



HAL
open science

Revue systématique de la littérature relative aux facteurs de risque de mortalité des moules exploitées en France - Rapport du Conseil scientifique et technique du programme de recherche en santé des coquillages : étude éco-épidémiologique

Coralie Lupo, Stéphanie Bougeard, Claire Chauvin, Morgane Danion, Gwenhael Allain, Patrick Azéma, Fabienne Benoit, Christian Bechemin, Karine Berger, Ismael Bernard, et al.

► To cite this version:

Coralie Lupo, Stéphanie Bougeard, Claire Chauvin, Morgane Danion, Gwenhael Allain, et al.. Revue systématique de la littérature relative aux facteurs de risque de mortalité des moules exploitées en France - Rapport du Conseil scientifique et technique du programme de recherche en santé des coquillages : étude éco-épidémiologique. [Rapport de recherche] Anses. 2019. hal-02087720

HAL Id: hal-02087720

<https://hal.science/hal-02087720>

Submitted on 2 Apr 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Revue systématique de la littérature relative aux facteurs de risque de mortalité des moules exploitées en France

RAPPORT

**Conseil scientifique et technique du programme de recherche en santé des
coquillages : étude éco-épidémiologique**

Janvier 2019



Mots clés

Mollusques marins, coquillages bivalves, moules, *Mytilus edulis*, *Mytilus galloprovincialis*, mortalité, facteurs de risque, épidémiologie, revue systématique, bibliographie

Key words

Marine molluscs, bivalve shellfish, mussels, *Mytilus edulis*, *Mytilus galloprovincialis*, mortality, risk factors, epidemiology, systematic review, bibliography



Présentation des intervenants

CONSEIL SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

Membres

M. Gwenhael ALLAIN – ARMERIA
M. Patrick AZEMA – DGAL
Mme Fabienne BENOIT – ADILVA
M. Christian BECHEMIN – IFREMER (à partir de juillet 2018)
Mme Karine BERGER – CNC (jusqu'en juillet 2017)
M. Ismaël BERNARD – Eurêka Modélisation
M. Philippe BLACHIER – CREEA
M. Jean-Louis BLIN – SMEL
Mme Léa BRIEAU - GEMEL-Normandie (à partir de novembre 2018)
Mme Aurélie GARCIA – GEMEL-Normandie (jusqu'en juillet 2018)
Mme Erika GERVASONI – CEPRALMAR (jusqu'en décembre 2017)
M. Philippe GLIZE – SMIDAP
Mme Audrey LAINE – CNC (à partir de mars 2018)
Mme Sylvie LAPEGUE – IFREMER (jusqu'en juillet 2018)
Mme Véronique LE BIHAN – Université de Nantes, Laboratoire d'Economie et de Management de Nantes Atlantique (IAE Economie & Management)
Mme Sophie LE BOUQUIN – Anses, Laboratoire de Ploufragan/Plouzané/Niort, Unité Epidémiologie, Santé et Bien-Etre (EPISABE)
M. Christophe LE LONG – Université de Caen, UMR Biologie des Organismes et Ecosystèmes Aquatiques (BOREA) / Centre de référence de l'huître (jusqu'en août 2018)
Mme Cécile MABLOUKE – CEPRALMAR (à partir de janvier 2018)
Mme Laurence POIRIER – Université de Nantes, Laboratoire Mer, Molécules, Santé (MMS EA2160) / UFR Sciences Pharmaceutiques
M. Jean Christophe RAYMOND – CNPMMEM
M. Michaël TREILLES – ADILVA

PARTICIPATION ANSES

Coordination scientifique

Mme Coralie LUPO – Anses, Laboratoire de Ploufragan/Plouzané/Niort / IFREMER

Contribution scientifique

Mme Stéphanie BOUGEARD – Anses, Laboratoire de Ploufragan/Plouzané/Niort, Unité Epidémiologie, Santé et Bien-Etre (EPISABE)
Mme Claire CHAUVIN – Anses, Laboratoire de Ploufragan/Plouzané/Niort, Unité Epidémiologie, Santé et Bien-Etre (EPISABE)
Mme Morgane DANION – Anses, Laboratoire de Ploufragan/Plouzané/Niort, Unité Pathologies Virales des Poissons (PVP)

BIBLIOTHEQUE LA PEROUSE

Mme Morgane LE GALL – Documentaliste

Résumé

La recherche bibliographique maximalisée réalisée dans le cadre de cette revue systématique de la littérature a permis de décrire le paysage de la connaissance existante sur les facteurs de risque de mortalité des espèces de moules *M. edulis* et *M. galloprovincialis*. Ces travaux ont abouti à la formalisation d'une méthodologie rigoureuse, transparente et reproductible pour la réalisation de revue systématique relative aux facteurs de risque de mortalité chez les coquillages marins.

Cette revue a décrit la diversité des définitions de la mortalité des moules et ses facteurs de risque. Elle a également permis d'apprécier la quantité et la qualité des preuves recensées. Cette revue systématique a recensé 125 facteurs étudiés pour leur relation avec la mortalité des moules par 151 études issues de 116 documents. Mais, au regard de la grande hétérogénéité des études, peu de facteurs de risque ont été finalement identifiés.

Chez les deux espèces de moules exploitées en France, une variation géographique du risque de mortalité a été mise en évidence de façon globale, sans que des caractéristiques particulières du site expliquant ces variations aient été identifiées. Seule la présence de prédateurs présente une responsabilité évidente en termes de mortalités mytilicoles. De même, une variation saisonnière du risque de mortalité a été mise en évidence, sans que des conditions climatiques particulières aient été identifiées à l'exception de vagues de chaleur. L'augmentation de la température de l'eau de mer (supérieure à 24°C pour *M. galloprovincialis* et supérieure à 20°C pour *M. edulis*) était le seul facteur d'exposition commun aux deux espèces de moules et identifié de façon consensuelle comme associé à un risque de mortalité des moules accru. Chez *M. galloprovincialis*, les facteurs d'exposition suivants ont été identifiés de façon consensuelle comme associés à une augmentation du risque de mortalité :

- l'accumulation de sable ou de sédiment sur un gisement ;
- la présence de fer dans l'eau de mer ;
- la présence de plomb dans l'eau de mer ;
- la présence de bactéries du genre *Vibrio*, de l'espèce *aestuarianus* ou du groupe *Splendidus*, associée à une température de l'eau de mer élevée et en conditions d'hypoxie.

Chez *M. edulis*, les moules issues de parents ayant naturellement survécu à un épisode de mortalité, *i.e.* ayant un génotype intraspécifique « sélectionné », présentaient un risque de mortalité diminué. Les facteurs suivants ont été identifiés de façon consensuelle comme associés à une augmentation du risque de mortalité :

- la présence, dans la population, d'une fréquence élevée de moules présentant plus de 10 % d'anomalies cytogénétiques dans leurs cellules hématocytaires (*i.e.* nombre anormal de chromosomes dans les hémocytes) ;
- l'augmentation de la durée d'enfouissement des animaux sur un gisement ;
- une augmentation de particules sédimentaires fines et la présence de vase ;
- la présence d'un agent infectieux transmissible, non identifié.

Si cette revue systématique a identifié plusieurs facteurs de risque de mortalité chez les moules exploitées en France, elle n'a pas permis de hiérarchiser ces facteurs de risque, ni leurs combinaisons. Par conséquent, ce bilan des connaissances existantes n'a pas permis de répondre à la question des commanditaires relative à l'identification et à la hiérarchisation des facteurs de risque de mortalité des moules exploitées en France. Toutefois, cette synthèse pourra orienter utilement la construction d'éventuelles futures études à mener sur le terrain pour compléter la connaissance des facteurs de risque de mortalité de moules. En particulier, elle a souligné la nécessité de prise en compte et d'exploration de l'action conjointe des nombreux facteurs d'exposition intervenant de manière simultanée dans le milieu naturel.

Le CST a formulé des recommandations et des propositions pour les recherches à venir, visant à identifier des facteurs de risque de mortalité de moules.

SOMMAIRE

Présentation des intervenants	3
Résumé.....	4
Liste des tableaux.....	8
Liste des figures	9
Glossaire	10
1 Introduction	11
1.1 Contexte.....	11
1.2 Stratégie de travail du CST.....	12
1.3 Intérêts et objectifs d'une revue systématique de la littérature.....	12
1.4 Modalités de travail : moyens mis en œuvre.....	13
2 Méthodologie	15
2.1 Etape 1 : Formulation de la question de revue systématique.....	15
2.2 Etape 2 : Stratégie de recherche documentaire.....	17
2.2.1 Sources de données	17
2.2.2 Equations de recherche	18
2.2.3 Test de la stratégie de recherche	18
2.3 Etape 3 : Sélection de la documentation pertinente.....	18
2.3.1 Identification des doublons.....	19
2.3.2 Examen des titres et résumés	19
2.3.3 Examen des textes intégraux	20
2.4 Etape 4 : Extraction des caractéristiques clés des études sélectionnées	20
2.5 Vérification collective de la sélection des références et de l'extraction des caractéristiques clés des études sélectionnées.....	20
2.6 Etape 5 : Evaluation de la pertinence méthodologique et de la transposition des résultats des études sélectionnées.....	21
2.6.1 Evaluation de la pertinence méthodologique pour identifier des facteurs de risque	21
2.6.2 Evaluation de la généralisation des résultats au contexte français	22
2.7 Etape 6 : Analyse des données et synthèse des caractéristiques et résultats des études retenues	23
2.7.1 Synthèse des résultats	23
2.7.2 Analyse des données	23
3 Résultats.....	25
3.1 Sélection des études.....	25
3.2 Caractéristiques des études incluses.....	26
3.3 Eventail des définitions de la mortalité des moules	35
3.4 Mesure de l'association d'un facteur d'exposition avec la mortalité des moules	37
3.5 Facteurs de risque de mortalité des moules identifiés.....	38

3.5.1	Caractéristiques des animaux	48
3.5.2	Caractéristiques du site	48
3.5.3	Conditions climatiques	50
3.5.4	Caractéristiques de l'eau de mer	50
3.5.5	Apports des milieux aquatiques et terrestres	51
3.5.6	Organismes pathogènes	52
3.5.7	Pratiques culturelles / d'élevage / de pêche	53
3.5.8	Etude des combinaisons de facteurs d'exposition	54
4	Discussion	58
4.1	Principaux enseignements	58
4.2	Limites de la revue	60
5	Conclusions et recommandations du CST.....	62
5.1	Conclusions.....	62
5.1.1	Sur l'identification des facteurs de risque de mortalité de moules.....	62
5.1.2	Sur la hiérarchisation des facteurs de risque	62
5.1.3	Sur la compréhension des interactions entre les facteurs.....	63
5.2	Priorités et recommandations pour les recherches à venir	63
5.3	Perspectives	66
6	Bibliographie.....	68
ANNEXES		76
Annexe 1 : Lettre de mission du Coordinateur national		77
Annexe 2 : Aspects pratiques		79
Annexe 3 : Equations de recherche		80
Annexe 4 : Grille d'inventaire		81
Annexe 5 : Liste de contrôle de la stratégie de recherche.....		82
Annexe 6 : Tableau des motifs d'exclusion des références à la lecture du texte intégral.....		84
Annexe 7 : Grille d'extraction des caractéristiques clés des études d'observation.....		91
Annexe 8 : Grille d'extraction des caractéristiques clés des études expérimentales.....		96
Annexe 9 : Valeurs de références utilisées pour évaluer la pertinence environnementale des études expérimentales sur les polluants		100
Annexe 10 : Bilan de la recherche bibliographique.....		103
Annexe 11 : Bilan de la vérification collective de la sélection des références		104
Annexe 12 : Représentation graphique de l'effet des facteurs étudiés sur le risque de mortalité des moules, par thématique.....		106
Annexe 13 : Liste des outils développés pour la réalisation de la revue systématique de la littérature.....		108



Sigles et abréviations

COPEEC : Comité de pilotage de l'étude éco-épidémiologique coquillages
CR/DPMEM : Comités régionaux/départementaux des pêches maritimes et des élevages marins
CNC : Comité national de la conchyliculture
CNPMEM : Comité national des pêches maritimes et des élevages marins
CRC : Comités régionaux de la conchyliculture
CST : Comité scientifique et technique
DEB : Direction de l'eau et de la biodiversité
DGAL : Direction générale de l'alimentation
DPMA : Direction des pêches maritimes et de l'aquaculture
LNR : Laboratoire national de référence
PNEC : Predicted no effect concentration
REPHY : Réseau d'observation et de surveillance du phytoplancton et de l'hydrologie dans les eaux littorales
RNO : Réseau national d'observation de la qualité du milieu marin
ROCCH : Réseau d'Observation de la contamination chimique du littoral
UFC : Unité formant colonie

