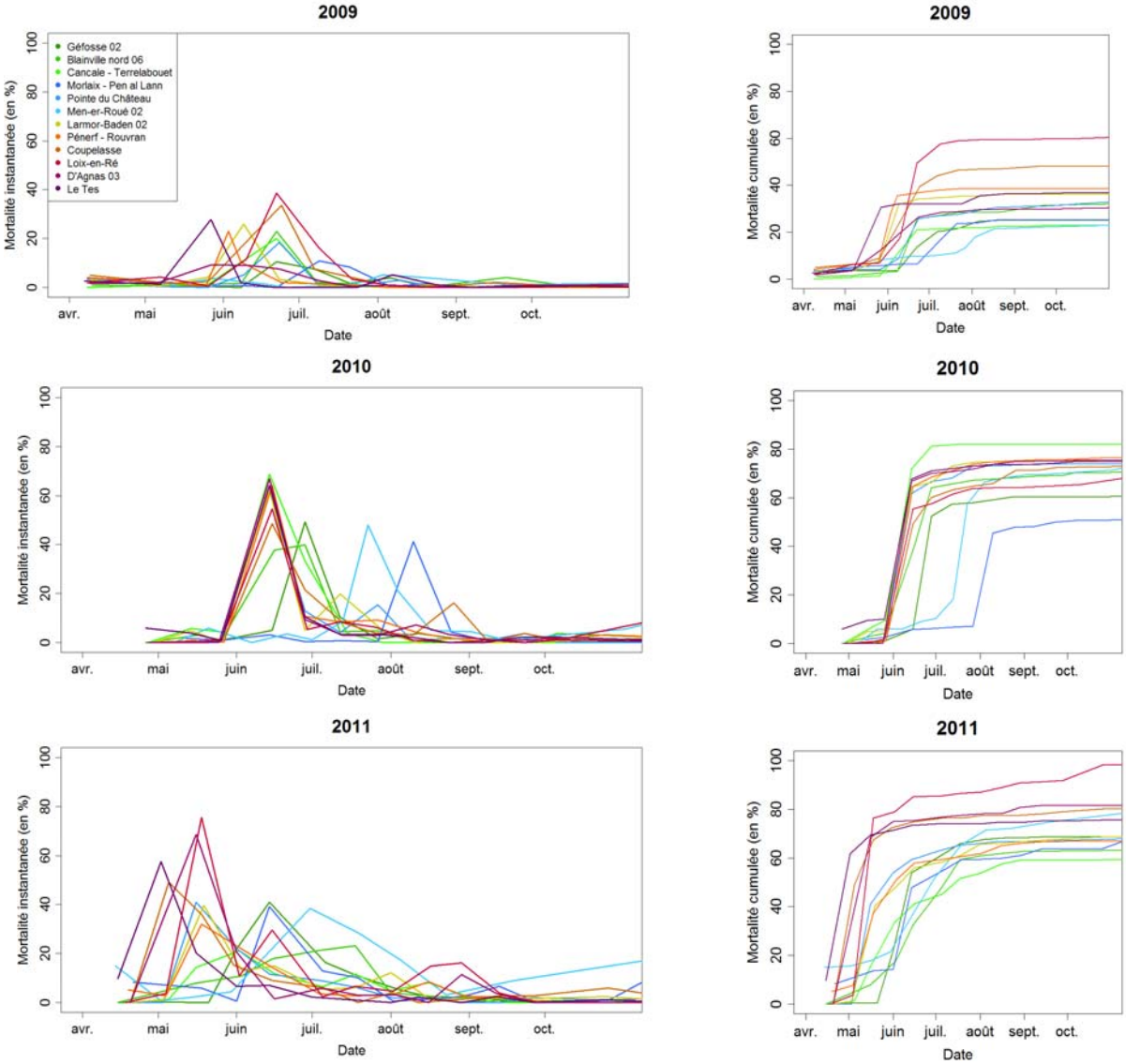
Sniesko S-F (1974). The effects of environmental stress on outbreaks of infectious diseases of fishes. Journal of Fish Biology. 6, 197-208.

ANNEXES

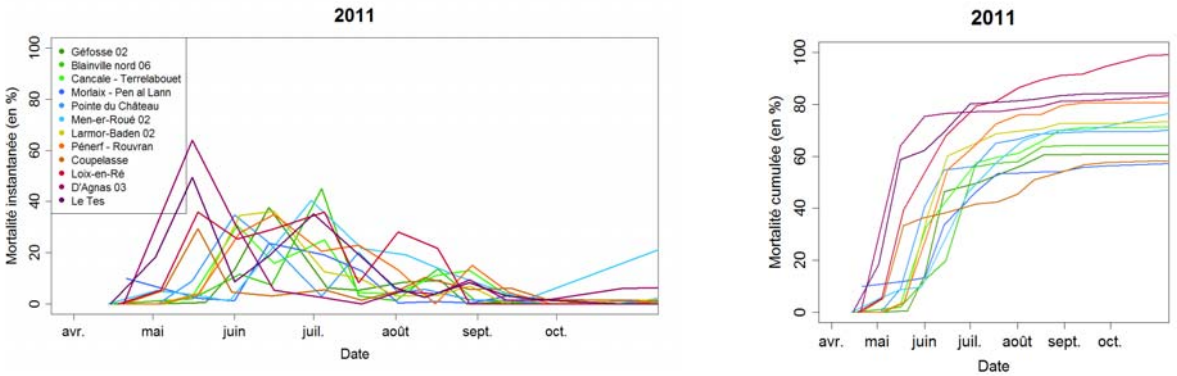
ANNEXE I : Organigramme



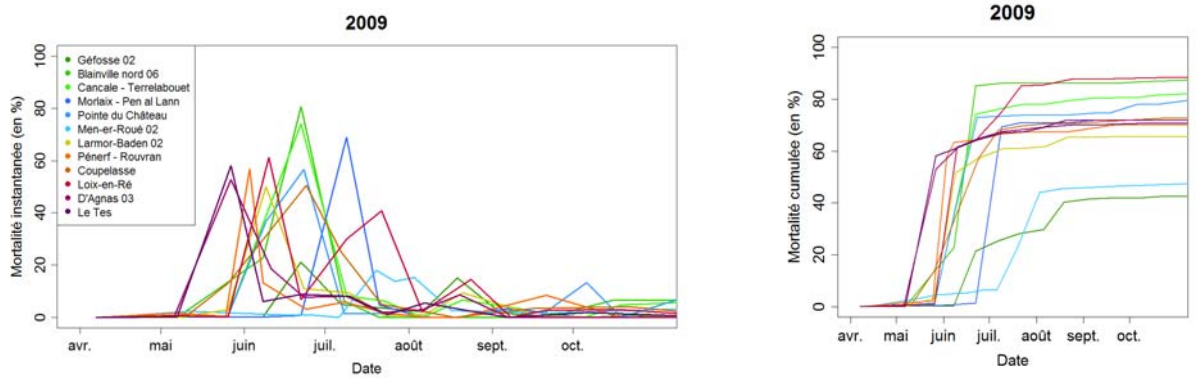
ANNEXE II : Courbes de mortalité instantanée et cumulée



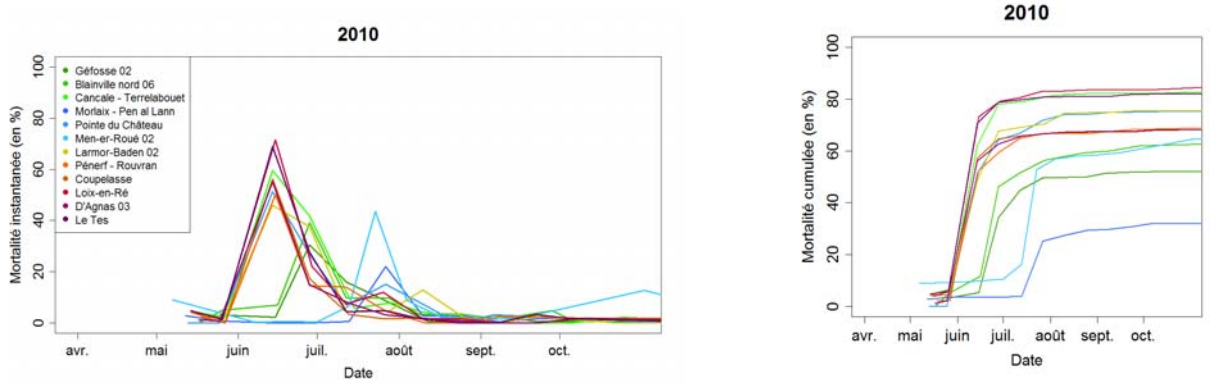
Graphique : Mortalité instantanée et cumulée – Naissain 2N CNAR