Liste des tableaux

Tableau 1.	Critères d'inclusion des études existantes.....	17
Tableau 2.	Critères d'exclusion des études existantes.....	17
Tableau 3.	Outil de sélection des études à l'examen du titre et du résumé (outil n°5).....	20
Tableau 4.	Règles d'interprétation du coefficient Kappa (Landis and Koch, 1977).....	21
Tableau 5.	Critères d'évaluation de la pertinence méthodologique des études	21
Tableau 6.	Motifs d'exclusion des documents à la lecture intégrale (outil n°6).....	26
Tableau 7.	Caractéristiques descriptives des études incluses dans la revue systématique.....	27
Tableau 8.	Motifs de l'impossibilité de transposition de l'étude au contexte français.....	30
Tableau 9.	Répartition des études par thématiques des facteurs étudiés, pertinence méthodologique insuffisante et possibilités de transposition au contexte français ..	32
Tableau 10.	Critères de définition d'une moule morte dans les études expérimentales.....	35
Tableau 11.	Différents formats d'expression de la mortalité des moules dans les études d'observation.....	36
Tableau 12.	Méthodes d'estimation des mortalités dans les populations de moules dans les études d'observation	36
Tableau 13.	Différentes méthodes de comptage des mortalités de moules dans les études d'observation.....	36
Tableau 14.	Types de la mesure d'association entre la mortalité et le facteur étudié	37
Tableau 15.	Facteurs étudiés pour l'espèce <i>Mytilus galloprovincialis</i> , et effet rapporté sur le risque de mortalité (25 études d'observation et 45 études expérimentales).....	39
Tableau 16.	Facteurs étudiés pour l'espèce <i>Mytilus edulis</i> , études d'observation (N=45) et études expérimentales (N=36)	43
Tableau 17.	Espèces de prédateurs étudiées dans le corpus bibliographique : présence en France.....	49
Tableau 18.	Combinaisons de facteurs d'exposition étudiées pour <i>M. galloprovincialis</i>	56
Tableau 19.	Combinaisons de facteurs d'exposition étudiées pour <i>M. edulis</i>	57
Tableau 20.	Propositions de priorités de recherche à venir.....	63
Tableau 21.	Comparaison des concentrations d'exposition aux substances chimiques utilisées dans les études expérimentales aux PNEC.....	100
Tableau 22.	Répartition initiale des documents inclus ou exclus à l'examen des titre et résumé.....	104
Tableau 23.	Répartition des documents inclus et exclus à l'examen des titre et résumé, version conservative (« à clarifier » assimilé à « inclus »).....	105
Tableau 24.	Répartition des documents inclus et exclus à l'examen du texte intégral.....	105

Liste des figures

Figure 1.	Schémas d'étude utilisés en science de la santé animale et niveau de preuve associé.....	16
Figure 2.	Diagramme du processus de sélection des études pertinentes pour la question de revue systématique.....	19
Figure 3.	Diagramme de flux du processus de sélection de la documentation pertinente dans la revue systématique.....	25
Figure 4.	Répartition annuelle des études par espèce	29
Figure 5.	Répartition géographique des études, par espèce	30
Figure 6.	Thématiques des facteurs de risque de mortalité étudiées par espèce de moule et type d'étude.....	31
Figure 7.	Résultats de l'ACM : caractéristiques descriptives des études.....	33
Figure 8.	Résultat de l'ACM : thématiques des facteurs étudiés dans les études.....	34
Figure 9.	Fréquence d'estimation des mortalités.....	37
Figure 10.	Effet des facteurs étudiés sur le risque de mortalité des moules, par grande thématique de facteurs.....	107

Glossaire

Causalité : relation entre les causes et les effets qu'elles produisent. Dans le cadre d'un syndrome multifactoriel, plus le nombre de facteurs étiologiques présents est important, plus le risque est élevé ; mais la maladie peut apparaître en l'absence d'un ou plusieurs de ces facteurs (Toma et al., 1991)

Cause : variable ou facteur dont la responsabilité est clairement démontrée dans un phénomène (Toma et al., 1991)

Etude éco-épidémiologique : recherche méthodique d'informations visant à connaître et/ou à comprendre à une échelle hiérarchique, multiniveau. L'éco-épidémiologie rend compte de l'interdépendance des individus et de la connexion entre différents niveaux d'organisation (moléculaires, individuels, socio-environnementaux) participant au processus causal des maladies. L'objectif de cette approche épidémiologique hiérarchique est de définir le niveau auquel il est préférable d'agir pour résoudre au mieux la question de santé posée (Susser and Susser, 1996)

Facteur de risque : facteur associé à l'augmentation de la probabilité d'apparition ou de développement d'un phénomène pathologique. L'association de multiples facteurs de risque est souvent liée à l'apparition ou au développement de phénomènes pathologiques (Toma et al., 1991)

Schéma d'étude : type d'étude, choisi en fonction de l'objectif recherché. En épidémiologie, les deux grands schémas d'étude sont : expérimental ou d'observation. Au sein des études d'observation, on distingue principalement les études descriptives (longitudinales ou transversales), des études analytiques (études de cohortes, cas-témoins ou transversales). Le choix du schéma d'étude a des implications sur la mise en place de l'étude elle-même, l'analyse des données, ainsi que sur l'interprétation et la portée de ses résultats.

Validité externe : capacité d'une étude épidémiologique de mesurer ce qu'elle est censée mesurer, sans être influencée par des sources d'erreurs aléatoires ou systématiques. La validité interne est relative aux possibilités d'extrapoler les conclusions de l'observation (en supposant que la validité interne soit validée) à une population, « externe », c'est-à-dire en d'autres lieux, ou à d'autres moments. Le risque, en effet est que ces conclusions ne soient valides que pour la population étudiée (Toma et al., 1991)

Validité interne : capacité d'une étude épidémiologique de mesurer ce qu'elle est censée mesurer, sans être influencée par des sources d'erreurs aléatoires ou systématiques. La validité externe caractérise la qualité des conclusions de l'étude relative à la population étudiée. La validité interne porte tout d'abord sur l'inférence statistique de l'échantillon étudié à la population éligible (problèmes de précision, biais de sélection, biais de mesure, biais dû à un facteur de confusion). Elle concerne également la qualité de l'interprétation vis-à-vis de la population cible : les divers biais évoqués peuvent en effet conduire à des conclusions totalement erronées (Toma et al., 1991)

1 Introduction

1.1 Contexte

Des mortalités de coquillages exploités en France sont régulièrement observées et étudiées. Au cours de la dernière dizaine d'années, plusieurs épisodes de mortalités massives ont été rapportés sur différentes espèces de coquillages (source : réseau Repamo/Ifremer), par exemple :

- naissains d'huîtres creuses, *Crassostrea gigas*, depuis 2008, sur l'ensemble du littoral métropolitain ;
- tellines, *Donax trunculus*, entre 2008 et 2013, sur la côte Atlantique ;
- huîtres creuses, *Crassostrea gigas*, de taille marchande, depuis 2012, sur l'ensemble du littoral métropolitain ;
- coques, *Cerastoderma edule*, en 2012, 2015 et 2018, dans la région Hauts-de-France ;
- moules, *Mytilus edulis*, depuis 2014, sur la côte Atlantique.

Pendant cette même période, des mortalités massives de coquillages exploités ont également été rapportées en Europe (par exemple : coques en Espagne depuis 2012) et dans d'autres pays tels que l'Australie ou la Nouvelle-Zélande (source : Laboratoire de Référence de l'Union Européenne/Ifremer pour les maladies des mollusques marins).

Ces mortalités déséquilibrent tout un socio-écosystème littoral qui doit s'adapter en permanence pour maintenir la durabilité des activités socio-économiques de ses acteurs. Les représentants des professionnels de la filière conchylicole portent régulièrement ces préoccupations de durabilité de leur filière à l'attention des services de l'Etat, sollicitant la mise en place d'études scientifiques pour comprendre ces phénomènes.

En 2016, le Ministère chargé de l'Agriculture a constitué une équipe de coordination nationale pour une durée de 5 ans, afin de préparer, mettre en place et suivre l'avancement d'un plan stratégique pour une filière conchylicole plus résiliente aux risques sanitaires (**Annexe 1**). Ce plan comporte deux axes portant sur (1) la gouvernance sanitaire et l'évolution de la surveillance sanitaire et zoosanitaire et (2) un programme de recherche sur la compréhension des phénomènes de mortalités de coquillages sauvages et d'élevage, combinant agents pathogènes, pratiques d'élevage ou de pêche, facteurs environnementaux et événements climatiques. Des objectifs ambitieux ont été définis pour ce programme de recherche : « *comprendre l'interaction entre l'impact des conditions physico-chimiques (facteurs abiotiques) et des facteurs biotiques du milieu et le statut infectieux, sur les mortalités de coquillages sauvages et d'élevage. [...] Le programme devra explorer comment les contaminants des milieux terrestres et maritimes, les courants et les flux de sédiments, les modifications physico-chimiques de l'eau contribuent, en fonction de la présence ou absence de pathogènes, à influencer le taux de survie des huîtres creuses et des moules ainsi que d'autres espèces de coquillages touchés par des phénomènes de surmortalité inexplicables, à différents stades physiologiques et en tenant compte des pratiques d'élevage ou de pêche et si nécessaire des lignées génétiques.* » (Note au cabinet du Ministre, ref : BSA/1609017). Ce programme de recherche devra s'appuyer sur les études et les données préexistantes et proposer une étude éco-épidémiologique complémentaire, le cas échéant.

Un conseil scientifique et technique (CST) a été constitué et se réunit pour l'organisation, l'animation et le suivi de ce programme de recherche. Il rassemble, sous la direction scientifique de l'Anses, les organismes scientifiques et techniques reconnus pour leur expertise ou leurs activités de recherche dans différentes disciplines sur les mortalités de coquillages marins, ainsi que des représentants des professionnels de la filière conchylicole (conchyliculture et pêche à pied professionnelle). Le CST rapporte ses activités et fait des propositions d'orientation au comité de pilotage de l'étude éco-épidémiologique coquillages (COPEEC) qui valide les orientations, les modes d'organisation et les financements du programme. Le COPEEC est animé par le coordinateur national de la stratégie sanitaire et zoosanitaire en conchyliculture et coquillages de pêches, membre du Conseil général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux (CGAAER). Le COPEEC rassemble les différents acteurs de la filière conchylicole concernés par la santé des coquillages marins : le Comité national de la conchyliculture (CNC), les sept Comités

régionaux de la conchyliculture (CRC), le Comité national des pêches maritimes et des élevages marins (CNPMM), les comités régionaux et départementaux des pêches maritimes et des élevages marins (CR/DPMM), la Direction générale de l'Alimentation (DGAL), la Direction des pêches maritimes et de l'aquaculture (DPMA), la Direction de l'eau et de la biodiversité (DEB) et les collectivités territoriales finançant des programmes de recherches sur les mortalités de coquillages. Un principe d'échanges réguliers entre le CST et le COPEEC a été établi dans un but de co-construction des protocoles tout en garantissant la précision scientifique et la rigueur de la méthode.

Dans le cadre de ce programme de recherche, le COPEEC a ciblé sept espèces de coquillages exploitées en France : huître creuse, huître plate, moule bleue, moule méditerranéenne, palourde, coque et telline.

1.2 Stratégie de travail du CST

Pour être en mesure de traiter la problématique formulée par les commanditaires sous la forme d'une question scientifique, le CST a reformulé les objectifs du programme de recherche comme suit : « Dans le but de comprendre les phénomènes de mortalité de coquillages sauvages et d'élevage, l'objectif est d'identifier et de hiérarchiser les circonstances ou les facteurs qui augmentent le risque de mortalité des coquillages, dans l'optique de proposer des solutions opérationnelles capables de limiter ces mortalités ou leur impact. »

Une stratégie de travail séquentielle a été adoptée par le CST et validée par le COPEEC. La première étape des travaux visait à établir le bilan des connaissances existantes sur les facteurs de risque de mortalité des coquillages.

Si ce bilan ne permettait pas de répondre à la question des commanditaires de façon satisfaisante, une seconde étape serait à envisager. Cette seconde étape consisterait à concevoir et à mettre en œuvre une étude éco-épidémiologique sur le terrain pour confirmer l'influence de facteurs de risque connus et identifiés dans la première étape ou explorer des facteurs non étudiés jusqu'à lors.

Bien que sept espèces de coquillages cibles aient été identifiées par le COPEEC, les moyens humains disponibles au sein du CST ne permettaient pas de conduire le bilan des connaissances sur toutes ces espèces en parallèle. En 2016, des mortalités massives de moules étaient en cours. Au regard de cette situation sanitaire préoccupante, le CST a choisi d'appliquer sa stratégie de travail aux moules exploitées sur le littoral français (*Mytilus edulis* et *M. galloprovincialis*). Si cette démarche permet d'apporter des réponses satisfaisantes aux commanditaires, elle pourra être étendue aux autres espèces ultérieurement.