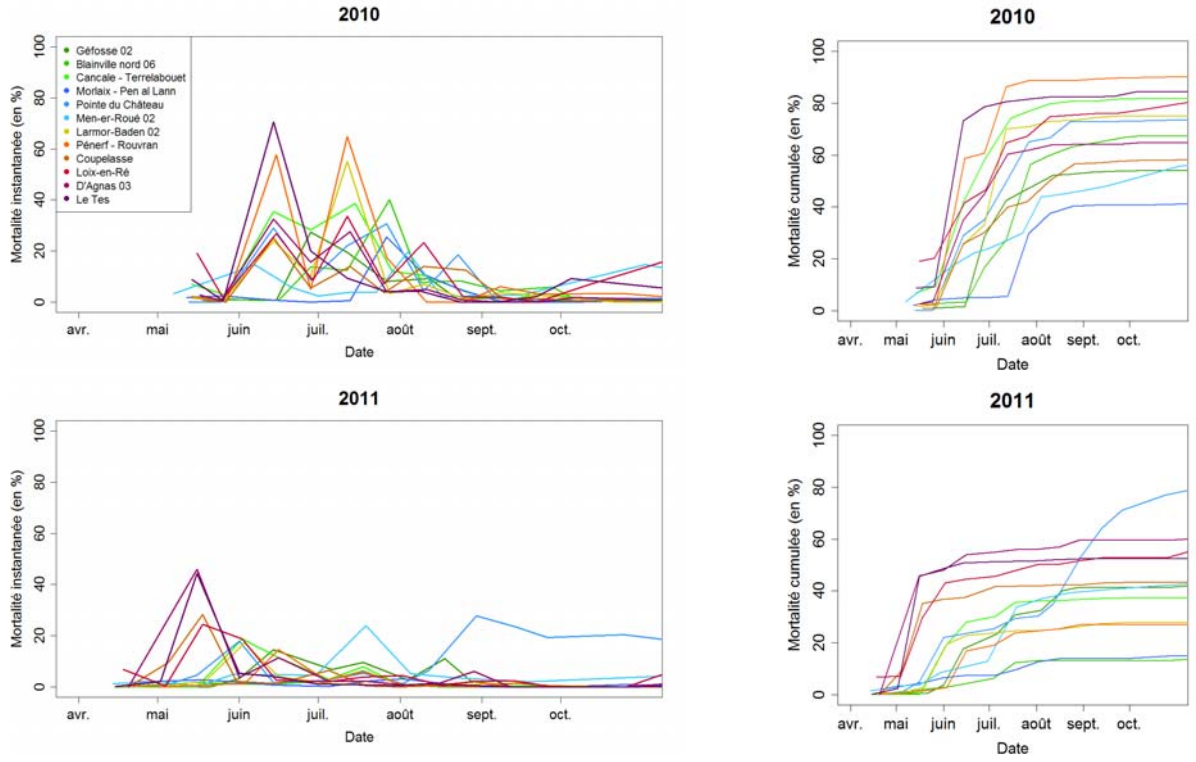
Graphique : Mortalité instantanée et cumulée – Naissain 2N CNMO



Graphique : Mortalité instantanée et cumulée – Naissain 3N ETM



Graphique : Mortalité instantanée et cumulée – Naissain 3N ETB



Graphique : Mortalité instantanée et cumulée – Naissain 3N ETA

ANNEXE III : Description des pics (résultats de l'AFM)

L'Analyse Factorielle Multiple est une analyse multidimensionnelle dédiée aux tableaux de données où les variables sont structurées en groupes. Plusieurs jeux de variables (qualitatives ou quantitatives) sont ainsi étudiés simultanément. Prendre en compte cette structure des données permet d'équilibrer l'influence de chaque groupe de variables mais aussi d'étudier les liens entre les groupes. (Source : site web http://factominer.free.fr/advanced-methods/analyse-factorielle-multiple.html)

Dans ce rapport, nous avons étudié les couples (Site ; captage) du point de vue de leurs cinétiques de mortalité. Nous avons donc résumé les cinétiques par leurs principales caractéristiques.

Les variables retenues dans l'analyse ainsi que leur description sont détaillées dans le tableau suivant :

	Moyenne	**Intervalle de confiance à 95% pour la moyenne**	**Ecart-type**
Nombre de pics (NbPics)	1,56	± 0,15	0,73
Délai avant apparition du premier pic (NbJrsP0Pic1)	47,83	± 4,19	20,44
Durée du premier pic (DureePic1)	32,73	± 3,48	17,03
Mortalité totale du premier pic (MTotPic1)	48,53	± 4,22	20,60
Mortalité totale journalière du premier pic (MTotJourPic1)	1,35	± 0,15	0,72
Intensité du pic (MIMaxPic1)	40,17	± 3,75	18,30
Intensité journalière du pic (MIMaxJourPic1)	2,07	± 0,18	0,88

Tableau : Statistiques descriptives des pics

Nous disposons des mesures de chacune de ces variables pour l'ensemble des années étudiées. Nous avons donc effectué une AFM sur les données, une année constituant un groupe.

Seules les années 2010 et 2011 seront introduites en actif dans l'analyse, 2009 étant comme nous l'avons vu trop peu représentative des mortalités de l'année. De même, seuls les lots captage naturel Arcachon et Ecloserie A seront pris en compte, les autres n'étant pas suivis chaque année.

Le Tableau suivant présente la structure des données :

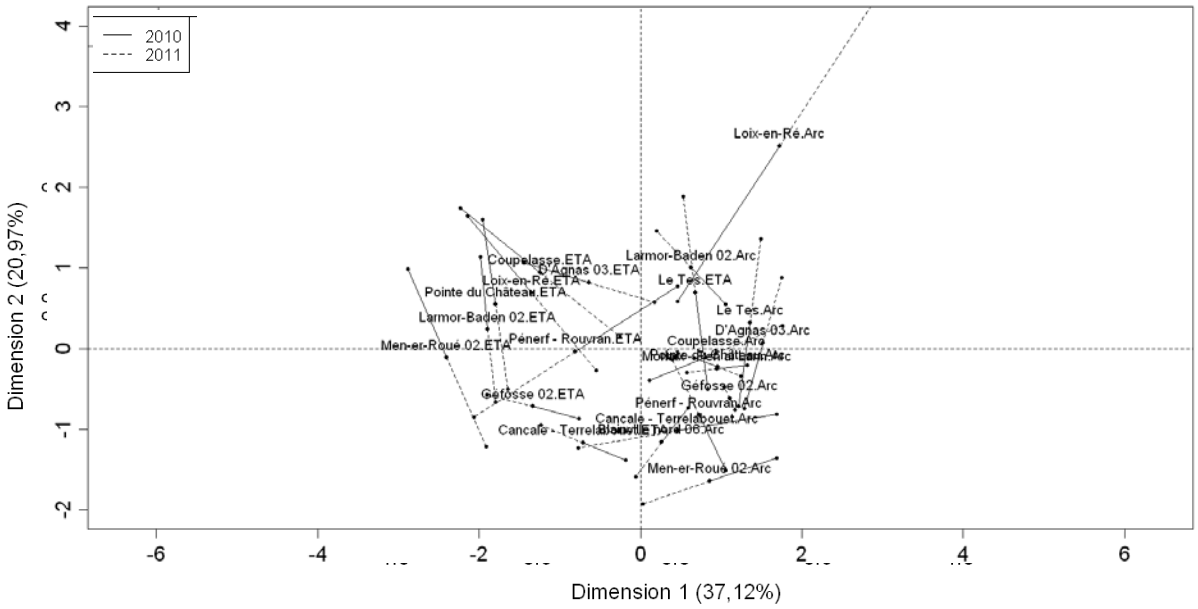
Lieu	Captage	2009			2010			2011		
		NbJrs P0Pic1	Duree Pic1	…	NbJrs P0Pic1	Duree Pic1	…	NbJrs P0Pic1	Duree Pic1	…
Géfosse	**CNAR**									
Blainville	**CNAR**									
…	**CNAR**									
Le Tes	**CNAR**									
Géfosse	**ETA**									
Blainville	**ETA**									
…	**ETA**									
Le Tes	**ETA**									
Géfosse	**CNMO**									
…	**…**									