1.3 Intérêts et objectifs d'une revue systématique de la littérature

De nombreuses études issues de disciplines scientifiques différentes ont été conduites pour comprendre les phénomènes de mortalités massives de coquillages, et notamment identifier des facteurs de risque. Après presque 10 ans de recherche intensive sur les mortalités de coquillages, notamment en France, il semblait important de disposer d'un bilan des études réalisées sur le sujet et de le rendre disponible et accessible collectivement, c'est-à-dire pour l'ensemble des acteurs de la conchyliculture et de la pêche.

Pour cela, il était important d'utiliser une méthode rigoureuse et reproductible permettant d'identifier, évaluer et résumer objectivement les connaissances disponibles sur un sujet défini par une question précise. Il s'agissait de fournir des arguments étayés montrant l'existence de faits avérés ou, au contraire, soulignant les lacunes de connaissances et par conséquent les priorités de recherche, assortis d'une analyse critique de la validité des résultats obtenus. La revue systématique de la littérature est un type de synthèse bibliographique qui suit un protocole

structuré, standardisé à l'échelle internationale (Moher et al., 2009). Largement employée en santé humaine pour résumer la connaissance relative aux facteurs de risque de certaines maladies, la popularité de cette méthode est croissante dans le domaine de la santé animale. La revue systématique permet de résumer l'état des connaissances pertinentes sur un sujet précis, assorti d'une évaluation méthodologique des études existantes. Ses principes fondamentaux sont la rigueur méthodologique, la transparence et la reproductibilité. Elle s'appuie aussi bien sur des publications scientifiques que sur de la littérature grise. La revue systématique comporte une série d'étapes standardisées (European Food Safety Agency, 2010), allant de la découverte et l'évaluation des études pertinentes à la synthèse de l'information issue de sources diverses, afin de garantir sa transparence et sa reproductibilité. Cette structuration vise à minimiser les risques de biais, de partis pris et de pression sur les conclusions.

Cette standardisation a pour objectif d'apporter à l'utilisateur (i.e. les commanditaires, les lecteurs) des éléments lui permettant d'évaluer le risque pris en faisant reposer sa décision sur les résultats fournis. Ainsi, cette méthode de synthèse bibliographique permet le transfert des savoirs et expériences issus de la recherche et de l'expertise vers des acteurs opérationnels. Le but est de répondre à une question pratique en réalisant une synthèse de la connaissance disponible qui soit compréhensible de tous.

Par conséquent, l'objectif de la revue systématique de la littérature conduite par le CST était d'identifier et de hiérarchiser les facteurs, ainsi que leurs interactions et combinaisons, qui augmentent le risque de mortalité des espèces de moules exploitées en France métropolitaine. Après deux ans environ de travail, cette première étape du programme de recherche en santé des coquillages a été achevée et fait l'objet du présent rapport.

Ce rapport présente la méthodologie de travail appliquée par le CST et les résultats de la revue systématique de la littérature pour les facteurs de risque de mortalité chez les moules. La première partie détaille les étapes méthodologiques de la revue systématique, appliquées aux sept espèces de coquillages ciblées par le programme. La deuxième partie expose la synthèse des résultats des études existantes concernant l'identification de facteurs associés à la mortalité des deux espèces de moules exploitées en France, à travers (1) la description de l'éventail des définitions de la mortalité chez les moules et (2) l'éventail des facteurs de risque de mortalité signalés. La dernière partie propose une synthèse des facteurs de risque de mortalité identifiés chez les moules, transposables au contexte français et des lacunes dans cette connaissance, ainsi que des recommandations quant aux perspectives et aux priorités de recherche.

1.4 Modalités de travail : moyens mis en œuvre

La réalisation de cette revue systématique a été confiée au CST, qui rassemble 14 organismes scientifiques et techniques reconnus pour leur expertise ou leurs activités de recherche dans différentes disciplines complémentaires sur les mortalités de coquillages. Ces travaux sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires.

Bien que plusieurs organismes aient rédigé une lettre de mission pour officialiser la participation de leur représentant au CST, les plans de charge de travail n'ont pas intégré les travaux du CST et le financement des participations aux réunions du CST est resté à la charge des organismes, sur un mode volontaire.

Les échanges des membres du CST ont eu pour objectifs de définir précisément la problématique, la méthodologie et le calendrier de travail pour atteindre les objectifs définis collectivement. Les méthodes d'expertise ont reposé sur l'analyse critique par les experts de travaux originaux d'articles scientifiques publiés dans des revues scientifiques à comité de lecture ou présentés dans des conférences ainsi que des travaux scientifiques conduits par différents organismes scientifiques et techniques français, publiés dans des rapports. Les experts ont alterné réunions et échanges électroniques (**Annexe 2**). Une actualisation des données bibliographiques a été

réalisée tout au long des travaux du CST ; elle s'est terminée à la date de validation du rapport par le CST.

Les travaux du CST ont été soumis régulièrement au COPEEC. Le rapport rédigé par le CST tient compte des observations des membres du COPEEC.

2 Méthodologie

2.1 Etape 1 : Formulation de la question de revue systématique

A partir de la problématique des commanditaires, la première étape a été de formuler une question structurée : « *Quels facteurs augmentent le risque de mortalité des huîtres, moules, coques, et palourdes exploitées, parmi les caractéristiques des animaux (physiologie, lignée génétique), pratiques d'élevage ou de pêche, caractéristiques de l'eau de mer (modifications physico-chimiques, contaminants des milieux terrestres et maritimes, courants, phytoplancton, sédiments), présence d'organismes pathogènes (dans les animaux, dans l'eau de mer) ?* ».

Les éléments clés de la question de revue systématique contiennent les informations nécessaires pour déterminer les critères d'inclusion et d'exclusion des études existantes. Ils permettent de structurer la question de revue, et sont représentés par l'acronyme PECO (European Food Safety Agency, 2010). Il s'agit de la population cible (P), l'exposition (E) aux facteurs, la comparaison (C) de la situation exposée au facteur d'intérêt avec une situation de référence non exposée au même facteur, le résultat (O/*outcome*) ou la variable mesurant la conséquence sur la population cible de l'exposition au facteur d'intérêt.

Ici, les éléments clés suivants ont été identifiés :

- *Population cible* : les espèces de coquillages bivalves exploitées en France pour la consommation humaine, *i.e.* élevées ou pêchées, retenues par le COPEEC (huître creuse *Crassostrea gigas*, moule bleue *Mytilus edulis*, moule de méditerranée *Mytilus galloprovincialis*, coque *Cerastoderma edule*, palourde *Ruditapes decussatus* et *Ruditapes philipinarum*, telline *Donax trunculus*, huître plate *Ostrea edulis*) ; seuls les stades fixés (adultes et juvéniles) ont été considérés ;
- *Exposition au(x) facteur(s)* : caractéristiques des animaux (physiologie, lignée génétique), pratiques d'élevage ou de pêche, caractéristiques de l'eau de mer (modifications physico-chimiques, contaminants des milieux terrestres et maritimes, courants, phytoplancton, sédiments), présence d'organismes pathogènes (animaux, eau de mer) ;
- *Comparaison* (élément clé ayant un rapport avec le schéma d'étude) : aucun schéma d'étude n'a été exclu *a priori*. Les études expérimentales en milieu contrôlé (laboratoire) permettent d'identifier des facteurs de risque mais surestiment la force de l'association des facteurs étudiés avec la mortalité car ce type d'étude ne prend pas en compte les interactions entre différents facteurs, dont certains peuvent être des facteurs de confusion ou d'atténuation. Les études expérimentales et les études en situation d'observation sur le terrain ont été différenciées car leurs résultats pour un même facteur étudié n'étaient pas comparables. Les études de cas et les études descriptives des déclarations obligatoires de mortalité ont été incluses dans les premières phases de la revue car elles peuvent générer des hypothèses de facteurs de risque, qui pourraient être confirmées ou infirmées par des études analytiques comparatives.

La **Figure 1** illustre la diversité des schémas d'étude employés pour étudier les associations entre des facteurs d'intérêt et la mortalité de coquillages, et la force du niveau de preuve associé.

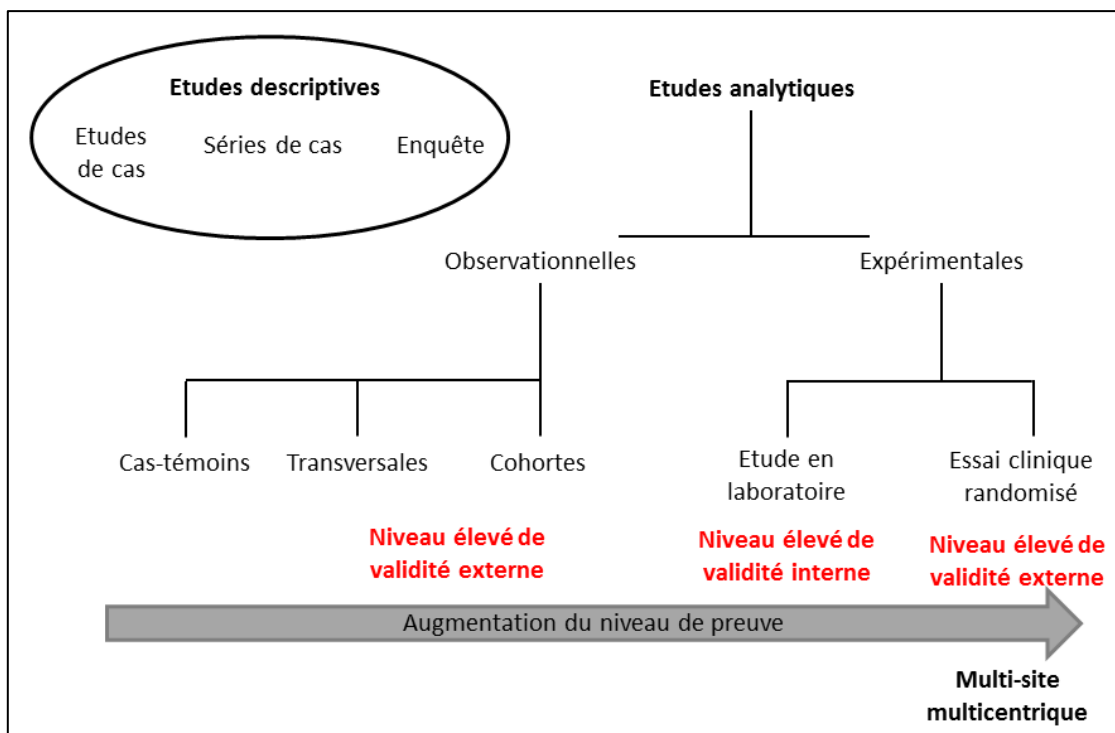


Figure 1. Schémas d'étude utilisés en science de la santé animale et niveau de preuve associé adapté de (Lean et al., 2009)

- *Résultat* : la mortalité de coquillages, mesurée ou perçue (subjectivité e.g. déclaration de mortalité), quantitative (pourcentage, échelle semi-quantitative, taux, durée de survie) ou qualitative (présence/absence).

Des notions de temporalité et d'espace ont été ajoutées à ces éléments clés :

- *Temps* : 2006-2018, la limitation de la recherche aux dix dernières années était justifiée par l'évolution des techniques analytiques pour la recherche de contaminants chimiques ou des organismes pathogènes, et par l'évolution des contextes environnemental et épidémiologique. Avec les délais usuels de publication, les études conduites dans le cadre du programme de recherche *Etude des mortalités estivales de l'huître creuse-MOREST*, le premier programme intégrateur d'envergure sur le sujet des mortalités des coquillages et conduit entre 2001 et 2005 en France, devaient être identifiées.
- *Espace* : France et international. En France, les écosystèmes, les systèmes d'exploitation des coquillages et les organismes pathogènes détectés sont hétérogènes entre les différentes régions et il était peu probable que les études françaises soient comparables. Cette hypothèse était probablement généralisable à la comparaison entre la France et les autres pays. Toutefois, la France a des liens épidémiologiques avec certains pays (par exemple : Irlande, Maroc, Portugal) et il n'est pas impossible que des pratiques non réalisables en France à l'heure actuelle puissent le devenir à moyen terme. De plus, des situations similaires peuvent être décrites et étudiées dans des pays parfois très éloignés tels l'Australie, où plusieurs études se sont intéressées aux mortalités d'huîtres creuses associées au virus OsHV-1. Par conséquent, le seul critère d'exclusion retenu était relatif aux zones climatiques tropicales ou polaires.

A partir de ces éléments clés, des critères de sélection des études existantes ont été définis en distinguant des critères d'inclusion (**Tableau 1**) et des critères d'exclusion (**Tableau 2**).