Eléments actifs

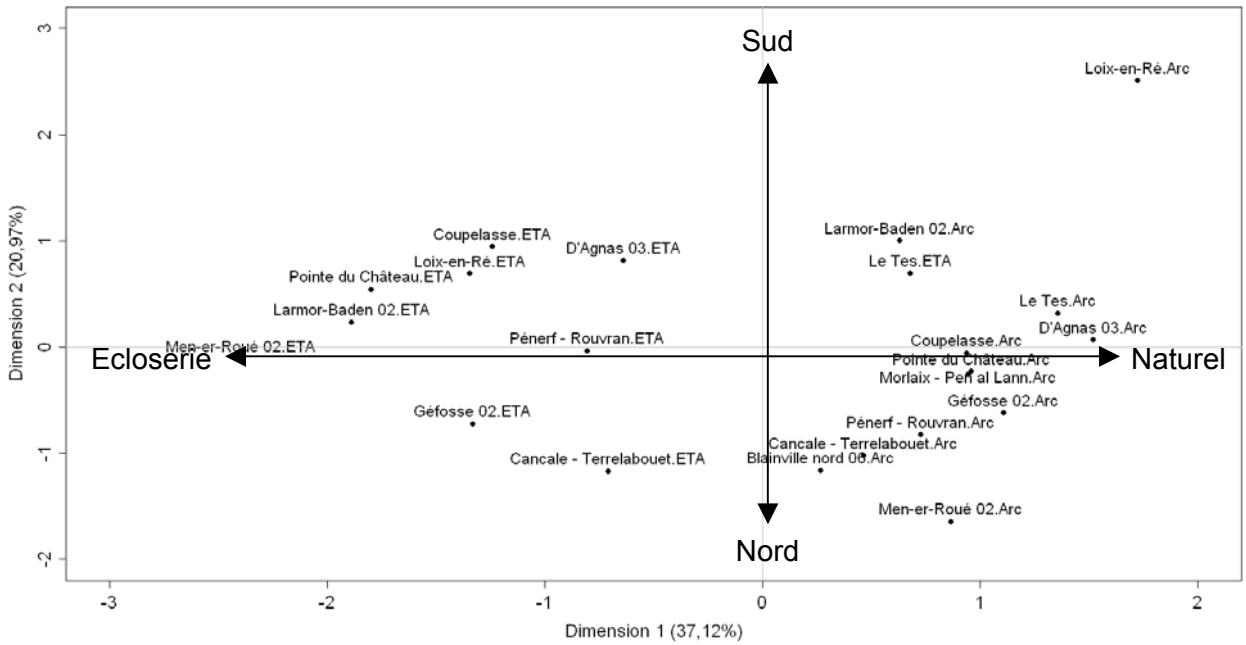
Eléments illustratifs

Tableau : Données description des pics

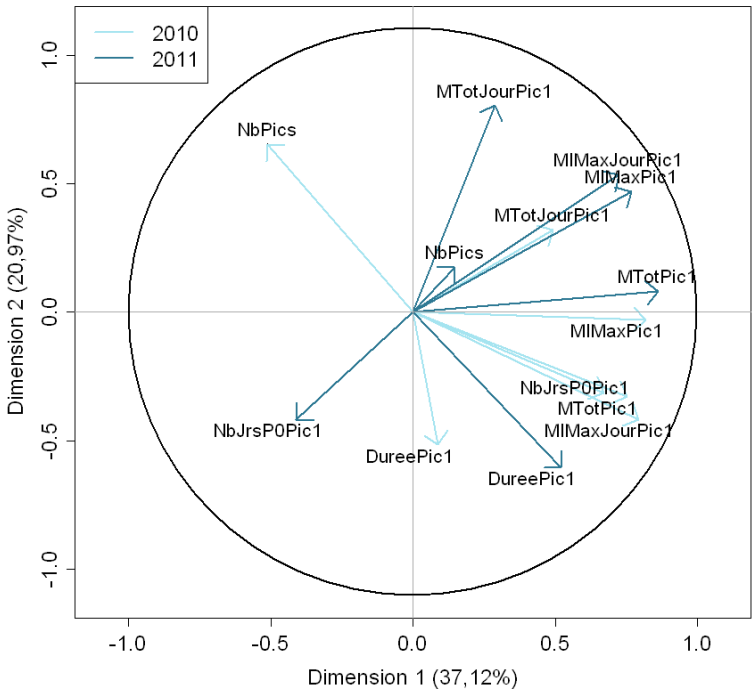
Les graphiques obtenus suite à l'AFM sont :



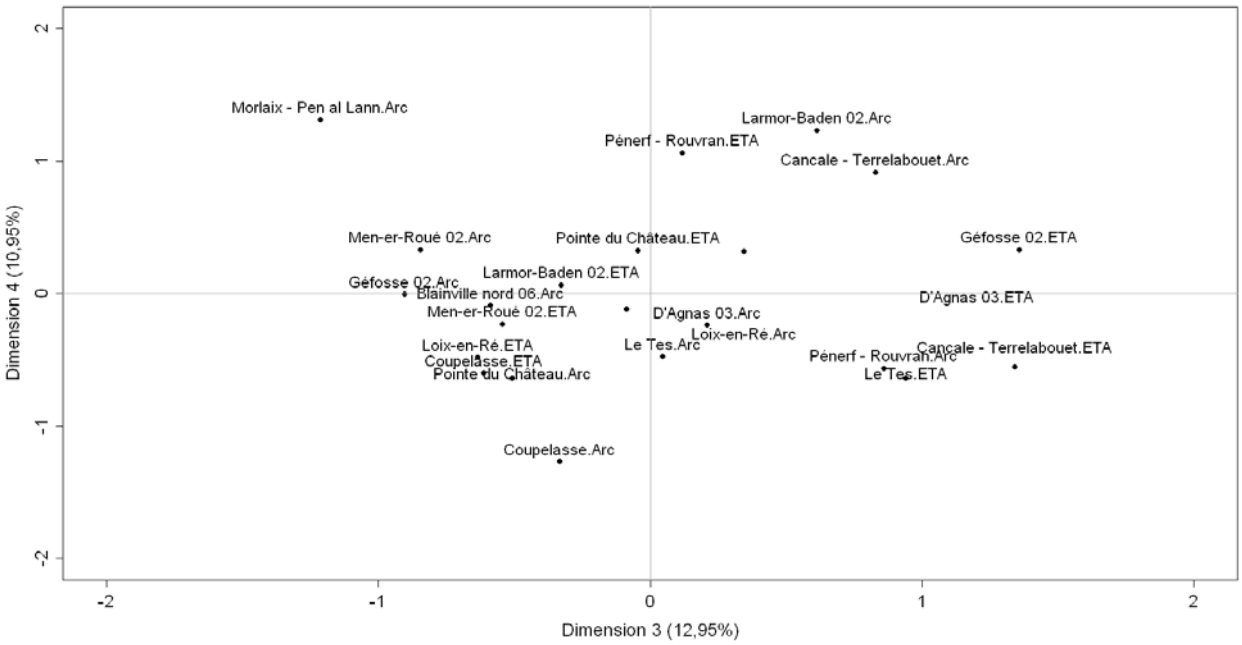
Graphique : Représentation des individus partiels, plan 1-2 de l'AFM



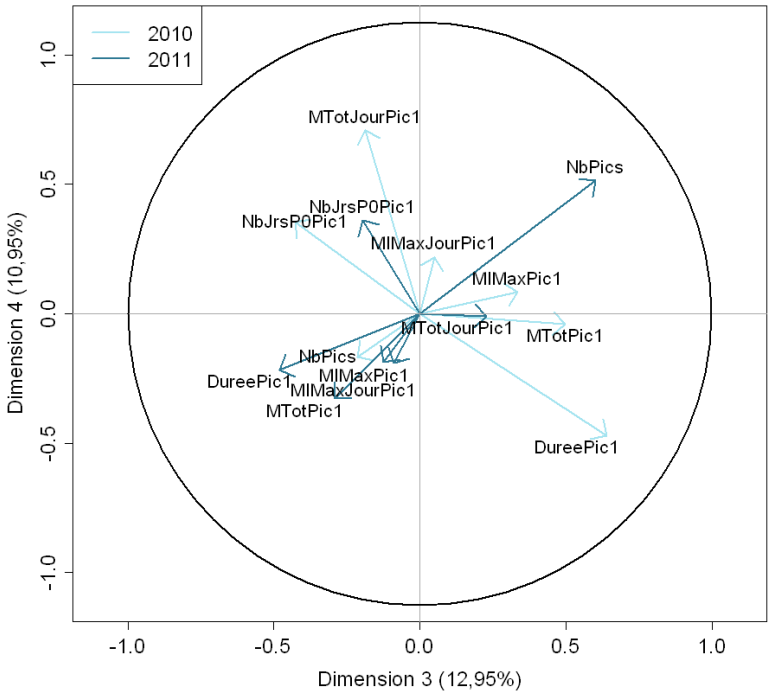
Graphique : Nuage des individus, plan 1-2 de l'AFM



Graphique : Cercle de corrélation des variables, plan 1-2 de l'AFM



Graphique : Nuage des individus, plan 3-4 de l'AFM



Graphique : Cercle de corrélation des variables, plan 3-4 de l'AFM

ANNEXE IV : Modèle Mortalité - Température

Afin de réaliser une cartographie des couples (température ; variance) les plus « risqués », nous avons construit un modèle linéaire généralisé sur les données par passage, permettant de prédire la mortalité au passage à partir :

- Du lieu du passage
- De l'année du passage
- De la moyenne des températures entre 15 et 30 jours avant chaque passage.
- De la variance des températures entre 15 et 30 jours avant chaque passage.