Tableau 1. Critères d'inclusion des études existantes

Élément clé	Critères d'inclusion
Population	Huîtres creuses, moules, coques, palourdes, tellines, huître plate, moule méditerranéenne (espèces présentes en France) En élevage ou sur gisement
Facteurs d'exposition	Caractéristiques des animaux (physiologie, lignée génétique), pratiques d'élevage ou de pêche, caractéristiques de l'eau de mer (modifications physico-chimiques, contaminants des milieux terrestres et maritimes, courants, phytoplancton, sédiments), présence d'organismes pathogènes (animaux, eau de mer)
Comparaison	Aucun
Résultat	Mortalité de coquillage, maladie
Contexte	France et international 2006-2017

Tableau 2. Critères d'exclusion des études existantes

Élément clé	Critères d'exclusion
Population	Autres espèces de coquillages Stade larvaire
Facteurs d'exposition	Organismes pathogènes pour l'homme (norovirus, <i>Vibrio vulnificus</i> , <i>V.cholerae</i> , <i>V.parahaemolyticus</i>)
Comparaison	Aucun
Résultat	Aucun
Langue	Autre que le français et l'anglais

2.2 Etape 2 : Stratégie de recherche documentaire

L'objectif était de définir une stratégie de recherche très sensible afin de recenser le plus d'études pertinentes possible, au risque d'être peu spécifique, c'est-à-dire d'identifier beaucoup d'études non appropriées (Counsell, 1997).

2.2.1. Sources de données

Pour maximiser les chances d'identifier les études pertinentes, plusieurs sources de données ont été explorées :

- bases de recherche (N = 10) : Web of Science, Scopus (inclut Pubmed/MEDLINE et les bases de données éditeurs ex : Science Direct, Wiley Online, SpringerLink...), Aquatic Sciences and Fisheries Abstracts (Asfa), CAB Abstracts, Pascal et Francis, Environmental Sciences and Pollution Management ;
- bases de données de conférences (N = 10) : Society for Veterinary Epidemiology and Preventive Medicine (SVEPM), International Symposia on Veterinary Epidemiology and Economics (ISVEE), National Shellfisheries Association (NSA), World Aquaculture Society (WAS), European Aquaculture Society (EAS), European Association of Fish Pathologists (EAFP), Annual meeting of the European Union Reference Laboratories for mollusc diseases, International Symposium on the Advances in Marine Mussel Research (AMMR), Conseil de filière conchylicole, Journées Ifremer de la surveillance et de la référence ;

- dépôts institutionnels des travaux scientifiques (archives ouvertes, N = 4) : Archimer, Horizon IRD, HAL, Bibliomer ;
- littérature grise : archives des Comités Régionaux de la Conchyliculture (CRC) et Centres techniques régionaux ;
- recherches sur internet : Google Scholar ;
- moissonneurs : mémoires de stage et thèses en France et à l'international.

2.2.2. Equations de recherche

Les équations de recherche ont été construites à partir des éléments clés (PECO) avec la collaboration de la bibliothèque de La Pérouse (**Annexe 3**). Les systèmes d'équation ont été adaptés au langage spécifique de chacune des différentes bases de données explorées.

La première exploration des bases de données a eu lieu en mai 2017, puis deux mises à jour ont été effectuées en avril 2018 puis en novembre 2018.

La recherche des études issues de la littérature grise s'est appuyée sur les connaissances de chaque membre du CST ayant accès aux archives des CRC et des Centres techniques régionaux. Une grille d'inventaire (outil n°3, **Annexe 4**) a été développée pour recenser les principales caractéristiques des études identifiées.

2.2.3. Test de la stratégie de recherche

Une liste de contrôle de 17 publications scientifiques a été constituée sur l'espèce « huître creuse » (**Annexe 5**). Il s'agissait d'un ensemble de références connues pour leur pertinence sur le sujet, constitué préalablement à l'élaboration des équations de recherche.

Afin d'évaluer la stratégie de recherche développée, les équations de recherche ont été appliquées à la liste de contrôle. L'objectif était de vérifier :

- sa sensibilité : la proportion de références de la liste de contrôle se retrouvant dans le corpus bibliographique identifié par les équations de recherche ;
- son manque de spécificité : le nombre d'études non pertinentes identifiées dans le corpus bibliographique par les équations de recherche.

La sensibilité de la stratégie de recherche a été privilégiée, avec l'objectif de retrouver la quasi-totalité des publications de la liste de contrôle dans le corpus identifié grâce aux équations de recherche.

2.3 Etape 3 : Sélection de la documentation pertinente

L'unité de travail est l'étude, et non pas le rapport ou la publication scientifique. Une même étude peut faire l'objet de plusieurs références, que ce soient des rapports, des actes de conférence et/ou publications scientifiques. Il s'agit d'identifier les multiples rapports/publications (références) correspondant à une même étude. De plus, une même publication peut inclure plusieurs études.

La sélection des études pertinentes a nécessité plusieurs étapes et s'est appuyé sur les critères d'inclusion et d'exclusion précédemment définis (**Tableaux 1 et 2**). A chacune de ces étapes de sélection, des références sont conservées pour leur pertinence pour répondre à la question posée et d'autres sont, à l'inverse, écartées. Les décisions relatives à l'exclusion des références ont été documentées à partir de l'étape de la lecture intégrale des références. Cette méthode permet ainsi de diminuer progressivement le volume de références et de ne lire au final en entier qu'un nombre plus réduit d'articles. Le processus de sélection de la documentation pertinente est résumé par un diagramme de flux (**Figure 2**).

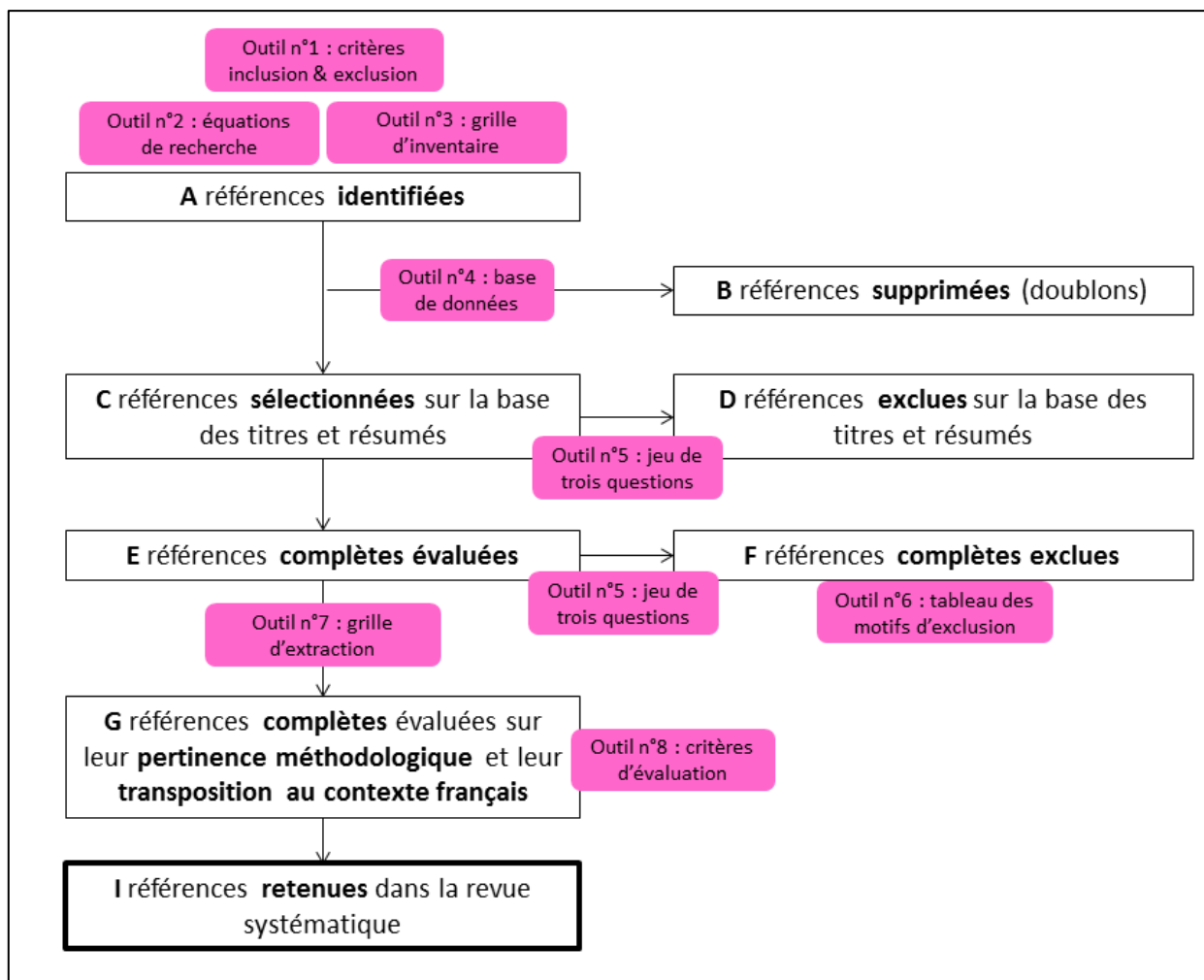


Figure 2. Diagramme du processus de sélection des études pertinentes pour la question de revue systématique

2.3.1. Identification des doublons

Les références issues des recherches conduites dans les différentes bases de données au cours de l'étape 2 précédente ont été regroupées dans une base de données bibliographique commune (outil n°4), lisible par des logiciels de gestion bibliographique libres de droit (Open source) tels que Zotero© ou Mendeley©. Chaque référence a été identifiée par un numéro unique. Les références identifiées en doublon par différentes bases de données ont été supprimées.

2.3.2. Examen des titres et résumés

Les titres et résumés des références regroupées dans la base de données bibliographique ont été examinés pour exclure les références très éloignées du sujet (tout en restant assez conservateur à ce stade). Pour cela, les réponses au jeu de trois questions devaient être « oui » pour conserver l'étude dans la suite du processus d'analyse (Tableau 3, outil n°5).

Tableau 3. Outil de sélection des études à l'examen du titre et du résumé (outil n°5)

N° de la question	Intitulé de la question	Réponses possibles
Question 1 :	Est-ce que le titre et/ou le résumé décrit une étude et non pas une revue d'études ?	Oui/Non/A clarifier
Question 2 :	Est-ce que le titre et/ou le résumé inclut la mortalité d'huître creuse, de moule, de coque ou de palourde comme la variable d'intérêt (résultat) ?	Oui/Non/A clarifier
Question 3 :	Est-ce que le titre et/ou le résumé décrit la recherche de facteurs associés aux mortalités d'huître creuse, de moule, de coque ou de palourde ?	Oui/Non/A clarifier

Les références se rapportant à la même étude ont été identifiées et analysées comme une seule entité. Les textes intégraux des références sélectionnées à ce stade ont été rapatriés.

2.3.3. Examen des textes intégraux

Le texte intégral de chaque référence a été lu et examiné au regard des critères d'inclusion et d'exclusion précédemment définis (**Tableau 3**). A ce stade, les décisions relatives à l'exclusion des documents ont été documentées (**Annexe 6**) et un tableau des motifs d'exclusion des références (outil n°6) a été construit.

2.4 Etape 4 : Extraction des caractéristiques clés des études sélectionnées

L'extraction des caractéristiques clés des études sélectionnées à l'issue de l'étape 3 a été standardisée grâce à l'utilisation d'une grille d'extraction (outil n°7). Deux versions de cette grille d'extraction ont été déclinées : l'une pour les études d'observation et l'autre pour les études expérimentales (**Annexes 7 et 8**).

2.5 Vérification collective de la sélection des références et de l'extraction des caractéristiques clés des études sélectionnées

Une stratégie de vérification à deux niveaux a été mise en œuvre afin de réduire les erreurs et les biais de jugement et de subjectivité :

- premier niveau de vérification : chaque membre du CST a étudié un échantillon de 30 références tiré au sort parmi le corpus bibliographique identifié par les équations de recherche. La sélection des références sur la base de l'examen des titre/résumé a été comparée à la même analyse réalisée indépendamment par la Coordinatrice scientifique ;
- second niveau de vérification : l'extraction des caractéristiques clés des documents complets sélectionnés parmi les références sélectionnées sur la base de l'examen des titre/résumé a été réalisée par la Coordinatrice scientifique, et validée par les membres du CST (Buscemi et al., 2006). Chaque membre du CST a ainsi vérifié l'extraction des caractéristiques clés pour deux documents complets.

En cas de discordance, les sélectionneurs ont confronté leurs désaccords pour comprendre pourquoi telle ou telle étude avait été sélectionnée par l'un et exclue par l'autre, afin de définir par la suite une seule et même attitude à adopter pour ce genre de situation.