Le modèle complet correspondant à ces variables est :

Mortalité = Lieu + Annee + MoyTemp1530 + VarTemp1530 + MoyTemp1530^2 + VarTemp1530^2 + Lieu:Annee + LieuOC:MoyTemp1530 + LieuOC:VarTemp1530 + Annee:MoyTemp1530 + Annee:VarTemp1530 + MoyTemp1530:VarTemp1530

Il s'écrit :

$$\begin{aligned}\text{logit}(\pi_{ij}(x)) = \mu + \text{Lieu}_i + \text{Annee}_j + \text{MoyTemp} * x_{\text{MoyTemp}} + \text{VarTemp} * x_{\text{VarTemp}} + \text{MoyTemp2} * x^2_{\text{MoyTemp}} \\ + \text{VarTemp2} * x^2_{\text{VarTemp}} + \text{LieuAnnee}_{ij} + \text{LieuMoyTemp}_i * x_{\text{MoyTemp}} + \text{LieuVarTemp}_i * x_{\text{VarTemp}} \\ + \text{AnneeMoyTemp}_j * x_{\text{MoyTemp}} + \text{AnneeVarTemp}_j * x_{\text{VarTemp}} + \text{MoyTempVarTemp} * x_{\text{MoyTemp}} x_{\text{VarTemp}}\end{aligned}$$

Avec :

$\pi_{ij}(x)$: probabilité qu'une huître élevée dans le lieu i, l'année j, exposée à une température x_{MoyTemp} et à une variance x_{VarTemp} soit touchée par la mortalité

Lieu_i : effet du lieu i, Annee_j : effet de l'année j, MoyTemp : effet de la moyenne de la température entre 15 et 30 jours avant le passage, VarTemp : effet de la variance de la température entre 15 et 30 jours avant le passage

LieuAnnee_{ij} : effet de l'interaction entre l'année i et le lieu j

LieuMoyTemp_i : effet de l'interaction entre la moyenne de la température entre 15 et 30 jours avant le passage et le lieu i

LieuVarTemp_i : effet de l'interaction entre la variance de la température entre 15 et 30 jours avant le passage et le lieu i

AnneeMoyTemp_j : effet de l'interaction entre la moyenne de la température entre 15 et 30 jours avant le passage et l'année j

$AnneeVarTemp_j$: effet de l'interaction entre la variance de la température entre 15 et 30 jours avant le passage et l'année j

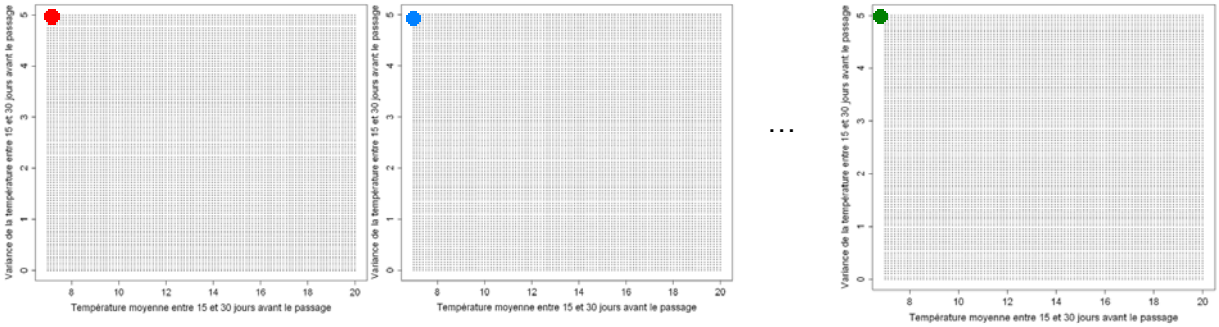
MoyTempVarTemp : Effet de l'interaction entre moyenne et variance de la température

Nous avons construit un modèle par Origine, c'est à dire un modèle pour le naissain issu du captage naturel et un autre pour le naissain provenant d'écloserie. Dans ces modèles, toutes les variables sont significatives et les taux d'erreur de classement par validation croisée sont très faibles (respectivement de 1,3% et 1,6%).

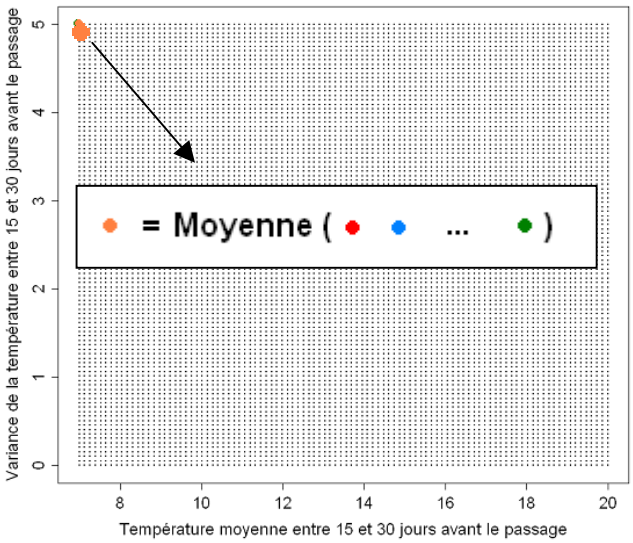
Pour chaque Origine, nous avons ainsi pu discrétiser le plan moyenne-variance et prédire pour chaque ensemble Lieu-Année le taux de mortalité correspondant à l'ensemble des couples (moyenne ; variance) du plan. Une moyenne en chaque point permet d'obtenir les taux de mortalité moyens associés à chaque couple (moyenne ; variance).

<u>Etape 1 :</u> Prédiction de la mortalité correspondant à chaque couple (moyenne, variance) pour chaque ensemble (Site ; Année).

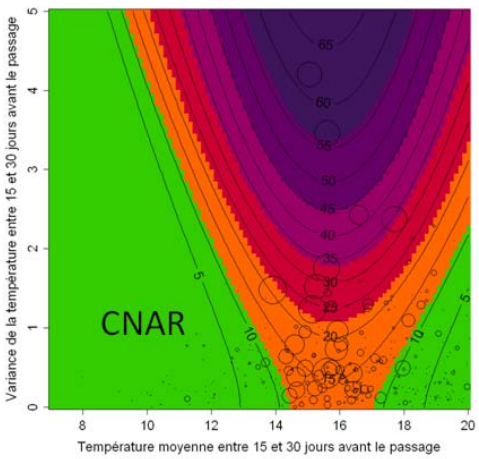
Géfosse - 2009 Géfosse - 2010 … Le Tès - 2011



<u>Etape 2 :</u> Moyenne sur l'ensemble des (Site ; Année) pour chaque couple (moyenne ; variance)



<u>Etape 3 :</u> Cartographie du plan obtenu



ANNEXE V : Modèle de Cox

DES ETUDES CLINIQUES

Traitement statistique

LE MODÈLE DE COX EN PRATIQUE

En épidémiologie étiologique, on est amené à ***prendre en compte simultanément le rôle de plusieurs facteurs de risque dans la survenue d'une maladie****. En recherche clinique, on cherche à établir la relation liant une maladie à des facteurs pronostiques.* ***Les modèles multivariés*** *permettent de* ***représenter la variable étudiée en fonction de plusieurs autres variables****. Les principaux modèles utilisés sont la régression linéaire multiple, la régression logistique et le modèle de Cox. Le choix du type de modèle est lié à la nature des variables considérées.*

- ***La régression linéaire multiple****. La variable à expliquer est quantitative, sa distribution est normale.*
- ***La régression logistique****. La variable à expliquer est dichotomique, les variables explicatives peuvent être qualitatives ou quantitatives. Ce modèle permet de déterminer* ***la probabilité*** *de survenue de l'événement étudié en fonction des facteurs explicatifs.*
- ***Le modèle de Cox****. La variable à expliquer est dichotomique, les variables explicatives peuvent être qualitatives ou quantitatives. Ce modèle permet d'exprimer* ***le risque instantané*** *de survenue de l'événement en fonction des facteurs explicatifs.*

1 Principe généraux et définitions

Le modèle de Cox s'applique à toute situation où l'on étudie **le délai de survenue d'un événement.** Cet événement peut être la récidive d'une maladie, la réponse à un traitement, le décès,... Les sujets entrent dans l'étude au fur et à mesure qu'elle se déroule. Pour chaque sujet, on connaît la date **du début de l'observation** ***(date d'origine)***, la date **des dernières nouvelles** et **l'état** par rapport à l'événement étudié.

Les sujets pour lesquels on ne connaît pas l'état à la date de fin de l'étude ou ceux dont la réponse par rapport à la survenue de l'événement est négative constituent **des données censurées.**

Les valeurs des **variables explicatives** X_j sont notées pour chaque sujet à la date de son entrée dans l'étude. Ces variables peuvent être **qualitatives** ou **quantitatives.**

La variable considérée T est le **délai** entre la date d'**origine** et la date de **survenue de l'événement étudié.** Le modèle de Cox permet d'exprimer le **risque instantané** de survenue de l'événement en fonction de **l'instant t** et des **variables explicatives** X_j. Ces variables peuvent représenter des facteurs de risque, des facteurs pronostiques, des traitements, des caractéristiques intrinsèques au sujet, ...

■ **Le risque instantané** de survenue de l'événement $\lambda(t, X_1, X_2, ..., X_p)$ représente **la probabilité d'apparition** de l'événement dans un intervalle de temps [t, t+Δt] sachant que l'événement **ne s'est pas réalisé** avant l'instant t.

Le modèle de Cox exprime $\lambda(t, X_1, X_2, ..., X_p)$ sous la forme :

$$\lambda(t, X_1, X_2, ..., X_p) = \lambda_0(t) \exp\left\{\sum_{j=1}^{p} \beta_j X_j\right\}$$

Cette formule appelle quelques commentaires.

- Le risque instantané se décompose en 2 termes dont l'un **dépend du temps t** et l'autre **des variables** X_j.
- Si par exemple, les variables X_j représentent des **facteurs de risque** et si elles sont toutes égales à 0, $\lambda_0(t)$ est **le risque instantané** de sujets ne présentant **aucun facteur de risque**.
- La forme de $\lambda_0(t)$ n'étant pas précisée, c'est plutôt **l'association** entre les **variables** X_j et la **survenue** de l'événement considéré qui est l'intérêt central du modèle. Cela revient à **déterminer les coefficients** β_j.
- Le rapport des **risques instantanés** de 2 individus dont les caractéristiques respectives sont $(X_1, X_2, ..., X_p)$ et $(X'_1, X'_2, ..., X'_p)$ est :

$$\frac{\lambda(t, X_1, X_2, ..., X_p)}{\lambda(t, X'_1, X'_2, ..., X'_p)} = \frac{exp(\sum \beta_j X_j)}{exp(\sum \beta_j X'_j)}$$

Ce rapport ne dépend pas du temps. De tels modèles sont dits à **risques proportionnels**. C'est une hypothèse importante du modèle de Cox.

2

Interprétation des coefficients

Variable X dichotomique.
X prend les valeurs 0 ou 1 selon l'absence ou la présence de la caractéristique considérée. Le rapport des risques instantanés des sujets de la classe 1 par rapport à la classe 0 est :

$$\frac{\lambda(t, 1)}{\lambda(t, 0)} = e^{\beta}.$$

Le coefficient β est donc le **logarithme du risque instantané** relatif de **la classe 1** par rapport à **la classe 0**.

De façon générale, les coefficients β_j représentent **l'effet** de **la caractéristique** X_j et **la survenue** de l'événement.Si β_j est **nul**, la j-ième caractéristique n'a **pas d'influence** sur l'événement considéré.Si β_j est **positif** et si 2 sujets ne diffèrent que par la j-ième caractéristique, des **valeurs élevées** de la j-ième caractéristique sont associées à **un risque instantané plus élevé**. Inversement si β_j est **négatif**, des valeurs élevées de la j-ième caractéristique sont associées à **un risque instantané plus faible**.

3

Estimation et tests

Le principe pour le modèle de Cox est de **n'estimer que les coefficients** β_j. On ne cherche pas à estimer $\lambda_0(t)$. Les estimateurs des β_j sont obtenus par **la méthode du maximum de vraisemblance**. Plus exactement, seule la partie de la vraisemblance comportant de l'information sur les coefficients β_j est retenue pour les calculs. On parle de "**vraisemblance partielle**" ou de "**vraisemblance de Cox**".
On teste l'hypothèse H_0 que le vecteur des effets $(\beta_1, \beta_2, ... \beta_p)$ est nul. 3 tests peuvent être utilisés : le test du score, le test de Wald et le test du rapport de vraisemblance.

LE MODÈLE DE COX EN PRATIQUE

4

Conclusion

Chacun des modèles multivariés que nous avons évoqué en introduction est plus adapté à un contexte qu'à un autre.
Le modèle de Cox est adapté aux données dont le délai de suivi est variable selon les sujets et aux données censurées. Si la période de suivi est fixe et qu'il n'y a pas de données censurées, le modèle de régression logistique convient aussi bien que le modèle de Cox.
Dans la formalisation du modèle de Cox, nous avons présenté le modèle sans interaction entre les variables explicatives.Il est possible de tenir compte de **l'effet de l'interaction** dans l'écriture du modèle.
Le modèle de Cox repose sur des hypothèses précises.
Le risque instantané de survenue de l'événement considéré s'écrit comme le produit d'une fonction qui dépend du temps et d'une fonction qui dépend uniquement des caractéristiques du sujet.
C'est l'hypothèse des risques proportionnels. C'est aussi un modèle multiplicatif.Le risque instantané de survenue de l'événement est multiplié par une constante quand on change la valeur d'une variable explicative.

FOVEA
3 bis, Chemin de la Jonchère – 92500 Rueil-Malmaison – Contact : Isabelle PASCAL
Tél. 01.47.14.04.95 – Fax : 01.47.16.11.10 – E-mail : foveaclin@aol.com

ANNEXE VI : Modèles étudiés

➔ **Modèle linéaire généralisé**

Le modèle linéaire généralisé permet de déterminer le risque de mortalité en fonction des différents facteurs : il cherche à expliquer le nombre d'huîtres mortes et le nombre d'huîtres vivantes à chaque passage en fonction de ces facteurs.

Sans les données phytoplancton, salinité et exondation, il conclu à un effet des variables suivantes sur le risque de mortalité :

- **LieuOC :** Le risque de mortalité est différent selon les lieux.
- **AnneesOC :** Le risque de mortalité est différent selon les années.
- **OriginePop :** Le risque de mortalité est divisé par 2,5 chez les huîtres provenant d'écloserie.
- **Captage** : Le risque de mortalité est différent selon la provenance des captages.
- **TotVivPoidsIndiv :** Plus le poids des huîtres est élevé, plus le risque de mortalité est faible : lorsque le logarithme du poids moyen des huîtres augmente d'une unité, le risque de mortalité est divisé par 2.
- **TxCroisPassage :** Plus la croissance des huîtres est forte, plus le risque de mortalité est élevé : lorsque le logarithme du taux de croissance des huîtres augmente d'une unité, le risque de mortalité est multiplié par 2.
- **MoyTemp1530 :** Plus la température est élevée, plus le risque de mortalité est élevé. C'est entre 14°C et 15°C que le risque est le plus important : il est multiplié par 50 par rapport au risque à une température inférieure à 14°C.
- **VarTemp1530 :** Plus la variance de la température augmente, plus le risque de mortalité est élevé. Une variance comprise entre 2 et 4,5 entraîne un risque 300 fois plus élevé qu'une variance comprise entre 0 et 1.
- **FreqOSHV1 :** Plus la fréquence d'OSHV1 détectée dans les huîtres est élevée, plus le risque de mortalité est important : une augmentation d'une unité de la fréquence multiplie le risque par 1,03.
- **FreqAes :** Plus la fréquence de *Vibrio Aestuarianus* détectée dans les huîtres est élevée, plus le risque de mortalité est important : une augmentation d'une unité de la fréquence multiplie le risque par 4.

De nombreuses interactions sont aussi significatives, notamment :

- **LieuOC:AnneesOC, AnneesOC:OriginePop :** L'effet du site et de l'origine de la population sur la mortalité dépend des années.

- **LieuOC:TotVivPoidsIndiv,LieuOC:TxCroisPassage,AnneesOC:TotVivPoidsIndiv AnneesOC:TxCroisPassage, OriginePop:TotVivPoidsIndiv :** L'effet du poids et de la croissance sur la mortalité varie en fonction du site, de l'année et de l'origine de la population.

- **LieuOC:FreqOSHV1, LieuOC:FreqSpl, LieuOC:FreqAes :** L'effet des pathogènes sur la mortalité varie en fonction du site.

- **AnneesOC:FreqOSHV1, OriginePop:FreqOSHV1, Captage:FreqOSHV1 :** L'effet du virus OSHV1 sur la mortalité varie en fonction de l'année, de l'origine de la population et du captage.

- **MoyTemp1530:VarTemp1530, LieuOC:MoyTemp1530, LieuOC:VarTemp1530, AnneesOC:MoyTemp1530,AnneesOC:VarTemp1530, OriginePop:MoyTemp1530 :** Comme nous l'avons vu dans le paragraphe précédent (paragraphe 3.2.1), l'effet de la température moyenne sur la mortalité varie en fonction de la variance. Il varie aussi en fonction du site, de l'année et de l'origine.

- **FreqOSHV1:FreqSpl, FreqOSHV1:FreqAes, FreqSpl:FreqAes :** L'effet de chaque pathogène dépend des autres. Ces interactions reflètent en fait les liens entre ces variables : lorsqu'il y a un taux élevé d'OSHV1 il y a peu de *Vibrio Splendidus* et de *Vibrio Aestuarianus*. Les *Vibrio Splendidus* et *Vibrio Aestuarianus* sont par contre corrélés positivement.

L'introduction des données phytoplancton, salinité et exondation dans le modèle montre un effet significatif des variables Chloroa, Pheo et TExondPred7 : plus les valeurs pour ces variables sont élevées plus le risque de mortalité est faible. L'effet de ces variables sur la mortalité dépend aussi des sites et des années.

➔ **Modèle de Cox**

Nous avons ensuite utilisé un modèle de Cox afin de prendre en compte le délai de survie avant les pics de mortalité. Ce modèle permet d'exprimer le risque instantané d'apparition d'un pic en fonction des différents facteurs explicatifs. Il a pour but d'expliquer la présence ou non d'un pic à un instant t en fonction de ces facteurs. Ce modèle sélectionne les variables suivantes :

- **LieuOC :** Le risque d'apparition d'un pic est différent selon les lieux.

- **AnneesOC :** Le risque d'apparition d'un pic est différent selon les années.