Le coefficient kappa (κ) de Cohen a été utilisé pour mesurer le degré de concordance entre le CST et la Coordinatrice, dont les règles d'interprétation sont présentées dans le **Tableau 4**.

Tableau 4. Règles d'interprétation du coefficient Kappa (Landis and Koch, 1977)

Valeurs du Kappa	Interprétation
< 0	Désaccord
0,0 - 0,20	Accord très faible
0,21 - 0,40	Accord faible
0,41 - 0,60	Accord modéré
0,61 - 0,80	Accord fort
0,81 - 1,00	Accord presque parfait

2.6 Etape 5 : Evaluation de la pertinence méthodologique et de la transposition des résultats des études sélectionnées

La qualité des résultats d'une étude scientifique dépend directement de la qualité de conception et de réalisation de l'étude elle-même. Une analyse critique des études s'est appuyée sur deux aspects : la fiabilité des résultats et la généralisation des résultats aux populations de moules exploitées en France. Pour cela, un ensemble de critères d'analyse a été construit (outil n°8).

2.6.1. Evaluation de la pertinence méthodologique pour identifier des facteurs de risque

Une évaluation de la pertinence méthodologique pour identifier des facteurs de risque de mortalité a été conduite pour chacune des études sélectionnées, en séparant les études expérimentales des études observationnelles. L'analyse critique de la validité du processus méthodologique visant à identifier un facteur de risque de mortalité a été standardisée en appliquant les critères du **Tableau 5**.

Tableau 5. Critères d'évaluation de la pertinence méthodologique des études

Pertinence méthodologique	Observation	Expérimentation
insuffisante	Absence de tirage au sort des animaux étudiés ET schéma d'étude n'autorisant qu'un faible niveau de preuve	Absence de témoin ET absence de triplicat
modérée	Tirage au sort des animaux étudiés OU Schéma d'étude permettant une présomption d'association	Présence d'un témoin OU étude réalisée en triplicat
satisfaisante	Tirage au sort des animaux étudiés ET Schéma d'étude permettant une présomption d'association	Présence d'un témoin ET étude réalisée en triplicat

Pour les études d'observation, au regard de l'hétérogénéité disciplinaire des études constituant le corpus, deux critères méthodologiques assez généraux ont été combinés. Le premier critère était la représentativité de l'échantillon, qui ne peut être atteinte que par des méthodes d'échantillonnage probabilistes telles que le tirage au sort des individus étudiés. La représentativité garantit que les résultats observés sur l'échantillon de l'étude pourront être étendus à une population plus large au sein de l'écosystème étudié.

Le second critère était la force du niveau de preuve autorisé par le schéma d'étude choisi par les auteurs pour étudier les associations entre des facteurs et la mortalité de coquillages (**Figure 1**). Ont été considérées comme n'autorisant qu'un faible niveau de preuve, les études :

- descriptives ;
- de modélisation (prédiction) ;
- dont le schéma d'étude n'était pas précisé.

Ont été considérées comme permettant une présomption, les études :

- prospectives de coquillages sentinelles ;
- analytiques transversales ;
- analytiques de type exposés vs. non exposés.

Pour les études expérimentales, deux critères également, issus des bonnes pratiques de laboratoire universelles et transdisciplinaires ont été combinés car ils préjugent de la robustesse du plan d'expérience et donc de la fiabilité des résultats. Le premier critère était la réplication de l'expérience (spatiale et/ou temporelle). Le second critère était la présence d'un témoin, indispensable pour pouvoir réaliser une comparaison et évaluer l'effet d'un facteur sur le niveau de mortalité.

Les études présentant une pertinence méthodologique insuffisante pour identifier un facteur de risque de mortalité n'ont pas été exclues de la revue systématique mais ce critère d'ordre méthodologique a été considéré dans l'interprétation des résultats.

2.6.2. Evaluation de la généralisation des résultats au contexte français

Plusieurs critères ont été considérés pour évaluer les possibilités de transposition des résultats des études sélectionnées au contexte français :

- les techniques d'élevage ;
- les espèces de prédateurs ;
- les concentrations de polluants environnementalement réalistes ;
- les valeurs des paramètres physico-chimiques usuellement mesurées dans les masses d'eau ;
- la voie d'exposition des moules aux organismes pathogènes outrepassant les barrières naturelles de l'animal, *i.e.* injection.

L'Inventaire national du patrimoine naturel (Muséum national d'Histoire naturelle [Ed], 2003-2018) a permis de renseigner la présence des espèces de prédateurs ou d'algues étudiées dans le corpus bibliographique sur le littoral français.

L'appréciation de la pertinence environnementale des concentrations d'exposition aux substances chimiques employées dans les études expérimentales s'est appuyée sur la *Predicted No Effect Concentration* (PNEC) des substances. Il s'agit de la plus forte concentration de la substance sans risque pour l'environnement. Elle définit la toxicité de la substance vis-à-vis de l'environnement. De plus, la concentration des substances étudiées mesurée dans la chair des animaux a été comparée aux données de surveillance des réseaux de l'Ifremer - réseau national d'observation de la qualité du milieu marin (RNO, 1979-2007, 61 substances) devenu en 2008 le réseau d'Observation de la contamination chimique du littoral (ROCCH, **Annexe 9**).

L'appréciation de la pertinence environnementale des valeurs des paramètres physico-chimiques employées dans les études expérimentales s'est appuyée sur les données relevées sur la période 1987-2017 par le Réseau d'Observation et de Surveillance du Phytoplancton et de l'Hydrologie dans les eaux littorales (REPHY) mis en œuvre par l'Ifremer (REPHY – French Observation and Monitoring program for Phytoplankton and Hydrology in coastal waters, 2017).

Les études pour lesquelles la transposition des résultats au contexte français n'était pas envisageable n'ont pas été exclues de la revue systématique mais cette notion de transposition a été considérée dans l'interprétation des résultats.

2.7 Etape 6 : Analyse des données et synthèse des caractéristiques et résultats des études retenues

2.7.1. Synthèse des résultats

Au regard de l'hétérogénéité des études incluses dans cette revue systématique de la littérature, seule une synthèse qualitative des résultats a pu être réalisée. En effet, le faible nombre d'études présentant des données comparables et homogènes n'a pas permis d'envisager une méta-analyse, qui consiste en une synthèse quantitative des résultats issus de plusieurs études indépendantes en s'appuyant sur des méthodes statistiques.

Cette synthèse qualitative s'est traduite par :

- la description des caractéristiques du corpus bibliographique pertinent, par exemple : répartition des études par pays, année, type d'étude, population étudiée, facteurs étudiés ;
- une base de littérature pertinente sous le format d'un fichier tableur, permettant l'utilisation de requêtes pour diverses exploitations. Les informations de chaque référence (auteur, année, titre, caractéristiques clés,...) y sont répertoriées de manière standardisée ;
- la description des méthodes d'évaluation de la mortalité chez les moules ;
- l'identification de facteurs de risque de mortalité chez les moules.

2.7.2. Analyse des données

Certains champs de la grille d'extraction des caractéristiques clés des études étaient standardisés, d'autres ont été laissés libres car les informations qu'ils contenaient semblaient *a priori* peu prévisibles. Une analyse qualitative de ces champs libres a été conduite *a posteriori* pour créer des variables qualitatives prenant différentes valeurs ou modalités de réponse. Chaque variable qualitative a ensuite été décrite en termes d'effectif et de fréquence de ses modalités.

Les distributions des effectifs entre les modalités d'une variable ont été comparées entre les espèces de moules, les types d'études en appliquant un test du Chi² ou un test de Fisher (quand les effectifs théoriques étaient inférieurs à 3), avec un degré de signification $p < 0,05$.

La représentation des caractéristiques du corpus des études par une analyse des correspondances multiples (ACM) a permis d'identifier les groupes d'études ayant des caractéristiques similaires.

L'analyse des correspondances multiples est une méthode statistique descriptive. Elle vise à résumer l'information contenue dans un grand nombre de variables afin de faciliter l'interprétation des corrélations existantes entre ces différentes variables. L'ACM s'applique à des tableaux généralement de grande taille qui renseignent un ensemble de caractéristiques « qualitatives » pour une population d'individus statistiques (ici, les études). Elle extrait de ces tableaux les informations considérées comme les plus importantes, les plus structurantes. Les variables utilisées pour construire les axes de l'ACM correspondaient à : espèce de moules étudiée, type d'étude, mers et océans, type de population de moules, pertinence méthodologique pour identifier un facteur de risque, transposition au contexte français, et thématiques de facteurs de risque étudiés.

La synthèse qu'elle réalise se matérialise par des graphiques où les études, d'une part, et les caractéristiques renseignées, d'autre part, se distribuent dans des espaces de petite dimension :

des « plans factoriels ». Sur ces graphiques, les études qui se ressemblent (tout comme les modalités partagées par les mêmes études) sont représentées par des points qui tendent à se regrouper ; la dissemblance produit, au contraire, de la distance.

Les grilles d'extractions des caractéristiques clés des études ont été construites sous un format tableur Microsoft Excel©. Le logiciel R version 3.4.0 (R Core Team, 2017) a été utilisé pour le traitement des données.

3 Résultats

3.1 Sélection des études

La stratégie de recherche bibliographique a été testée sur l'espèce des huîtres creuses. Elle a permis de retrouver 94 % (16/17) des publications composant la liste de contrôle (**Annexe 5**).

La recherche des études publiées dans les bases de données sélectionnées a été réalisée en avril 2017, puis deux mises à jour ont eu lieu en avril 2018 puis en novembre 2018. Au total, près de 15 000 références différentes ont été identifiées sur la période 2006-2018 et pour toutes les espèces de coquillages concernées par le programme de recherche (**Annexe 10**). Environ 3 700 de ces références concernaient les moules après identification des doublons.

La recherche des études non publiées et répertoriées dans la grille d'inventaire a permis d'identifier 92 études pour toutes les espèces de coquillages ciblées par le programme de recherche, dont 20 concernaient les moules.

La recherche des études présentées lors des huit conférences sélectionnées a permis d'identifier seulement 18 études répondant aux critères d'inclusion et concernant les moules. Il n'a pas été possible d'accéder aux programmes de la conférence European Aquaculture Society (EAS) pour la période 2008-2013.

Au total, 3 715 documents distincts ont été identifiés sur les moules *M. edulis* et *M. galloprovincialis*, répartis en 3 677 publications, 17 études non publiées et 18 actes de conférence. La phase de sélection des documents à l'examen du titre et/ou du résumé a identifié 189 documents pertinents, dont 158 publications, 13 études non publiées et 18 actes de conférence. Neuf documents n'ont pas pu être récupérés et lus intégralement. Au final, 96 documents ont été conservés après la phase de sélection à l'examen du texte intégral, soit 2,6% (96/3 715) des documents distincts identifiés initialement. A la lecture des documents sélectionnés à l'examen du texte intégral, 19 documents supplémentaires ont été identifiés, aboutissant ainsi à un corpus de 115 documents pertinents (**Figure 3**).

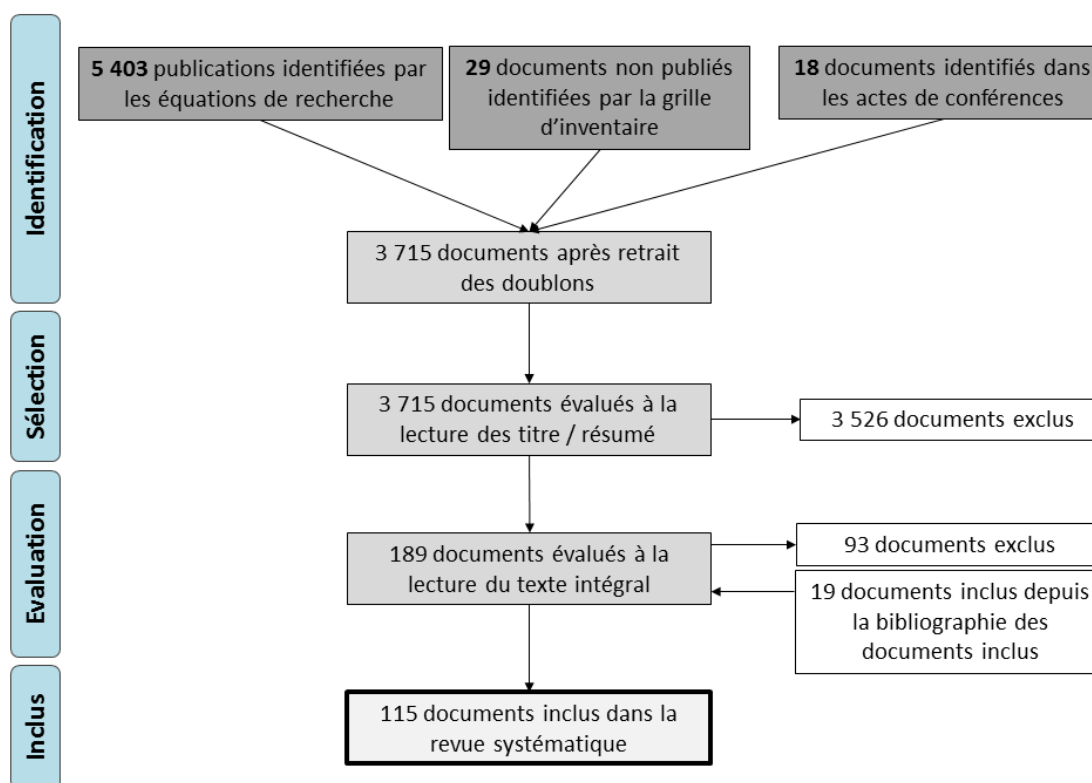


Figure 3. Diagramme de flux du processus de sélection de la documentation pertinente dans la revue systématique

Les motifs d'exclusion des documents à la lecture intégrale sont détaillés dans le **tableau 6** et les références concernées sont consultables dans l'**Annexe 6**.