- **OriginePop :** Le risque d'apparition d'un pic est divisé par 4 chez les huîtres provenant d'écloserie.

- **Captage :** Le risque d'apparition d'un pic est différent selon la provenance des captages.

- **TotVivPoidsIndiv :** Plus le poids des huîtres est élevé, plus le risque de mortalité est faible : lorsque le logarithme du poids moyen des huîtres augmente d'une unité, le risque d'apparition d'un pic est divisé par 400.

- **TxCroisPassage :** Plus la croissance des huîtres est forte, plus le risque de mortalité est élevé : lorsque le logarithme du taux de croissance des huîtres augmente d'une unité, le risque d'apparition d'un pic est multiplié par 8.

- **MoyTemp1530 :** Plus la température est élevée, plus le risque d'apparition d'un pic est élevé. C'est entre 14°C et 15°C que le risque est le plus important : il est multiplié par 3 par rapport au risque à une température inférieure à 14°C.

- **VarTemp1530 :** Plus la variance de la température augmente, plus le risque d'apparition d'un pic est élevé. Une variance comprise entre 2 et 4,5 entraîne un risque 2 fois plus élevé qu'une variance comprise entre 0 et 1.

- **FreqOSHV1 :** Plus la fréquence d'OSHV1 détectée dans les huîtres est élevée, plus le risque d'apparition d'un pic est important.

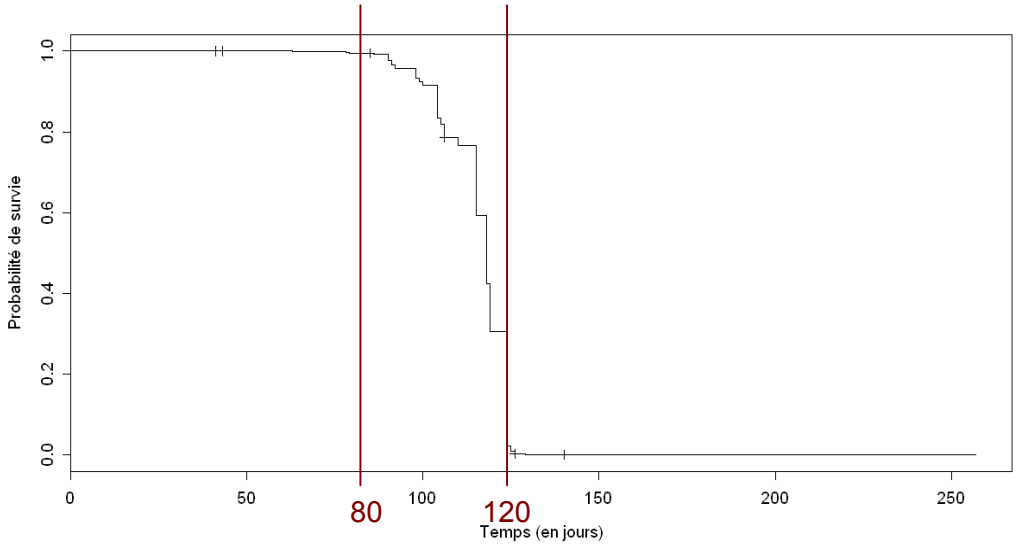
- **FreqSpl :** Plus la fréquence de *Vibrio Splendidus* détectée dans les huîtres est élevée, plus le risque d'apparition d'un pic est important.

- **FreqAes :** Plus la fréquence de *Vibrio Aestuarianus* détectée dans les huîtres est élevée, plus le risque d'apparition d'un pic est important.

De même que dans le modèle précédent (paragraphe 3.2.2.1), les interactions : LieuOC:AnneesOC, AnneesOC:OriginePop, LieuOC:TxCroisPassage, OriginePop:MoyTemp1530, AnneesOC:TxCroisPassage, MoyTemp1530:VarTemp1530, FreqOSHV1:FreqSpl, FreqOSHV1:FreqAes et FreqSpl:FreqAes sont significatives.

Le modèle de Cox permet aussi d'obtenir une estimation de la fonction de survie, c'est à dire une estimation de la probabilité qu'il n'y ait pas de pic au temps t.

Cette fonction, représentée sur le graphique suivant, nous montre que la probabilité d'apparition d'un pic augmente à partir de 80 jours et est maximale à partir de 120.



Graphique : Fonction de survie estimée

L'introduction des données phytoplancton, salinité et exondation dans le modèle montre un effet significatif des variables Salinite et TExondPred7 : plus les valeurs pour ces variables sont élevées plus le risque de mortalité est faible.

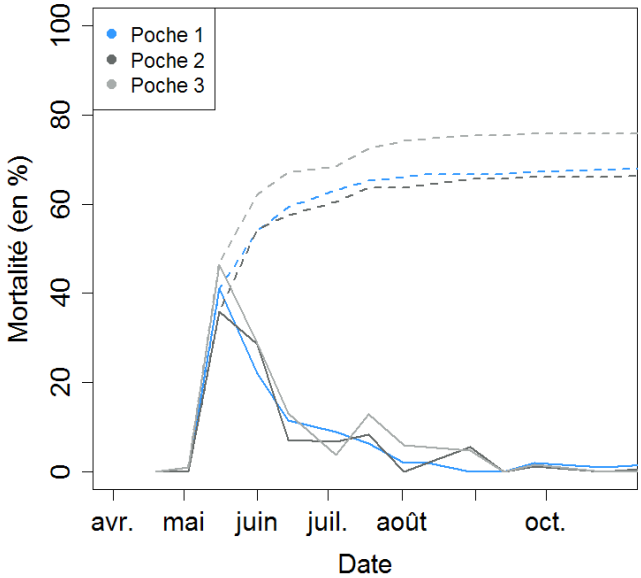
Ces modèles sont des modèles explicatifs et non prédictifs, notons cependant que leurs taux d'erreur par validation croisée sont environ de 16%.

ANNEXE VII : Comparaison inter-poches des cinétiques de mortalité

Le jeu de données ne permet pas de tester l'influence de l'effet poche sur la mortalité. Nous disposons cependant de 13 ensembles Site-Année-Lot (liste Tableau 4) pour lesquels **les comptages ont été faits régulièrement sur l'ensemble des trois poches**. A partir de ceux-ci, nous souhaitons savoir :

- Si les cinétiques de mortalité des 3 poches sont semblables, c'est à dire si les pics de mortalité ont lieu simultanément dans les trois poches d'un lot pour un site et une année donnée

- S'il existe des différences significatives dans les mortalités cumulées finales des 3 poches d'un lot pour un même ensemble (Lieu ; Année)



Graphique : Mortalité instantanée et cumulée – Naissain 2N Arcachon – Pointe du Château 2011

Nous avons commencé par comparer graphiquement (exemple Graphique ci-dessus) les courbes de mortalité instantanée pour les 13 ensembles de poches dont nous disposons. Les résultats montrent que **les pics de mortalité ont lieu simultanément sur les trois poches**. Cependant, les comptages ayant lieu tous les 15 jours, la variabilité des départs peut être masquée par ce pas de temps.

Nous avons ensuite effectué des tests de comparaison des taux de mortalité finaux des trois poches pour chaque ensemble (Site ; Année ; Lot).

Hypothèses :
H0 : Il n'y a pas de différence significative entre les taux de mortalité des trois poches

H1 : Il y a une différence significative entre les taux de mortalité des trois poches (au moins un taux diffère des deux autres)

La statistique de test est la suivante : $\sum_{i,j} \frac{(O_{ij} - T_{ij})^2}{T_{ij}} \rightarrow \chi^2_{(L-1)(C-1)ddl}$

O_{ij} : Effectifs observés pour la modalité i de la variable mortalité et la modalité j de la variable poche

T_{ij} : Effectifs théoriques pour la modalité i de la variable mortalité et la modalité j de la variable poche

La statistique de test suit une loi du Khi2 à (Nombre de lignes-1)(Nombre de colonnes-1) degrés de liberté sous H0.

On rejette H0 lorsque la P-value du test est inférieure au seuil fixé (soit quand la statistique de test est supérieure à la valeur du Khi2 correspondant au seuil). Nous étudierons ici les seuils de 5% et 10%.

NB : les conditions d'application du test sont réunies : les observations sont indépendantes et les effectifs théoriques supérieurs à 5.

Les résultats de ces tests (Tableau suivant) montrent que la question mérite d'être approfondie : **6 cas sur 13 présentent des différences de mortalité significatives entre les trois poches au seuil 5% (**seulement 4 cas sur 13 au seuil 10%).

Naissain 2N captage naturel			
Arcachon	Année	P-Value	
Pointe du Château	2009	1,893e-07	•
Pointe du Château	2010	0,173	✓
Pointe du Château	2011	0,03293	✓
Loix-en-Ré	2009	1,429e-05	•
D'Agnas	2009	0,06088	✓
Le Tes	2009	0,04245	✓
Marennes-Oléron			
Pointe du Château	2011	0,1907	✓

Naissain 3N écloserie			
Ecloserie A	Année	P-Value	
Pointe du Château	2010	0,00532	•
Mélange d'écloseries			
Pointe du Château	2009	0,2236	✓
Loix-en-Ré	2009	0,06692	✓
D'Agnas	2009	0,6794	✓
Le Tes	2009	0,01134	•
Ecloserie B			
Pointe du Château	2010	0,05938	✓

✓ Il n'y a pas de différences entre les mortalités finales des trois poches (au seuil 5%)
✓ Il n'y a pas de différences entre les mortalités finales des trois poches (au seuil 10%)
• Il y a une différence entre les mortalités finales des trois poches

Tableau : P-Values des tests de comparaison des proportions de mortalité finale des trois poches

Il serait intéressant de mettre en parallèle le positionnement des poches sur site et les résultats des tests de comparaison de proportion : y a t il un lien entre la proximité des poches sur les tables et le fait d'avoir une différence ou non entre les taux de mortalité finaux de ces poches ?

Par ailleurs, un plan d'expérience permettant de prendre en compte cet effet serait utile. Une étude a déjà été menée dans ce sens (J Normand, com.pers), cependant, le plan d'expérience proposé nécessite des moyens techniques très importants, d'où la difficulté pour le mettre en place.

ANNEXE VIII : Test de l'influence du comptage régulier des huîtres sur la mortalité

Nous souhaitons ici étudier l'influence des comptages réguliers des huîtres sur la mortalité. Nous supposons en effet qu'une manipulation fréquente des huîtres peut être source de stress et donc les fragiliser.

Seuls les suivis de l'année 2011 sont pris en compte dans l'analyse étant donné que c'est la seule année pour laquelle nous disposons d'informations sur les deux poches qui n'ont pas été suivies régulièrement. Rappelons que les manipulations effectuées sur les poches sont les suivantes :

- Poche 1 : Comptages tous les 15 jours et prélèvements
- Poche 2 : Comptages occasionnels et prélèvements
- Poche 3 : Comptages en début et fin de suivi

Il n'y a pas toujours de traçabilité des prélèvements, transferts… effectués sur ces poches, la fiabilité de ces données est donc difficile à estimer.

Pour chaque site de l'Observatoire, nous disposons des informations suivantes :

Lieu	Origine	Captage	Poche	Taux de mortalité
Géfosse	Captage naturel	Arcachon	Poche 1	68,7%
Géfosse	Captage naturel	Arcachon	Poche 2	75,9%
Géfosse	Captage naturel	Arcachon	Poche 3	51,4%
Géfosse	Captage naturel	Marennes-Oléron	Poche 1	61,2%
Géfosse	Captage naturel	Marennes-Oléron	Poche 2	60,9%
Géfosse	Captage naturel	Marennes-Oléron	Poche 3	63,9%
Géfosse	Ecloserie	Ecloserie A	Poche 1	43,5%
Géfosse	Ecloserie	Ecloserie A	Poche 2	21,7%
Géfosse	Ecloserie	Ecloserie A	Poche 3	12,1%
Blainville	Captage naturel	Arcachon	Poche 1	63,2%
…	…	…	…	…

Effets hiérarchisés :
chaque Origine a ses propres Captages

Tableau : Présentation des données par poche

Nous pouvons remarquer que chaque origine a ses propres captages, ces deux facteurs sont donc hiérarchisés (Captage étant imbriqué dans Origine).

Deux sites ont été retirés de l'étude : Pointe du château (car dans ce lieu toutes les poches ont été suivies régulièrement) et Morlaix (car valeurs aberrantes dans la poche 2).

Le plan d'expérience est considéré comme peu déséquilibré même si il n'y a qu'un captage pour l'origine Ecloserie.

Le facteur comptage a trois niveaux. Les trois niveaux du facteur comptage correspondent en fait aux numéros des poches.

Dans un premier temps, les effets des différents facteurs ont été analysés à l'aide d'un modèle linéaire généralisé :

Mortalité = Lieu + Origine + Captage(dans Origine) + Poche + Lieu:Origine + Lieu:(Captage(dans Origine)) + Lieu:Poche + Origine:Poche + Poche:(Captage(dans Origine)) + Lieu:Origine:Poche + Lieu:(Captage(dans Origine)):Poche

Il s'écrit :

$$\text{logit}(\pi_{ijkl}(x)) = \mu + \text{Lieu}_i + \text{Origine}_j + \text{Captage}_{k/j} + \text{Poche}_l + \text{LieuOrigine}_{ij} + \text{LieuCaptage}_{ik/j} + \text{LieuPoche}_{il} + \text{OriginePoche}_{jl} + \text{PocheCaptage}_{lk/j} + \text{LieuOriginePoche}_{ijl} + \text{LieuOrigineCaptage}_{ijk/j}$$

Avec :

$\pi_{ijkl}(x)$: probabilité qu'une huître d'origine j, de captage k, élevée dans le lieu i dans la poche l soit touchée par la mortalité

Lieu_i : effet du lieu i, Origine_j : effet de l'origine j, $\text{Captage}_{k/j}$: effet du captage k, Poche_l : effet de la poche l

Les effets d'interaction s'interprètent de la manière suivante : LieuOrigine_{ij} : effet de l'interaction entre le lieu i et l'origine j

Une procédure de sélection de modèle avant/arrière nous a permis de retenir les variables : Site, Origine de le population et Poche et les interactions Site:Origine, Site:Poche, Origine:Poche, Site:Origine:Poche.

L'effet du suivi est donc significatif, on n'observe pas de différence entre les suivis réguliers (Poche 1) et occasionnels (Poche 2) mais le fait de **ne pas effectuer de comptages (Poche 3) divise le risque de mortalité par 1,32**.

Nous aurions pu considérer l'effet lieu comme aléatoire, partant du principe que les sites choisis sont des sites représentatifs des sites ostréicoles français. Les autres effets : Origine, Captage et Suivi sont fixes car on s'intéresse en particulier aux modalités étudiées.

Nous avons donc réalisé une analyse de variance afin de mettre en évidence les facteurs ayant une influence sur la mortalité. C'est une méthode qui permet de modéliser la relation entre une variable quantitative et plusieurs variables qualitatives.

Le modèle étudié contient les effets principaux et les interactions d'ordre 2 et 3.

$Mortalité_{ijkl}$ = Moyenne + $LIEU_i$ + $Origine_j$ + $Captage_{k|j}$ + $Poche_l$ + $LIEU{:}Origine_{ij}$ + $LIEU{:}Captage_{i(k|j)}$ + $LIEU{:}Poche_{il}$ + $Poche{:}Origine_{jl}$ + $Poche{:}Captage_{(k|j)l}$ + LIEU: $Poche{:}Origine_{ijl}$ + LIEU: $Poche{:}Captage_{ij(k|j)}$ + $Erreur_{ij(k|j)l}$

Avec les hypothèses suivantes pour les effets aléatoires :

$LIEU_i$ iid : $LIEU_i \sim N(0 ; \sigma_{LIEU})$

$LIEU{:}Origine_{ij}$ iid : $LIEU{:}Origine_{ij} \sim N(0 ; \sigma_{LIEU\ :Origine})$

$LIEU{:}Captage_{i(k|j)}$ iid : $LIEU{:}Captage_{i(k|j)} \sim N(0 ; \sigma_{LIEU\ :Captage})$

$LIEU{:}Suivi_{il}$ iid : $LIEU{:}Suivi_{il} \sim N(0 ; \sigma_{LIEU\ :Suivi})$

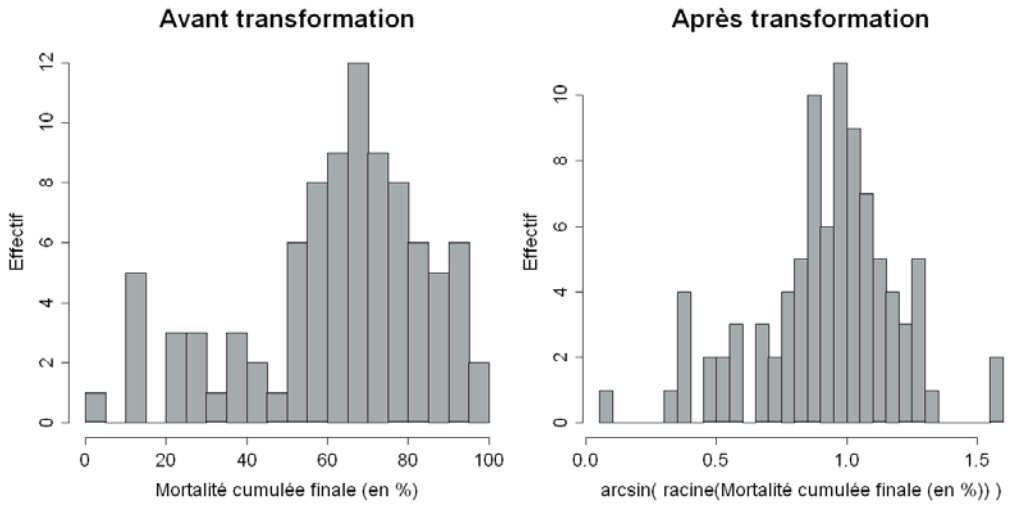
$LIEU{:}Suivi{:}Origine_{ijl}$ iid : $LIEU{:}Suivi{:}Origine_{ijl} \sim N(0 ; \sigma_{LIEU\ :Suivi\ :Origine})$

$LIEU{:}Suivi{:}Captage_{ij(k|j)}$ iid : $LIEU{:}Suivi{:}Captage_{ij(k|j)} \sim N(0 ; \sigma_{LIEU\ :Suivi\ :Captage})$

$Erreur_{ij(k|j)l}$ iid : $Erreur_{ij(k|j)l} \sim N(0 ; \sigma)$
Ces effets étant tous indépendants deux à deux.
L'effet poche est confondu avec l'erreur.