Tableau 6. Motifs d'exclusion des documents à la lecture intégrale (outil n°6)

Motif de l'exclusion du document	Références publiées	Conférences	Littérature grise	Total
Le document décrit une revue d'études et pas une étude originale <i>Réponse « Non » à la Question 1</i>	4	0	0	4
La mortalité des moules n'est pas la variable d'intérêt du document <i>Réponse « Non » à la Question 2</i>	43	4	2	49
Le document ne recherche pas de facteurs associés aux mortalités de moules <i>Réponse « Non » à la Question 3</i>	22	3	0	25
Langue autre que le français et l'anglais	2	0	0	2
Date de publication antérieure à 2006 ¹	1	0	0	1
Le stade étudié est trop jeune (larves)	1	0	0	1
Doublon	2	9	1	12
Texte intégral non retrouvé	5	2	2	9
Total	70	18	5	93

La sélection des études a été vérifiée collectivement par le CST avant la première mise à jour de la recherche en avril 2018 (**Annexe 11**). La première étape relative à l'examen des titre/résumé a permis de vérifier 12% des documents identifiés (394/3 242). L'accord entre la Coordinatrice scientifique et le CST était presque parfait (coefficient $\kappa = 0,82$). La seconde étape relative à l'examen du texte intégral a permis de vérifier 23% des documents sélectionnés à l'issue de l'examen des titre/résumé (27/119). L'accord entre la Coordinatrice scientifique et le CST était presque parfait (coefficient $\kappa = 0,92$).

Les bons niveaux de concordance obtenus entre les choix de la Coordinatrice scientifique et ceux du CST illustrent le niveau satisfaisant de la standardisation de la méthode de sélection des études, développée par le CST pour limiter les erreurs et les biais de jugement ou de subjectivité.

3.2 Caractéristiques des études incluses

Au final, 115 documents ont été inclus dans la revue systématique. Pour l'espèce *M. edulis*, ces documents étaient des articles scientifiques (47/60), des rapports d'études ou de contrat (10/60), des thèses universitaires (2/60) et une conférence (1/60). Pour l'espèce *M. galloprovincialis*, ces documents étaient des articles scientifiques (53/55), un rapport d'études ou de contrat (1/55) et une conférence (1/55).

Ces 115 documents inclus comprenaient 151 études² distinctes, dont 19 étaient antérieures à 2006 (issues de l'analyse de la bibliographie de 14 documents). Dans la suite du rapport, les

¹ Date erronée dans la base de données (2003 au lieu de 2009)

résultats sont présentés séparément pour les deux espèces de moules *Mytilus edulis* (81 études dont 17 antérieures à 2006) et *Mytilus galloprovincialis* (70 études dont 3 antérieures à 2006).

La description des caractéristiques des études est présentée dans le **tableau 7**.

Tableau 7. Caractéristiques descriptives des études incluses dans la revue systématique

Caractéristique des études	<i>Mytilus edulis</i>		<i>Mytilus galloprovincialis</i>	
	Etudes d'observation (N=45)	Etudes expérimentales (N=36)	Etudes d'observation (N=25)	Etudes expérimentales (N=45)
Distribution géographique des études ³ :				
.Europe	22	29	14	36
.France	15	10	2	2
.Royaume-Uni	1	3	0	0
.Ecosse	2	1	0	0
.Pays-Bas	0	3	0	0
.Allemagne	0	3	0	1
.Danemark	2	1	0	0
.Portugal	0	2	1	3
.Grèce	0	0	1	8
.Espagne	1	1	4	8
.Italie	0	0	2	6
.Croatie	0	0	1	3
.Turquie	0	0	1	2
.Autres pays européens	1	5	2	3
.Amérique du Nord	22	8	1	6
.Canada	14	5	1	0
.Etats-Unis	8	3	0	6
.Afrique du Nord	0	0	1	2
.Maroc	0	0	0	1
.Tunisie	0	0	1	1
.Afrique du Sud	0	0	9	2
.Asie	1	1	0	1
.Japon	1	0	0	0
.Chine	0	1	0	1
.Océanie	0	0	1	1
.Nouvelle-Zélande	0	0	1	1
Mers et océans				
.Mer du Nord	4	10	0	1
.Mer Noire/Méditerranée	0	0	8	23
.Océan Atlantique	36	24	15	17
.Océan Pacifique	5	2	2	4
Type de population de moules étudiée ⁴ :				
.élevage	26	11	10	17
.gisement	16	22	15	23
.écloserie	1	1	1	1
.installation expérimentale	5	2	0	0
.non précisé	0	3	0	4

² L'unité de travail est l'étude. Un document peut contenir plusieurs études. De même, une étude peut faire l'objet de plusieurs documents.

³ Des études peuvent être conduites dans deux pays. Par conséquent, le nombre d'études par continent peut ne pas être égal à la somme des études par pays.

⁴ Des études peuvent être avoir étudié plusieurs types de populations de moules. Par conséquent, le nombre d'études total peut être supérieur à la somme des études par types de population.

Classes d'âge des moules étudiées ⁵				
.juvéniles	7	4	2	4
.adultes	5	12	2	18
.non précisée	34	20	21	26
Taille des moules étudiées ⁵				
.< 20 mm	4	5	7	0
.20-30 mm	9	4	3	11
.30-40 mm	5	7	6	9
.40-50 mm	4	4	9	13
.50-60 mm	4	8	9	18
.60-70 mm	2	1	4	6
.70-80 mm	1	0	1	7
.> 80 mm	0	1	1	5
.non précisée	27	16	10	6
Unité épidémiologique				
.individu	0	6	1	1
.groupe	44	30	24	44
.non précisée	1	0	0	0
Type temporel de l'étude				
.transversal	3		0	
.prospectif	37		25	
.rétrospectif	1		0	
.non précisé	4		0	
Schéma d'étude				
.étude descriptive de cas	1		0	
.étude de modélisation	1		0	
.étude analytique transversale	4		2	
.étude prospective de coquillages sentinelles	27		17	
.étude analytique exposés / non exposés	11		6	
.non précisé	1		0	
Tirage au sort des animaux				
.non	38		17	
.oui	7		8	
Présence d'un témoin dans le schéma expérimental				
.non		15		18
.oui		21		27
Etude expérimentale réalisée en triplicat				
.non		19		26
.oui		16		19
.non précisé		1		0
Pertinence méthodologique pour identifier un facteur de risque				
.insuffisante	3	5	0	5
.modérée	29	18	16	21
.satisfaisante	13	13	9	19
Transposition au contexte français				
.oui	45	29	23	24
.non	0	5	1	20
.manque d'information	0	2	1	1

⁵ Plusieurs classes d'âge ou tailles peuvent être étudiées dans une même étude. Par conséquent, La somme des études par classe d'âge ou par taille peut être supérieure au nombre total d'études.

Thématique des facteurs étudiés				
.caractéristiques de l'animal	18	8	5	5
.caractéristiques du site	21	8	14	5
.conditions climatiques	8	2	4	8
.caractéristiques de l'eau de mer	7	12	0	17
.apports des milieux aquatiques et terrestres	2	4	1	18
.organismes pathogènes	3	11	5	6
.pratiques culturelles / d'élevage / de pêche	23	2	10	3

Globalement, le nombre d'études a connu une forte augmentation depuis 2008, passant de 7 études en 2007 à 19 en 2017 (**Figure 4**). Depuis la dernière dizaine d'années, le nombre annuel d'études concernant l'espèce *M. galloprovincialis* fluctue de façon régulière, alors que le nombre annuel d'études concernant l'espèce *M. edulis* a fortement augmenté depuis 2016. Celui-ci coïncide avec les épisodes de mortalités massives survenues en France en 2014. Plusieurs études scientifiques ont été mises en place depuis ces événements.

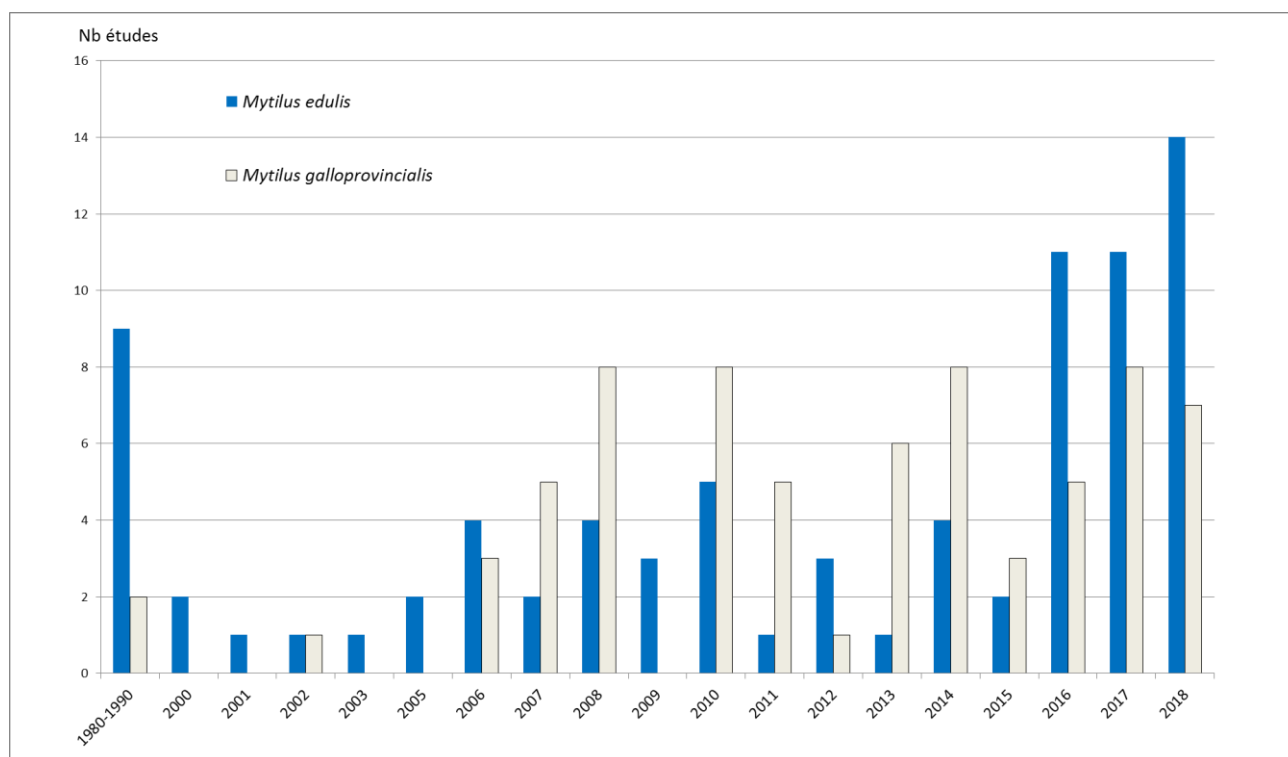


Figure 4. Répartition annuelle des études par espèce

Pour l'espèce *M. edulis*, un tiers des études a été conduit en France et un autre a été mené en Amérique du Nord (**Figure 5** et **Tableau 7**). Pour l'espèce *M. galloprovincialis*, près de la moitié des études ont été menées en mers Noire et Méditerranée (**Figure 5** et **Tableau 7**). Globalement, seulement 19% (29/151) des études du corpus bibliographique ont été conduites en France.

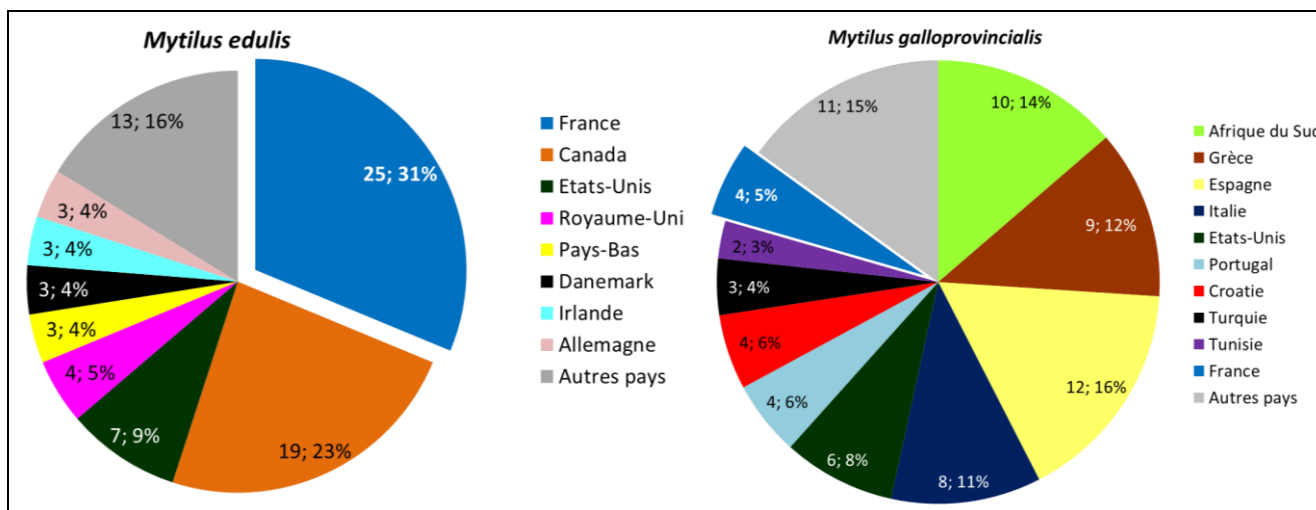


Figure 5. Répartition géographique des études, par espèce

L'espèce *M. edulis* a plutôt été étudiée selon des approches observationnelles (56% ; 45/81) alors que *M. galloprovincialis* a principalement fait l'objet d'études expérimentales (64%, 45/70).

Dans les deux espèces de moules, les populations étudiées étaient majoritairement des populations d'élevage ou issues de gisements.

Au total, 9% des études (13 ; 3 études d'observation et 10 études expérimentales) présentaient une pertinence méthodologique insuffisante pour identifier un facteur de risque (Tableau 7). Aucune différence statistiquement significative de pertinence méthodologique n'a été mise en évidence entre le type d'étude (observation vs. expérimentation, $p=0,07$), ni entre les espèces de moules ($p=0,56$).

Seulement un tiers des études (54 ; 22 études d'observation et 32 études expérimentales) présentaient une pertinence méthodologique satisfaisante, i.e. un protocole fiable pour identifier un facteur de risque.

Les résultats de près d'un cinquième des études (30/151 ; 2 études d'observation et 28 études expérimentales) n'étaient pas transposables au contexte français. Le motif majoritaire était l'utilisation de concentrations environnementalement peu réalistes pour les études expérimentales de l'effet des polluants (Tableau 8).

Tableau 8. Motifs de l'impossibilité de transposition de l'étude au contexte français

Motif	Total	<i>Mytilus edulis</i> Etudes expérimentales (N=7)	<i>Mytilus galloprovincialis</i> Etudes d'observation (N=2)	<i>Mytilus galloprovincialis</i> Etudes expérimentales (N=21)
Pratique d'élevage inexistante	1	0	1	0
Concentration d'exposition au polluant non environnementalement réaliste	16	0	0	16
Facteur étudié non reproductible (huile diesel, eaux usées, eau de mer)	3	3	0	0
Paramètre physique de l'eau de mer non environnementalement réaliste	2	0	0	2
Voie d'exposition aux organismes pathogènes non naturelle (injection)	3	2	0	2
Manque d'éléments pour conclure	4	2	1	1

Les différents facteurs étudiés par les 151 études retenues dans la revue systématique ont été regroupés en sept thématiques différentes : caractéristiques de l'animal, caractéristiques du site, conditions climatiques, caractéristiques de l'eau de mer, apports des milieux aquatiques et terrestres, organismes pathogènes, et pratiques culturelles / d'élevage / de pêche. Globalement, l'effet des caractéristiques du site sur le risque de mortalité est la thématique la plus étudiée chez les deux espèces de moules. A l'inverse, l'effet des conditions climatiques a été le moins étudié (Figure 6). Les thématiques des facteurs de risque n'ont pas reçu la même attention chez les deux espèces de moules. En effet, l'effet des pratiques culturelles a été deux fois plus étudié chez *M. edulis* que chez *M. galloprovincialis*, alors que l'effet des apports des milieux aquatiques et terrestres a été trois fois plus étudié chez *M. galloprovincialis*. Certaines thématiques ont été explorées plus souvent par des approches observationnelles, comme l'effet des caractéristiques du site ou des pratiques d'élevage, d'autres ont été plus souvent étudiées en conditions expérimentales, comme l'effet des caractéristiques de l'eau de mer ou des apports des milieux aquatiques et terrestres. Chez *M. galloprovincialis*, la majorité des études (19/70 études) s'est intéressée à l'effet des apports des milieux terrestres et aquatiques ou à celui des caractéristiques du site (19/70 études) alors que chez *M. edulis*, l'effet des caractéristiques du site a été principalement étudié (29/81 études).

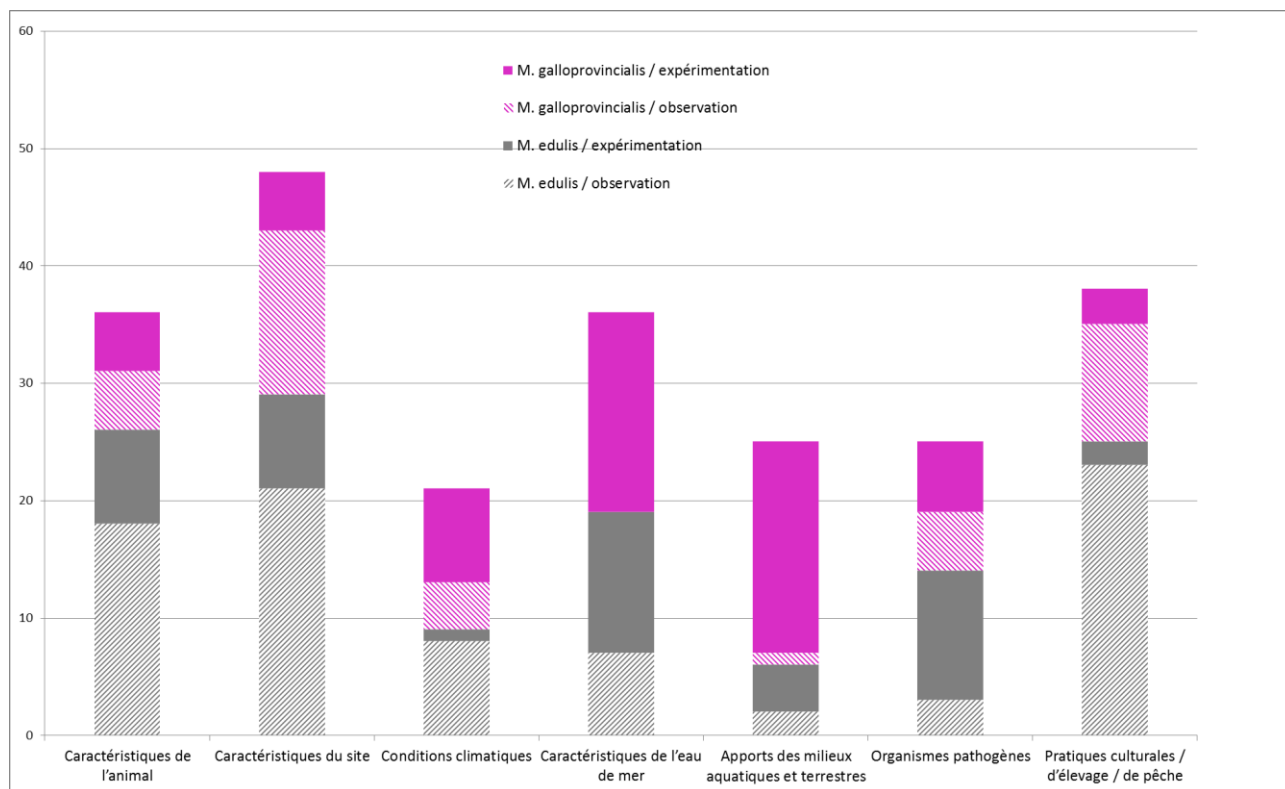


Figure 6. Thématiques des facteurs de risque de mortalité étudiées par espèce de moule et type d'étude

Pour un dixième des études du corpus bibliographique retenu, les résultats étaient peu robustes du fait de leur pertinence méthodologique insuffisante pour identifier un facteur de risque. Aucune différence statistiquement significative de pertinence méthodologique n'a été mise en évidence entre la thématique des facteurs étudiés pour les deux espèces de moules (test de Fisher, $p=0,17$ pour *M. edulis* et $p=0,28$ pour *M. galloprovincialis*, Tableau 9).

Tableau 9. Répartition du nombre d'études par thématiques des facteurs étudiés, pertinence méthodologique insuffisante et possibilités de transposition au contexte français

Thématique des facteurs étudiés	<i>Mytilus edulis</i>			<i>Mytilus galloprovincialis</i>		
	Pertinence méthodologique insuffisante	Non transposable	Nb total études	Pertinence méthodologique insuffisante	Non transposable	Nb total études
Caractéristiques de l'animal	3	1	26	2	2	10
Caractéristiques du site	1	0	29	1	1	19
Conditions climatiques	1	0	10	3	1	12
Caractéristiques de l'eau de mer	2	0	17	1	5	17
Apports des milieux aquatiques et terrestres	0	2	6	1	15	19
Organismes pathogènes	4	2	14	1	2	11
Pratiques culturelles / d'élevage / de pêche	1	0	25	0	1	13

Par ailleurs, la transposition au contexte de la mytiliculture française des résultats d'un cinquième des études était limitée, notamment en raison de l'utilisation de concentrations de polluants environnementalement peu réalistes dans les études expérimentales. En effet, pour les deux espèces de moules, les résultats des études s'étant intéressées à l'effet des apports des milieux aquatiques et terrestres étaient moins souvent transposables au contexte français (test de Fisher, $p < 0,0001$ pour les deux espèces), en comparaison avec les autres thématiques de facteurs étudiés (**Tableau 9**).

Une analyse des correspondances multiples (ACM) a permis de synthétiser la majorité des informations contenues dans le tableau 7, en proposant une typologie des études. Cette typologie a été construite à partir des caractéristiques descriptives principales des études (espèce de moules, type d'étude, mers et océans, type de population de moules, pertinence méthodologique pour identifier un facteur de risque et transposition au contexte français) et des thématiques des facteurs qu'elles ont étudiés. Cette synthèse se matérialise par des graphiques (**Figures 7 et 8**) où chaque étude est représentée par un point qui est toujours positionné à la même place. Sur ces graphiques, les études qui se ressemblent sont représentées par des points qui ont tendance à se regrouper ; la dissemblance produit, au contraire, de la distance entre les études. Pour chaque caractéristique étudiée, des ellipses de confiance sont représentées autour de ses modalités. Lorsque les ellipses ne se recoupent pas, les modalités d'une caractéristique sont significativement différentes les unes des autres, c'est-à-dire que les études peuvent être distinguées en fonction des modalités de la caractéristique.

Dans les **figures 7 et 8**, chaque graphique représente une caractéristique différente et les 150 études qui sont colorées selon les modalités de chacune des caractéristiques utilisées dans cette analyse. Ainsi, dans la **figure 7**, le graphique en haut à gauche sépare sur la gauche, les études

ayant étudié l'espèce *M. edulis* (colorées en rouge), de, à droite, celles ayant étudiées l'espèce *M. galloprovincialis* (colorées en bleu).

Au total, 25,6% de l'information issue du **tableau 7** est résumée par les deux premières dimensions des graphiques, ce qui est relativement important dans le cadre d'une ACM.