La contrainte pour les effets fixes étant que la somme des coefficients pour leurs différentes modalités est nulle.

La variable à expliquer est le taux de mortalité final. C'est une variable qualitative binomiale, une transformation arcsinus($\sqrt{\ }$ (Mortalité cumulée)) a donc été effectuée au préalable afin de stabiliser la variance.



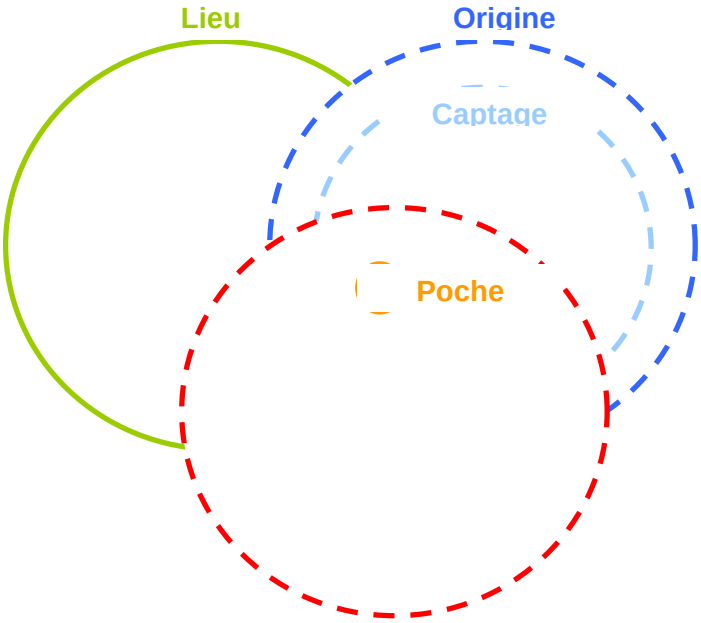
Graphique : Transformation arcsin(racine(mortalité cumulée))

Nous pouvons considérer que la distribution suit une loi normale (p-values des test Shapiro-Wilk et Kolmogorov-Smirnov <5%).

Nous avons réalisé un diagramme des effets afin de réaliser les tests.

- Chaque origine est présente dans tous les lieux ➔ interaction
- Chaque origine a ses propres captages ➔ imbriqué
- Chaque captage de chaque origine est présent dans tous les lieux ➔ interaction
- Chaque captage de chaque origine a ses propres poches ➔ interaction
- Chaque type de suivi est réalisé avec toutes les origines, tous les captages et dans tous les lieux ➔ interaction
- Chaque type de suivi a ses propres poches ➔ imbriqué
- Chaque lieu a ses propres poches ➔ imbriqué

Cela peut être représenté par le diagramme des effets ci-dessous :



Graphique : Diagramme des effets (Influence des comptages réguliers)

Tests :

Effet testé	Hypothèses du test		Statistique de test	Loi de la statistique de test sous H0
	H0	H1		
LIEU	$\sigma_{LIEU} = 0$	$\sigma_{LIEU} \neq 0$	$F_{obs} = \frac{CM_{LIEU}}{CM_{Résiduelle}}$	$F_{obs} \sim F^{9}_{30}$
Origine	$\forall$ j, $Origine_j = 0$	$\exists$ j / $Origine_j \neq 0$	$F_{obs} = \frac{CM_{Origine}}{CM_{LIEU:Origine}}$	$F_{obs} \sim F^{1}_{9}$
Captage	$\forall$ k, $Captage_{k\|j} = 0$	$\exists$ k / $Captage_{k\|j} \neq 0$	$F_{obs} = \frac{CM_{Captage}}{CM_{LIEU:Captage}}$	$F_{obs} \sim F^{1}_{9}$
Suivi	$\forall$ l, $Suivi_l = 0$	$\exists$ l / $Suivi_l = 0$	$F_{obs} = \frac{CM_{Suivi}}{CM_{LIEU:Suivi}}$	$F_{obs} \sim F^{1}_{9}$

LIEU:Origine	$\sigma_{LIEU:Origine} = 0$	$\sigma_{LIEU:Origine} \neq 0$	$F_{obs} = \frac{CM_{LIEU:Origine}}{CM_{Résiduelle}}$	$F_{obs} \sim F^{9}_{30}$
LIEU:Captage	$\sigma_{LIEU:Captage} = 0$	$\sigma_{LIEU:Captage} \neq 0$	$F_{obs} = \frac{CM_{LIEU:Captage}}{CM_{Résiduelle}}$	$F_{obs} \sim F^{9}_{30}$
LIEU:Suivi	$\sigma_{LIEU:Suivi} = 0$	$\sigma_{LIEU:Suivi} \neq 0$	$F_{obs} = \frac{CM_{LIEU:Suivi}}{CM_{Résiduelle}}$	$F_{obs} \sim F^{9}_{30}$
Suivi:Origine	$\forall$ (j;l), $Suivi:Origine_{jl} = 0$	$\exists$ (j;l) / $Suivi:Origine_{jl} \neq 0$	$F_{obs} = \frac{CM_{Suivi:Origine}}{CM_{LIEU:Origine:Suivi}}$	$F_{obs} \sim F^{1}_{9}$
Suivi:Captage	$\forall$ (k;l), $Suivi:Captage_{(k\|j)l} = 0$	$\exists$ (k;l) / $Suivi:Captage_{(k\|j)l} \neq 0$	$F_{obs} = \frac{CM_{Suivi:Captage}}{CM_{LIEU:Captage:Suivi}}$	$F_{obs} \sim F^{1}_{9}$
LIEU:Suivi:Origine	$\sigma_{LIEU:Suivi:Origine} = 0$	$\sigma_{LIEU:Suivi:Origine} \neq 0$	$F_{obs} = \frac{CM_{LIEU:Origine:Suivi}}{CM_{LIEU:Captage:Suivi}}$	$F_{obs} \sim F^{9}_{9}$
LIEU:Suivi:Captage	$\sigma_{LIEU:Suivi:Captage} = 0$	$\sigma_{LIEU:Suivi:Captage} \neq 0$	$F_{obs} = \frac{CM_{LIEU:Captage:Suivi}}{CM_{Résiduelle}}$	$F_{obs} \sim F^{9}_{30}$

Tableau : Tests des effets (Influence des comptages réguliers)

Après sélection des variables les plus significatives, les effets qui ressortent sont :

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
Lieu	9	2.12961	0.23662	24.6301	<<1%	***
Origine	1	3.05182	3.05182	317.6631	<<1%	***
Poche	2	0.07439	0.03720	3.8717	0.0179	*
Captage	1	0.00440	0.00440	0.4581	0.6627	
Lieu:Origine	9	0.31364	0.03485	3.6274	0.0012	**
Lieu :Captage	9	0.19485	0.02165	2.2535	0.0308	*
Résidus	58	0.55721	0.00961			

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Tableau : Table d'analyse de variance (Influence des comptages réguliers)

Laboratoire de Mathématiques appliquées

Spécialité : Statistique appliquée

Enseignant : David Causeur (Master)

Auteur : Aude Jolivel

Etablissement d'accueil : IFREMER

Adresse : 12, rue des Résistants
56470 La Trinté-sur-Mer

Nombre de pages : 34

Annexes : 8 annexes

Année de soutenance : 2012

Maître de stage : Elodie Fleury

Titre du mémoire en français : Analyse statistique des données de mortalité d'huîtres acquises par l'Observatoire National Conchylicole

Titre du mémoire en anglais : Statistical analysis of oyster mortality data collected by the French National Observatory for shellfish culture

Résumé (Français) : Ce rapport s'appuie sur les données acquises de 2009 à 2011 par l'Observatoire National Conchylicole pour décrire les mortalités qui touchent, depuis 2008, le naissain d'huîtres creuses *Crassostrea Gigas*. Il a pour but d'étudier la dynamique d'apparition des épisodes de mortalité, dans différents sites et pour plusieurs types de lots, mais aussi d'identifier les facteurs déclencheurs de ces épisodes.

Abstract (English) : This report is based on data which were collected from 2009 to 2011 by the French National Observatory for shellfish culture, in order to describe the mortalities affecting *Crassostrea Gigas* oyser's spat since 2008. It aims at studying the appearance dynamic of mortality events in several sites and lots but also at identifying the factors that triggers those events.

Mots clés : Mortalité – Huître – Naissain – Température – Virus OSHV1 - *Crassostrea Gigas*