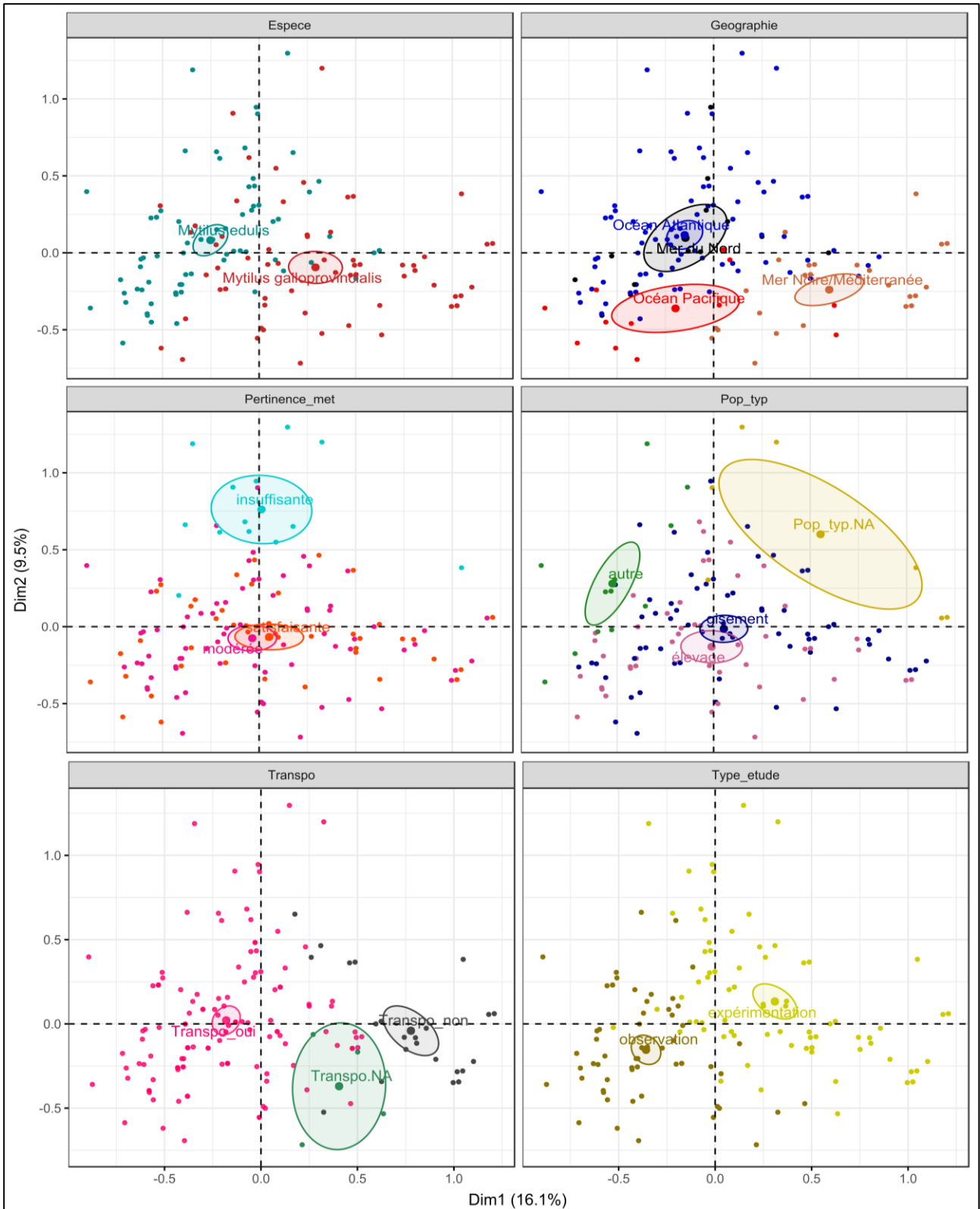


Figure 7. Résultats de l'ACM : caractéristiques descriptives des études

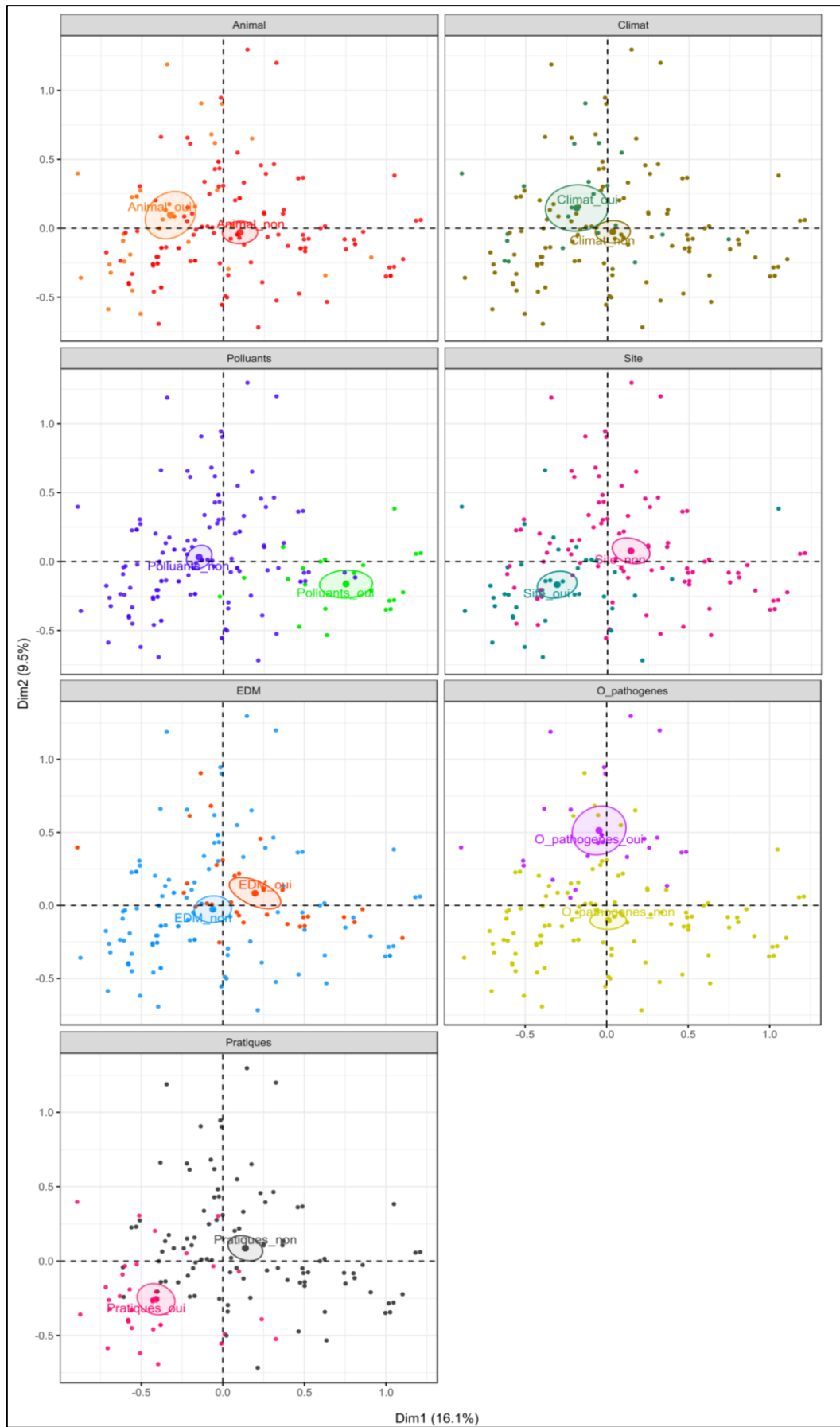


Figure 8. Résultat de l'ACM : thématiques des facteurs étudiés dans les études

La représentation des caractéristiques du corpus des 151 études par une analyse en ACM a permis de distinguer deux grands groupes d'études (**Figure 7 et 8**). Le premier groupe (sur la gauche des graphiques) rassemblait des études concernant l'espèce *M. edulis*, plutôt des animaux d'élevage ou d'écloserie, selon une approche observationnelle, conduites dans les Océans Atlantique et Pacifique et en Mer du Nord, s'étant intéressées à l'effet des caractéristiques du site, de l'animal, des organismes pathogènes, des conditions climatiques ou des pratiques d'élevage sur le risque de mortalité des moules. Le second groupe (sur la droite des graphiques) rassemblait des études concernant l'espèce *M. galloprovincialis*, plutôt des animaux de gisement, selon une approche expérimentale, conduites en Mer Noire ou Méditerranée, s'étant intéressées à l'effet des polluants ou des caractéristiques de l'eau de mer sur le risque de mortalité des moules.

3.3 Eventail des définitions de la mortalité des moules

La définition de la mortalité des moules variait selon un premier niveau, le type d'étude. La mortalité était définie au niveau de l'animal pour les études expérimentales alors qu'elle était estimée au niveau de la population pour les études d'observation.

Ainsi, la définition expérimentale de la mortalité d'une moule était qualitative et binaire : l'animal est mort ou « non mort ». Plusieurs critères ont pu être utilisés, seuls ou en association, pour considérer une moule comme morte dans les études expérimentales (**Tableau 10**).

Tableau 10. Critères de définition d'une moule morte dans les études expérimentales⁶

Critère	<i>Mytilus edulis</i> (N = 36)	<i>Mytilus galloprovincialis</i> (N = 45)
Absence de fermeture des valves en réponse à une stimulation tactile	13	21
Valves ouvertes	9	17
Mauvaise odeur	0	1
Non précisé	23	24

A l'exception d'une étude d'expertise, aucune étude d'observation ne s'est contentée de considérer seulement la présence ou l'absence de mortalité sur un site ; la mortalité a toujours été quantifiée, sous différents formats (**Tableau 11**). Ainsi, dans les études d'observation, la définition de la mortalité des moules était quantitative. Elle est exprimée en pourcentage, avec un nombre de moules mortes pour numérateur, et un nombre de moules total pour dénominateur. Cet indicateur est une prévalence, qui représente un bilan de la situation à des moments variables : pendant une période donnée (prévalence cumulée sur la période étudiée ou finale) ou à un moment donné (prévalence instantanée). Il est à noter qu'aucune étude d'observation n'a exprimé la mortalité sous le format d'une incidence, c'est-à-dire le nombre de nouveaux animaux morts, dans une population déterminée, au cours d'une période donnée (Toma et al., 2001). L'incidence fournit une information dynamique sur la maladie et correspond à la vitesse d'apparition des mortalités. La prévalence quant à elle, fournit une information statique. Seules deux études (des mêmes auteurs) ont défini un indicateur dynamique, le temps de demi-stock, qui est défini comme le nombre de jours nécessaires pour diviser la population de moules initiales par deux.

⁶ Plusieurs critères ont pu être utilisés, seuls ou en association, pour considérer une moule comme morte, ce qui explique que la somme des études par critères soit supérieure au nombre total d'études.

Tableau 11. Différents formats d'expression de la mortalité des moules dans les études d'observation

Format d'expression de la mortalité	<i>Mytilus edulis</i> (N=45)	<i>Mytilus galloprovincialis</i> (N=25)
Prévalence finale	16	12
Prévalence cumulée au cours du suivi	24	12
Prévalence instantanée	2	0
Incidence	0	0
Indice de demi-stock	1	1
Présence / absence	1	0
Non précisé	1	0

Dans les études d'observation, plusieurs méthodes d'estimation des mortalités au sein des populations de moules étudiées ont été appliquées, bien que le comptage ait été utilisé par la majorité des études (37%) (Tableau 12).

Tableau 12. Méthodes d'estimation des mortalités dans les populations de moules dans les études d'observation

Méthode d'estimation	<i>Mytilus edulis</i> (N = 45)	<i>Mytilus galloprovincialis</i> (N = 25)
Comptage	38	18
Déclaration des éleveurs/pêcheurs	2	0
Méthode d'estimation indirecte : analyse d'image	0	2
Méthode indirecte : densité (nombre de moules/m ²)	1	0
Non précisée	4	5

Même au sein de la méthode d'estimation par comptage, quand des détails étaient fournis, des différences méthodologiques ont été relevées entre les études (Tableau 13).

Tableau 13. Différentes méthodes de comptage des mortalités de moules dans les études d'observation

Méthode de comptage des mortalités	<i>Mytilus edulis</i> (N=38)	<i>Mytilus galloprovincialis</i> (N=18)
Comptage des mortes et des vivantes	7	2
Comptage des vivantes restantes	8	4
Comptage des mortes	1	2
Comptage des mortes « récentes »	0	1
Comptage des coquilles vides	3	3
Non précisée	18	7

Environ un quart des études (24%, 19/81 pour *M. edulis* ; 21%, 15/70 pour *M. galloprovincialis*) n'a mesuré la mortalité des moules qu'en fin d'expérience (6/36 pour *M. edulis* ; 9/45 pour *M. galloprovincialis*) ou d'observation (13/45 pour *M. edulis* ; 6/25 pour *M. galloprovincialis*). La majorité des études a donc mesuré l'évolution de la mortalité au cours du temps de l'expérience ou de l'observation. La fréquence de la mesure variait de toutes les heures pour quelques études expérimentales à tous les semestres ou tous les ans pour deux études d'observation (Figure 9). La plupart des études expérimentales avait une fréquence quotidienne de suivi de la mortalité, alors que la fréquence était le plus souvent mensuelle pour les études d'observation.

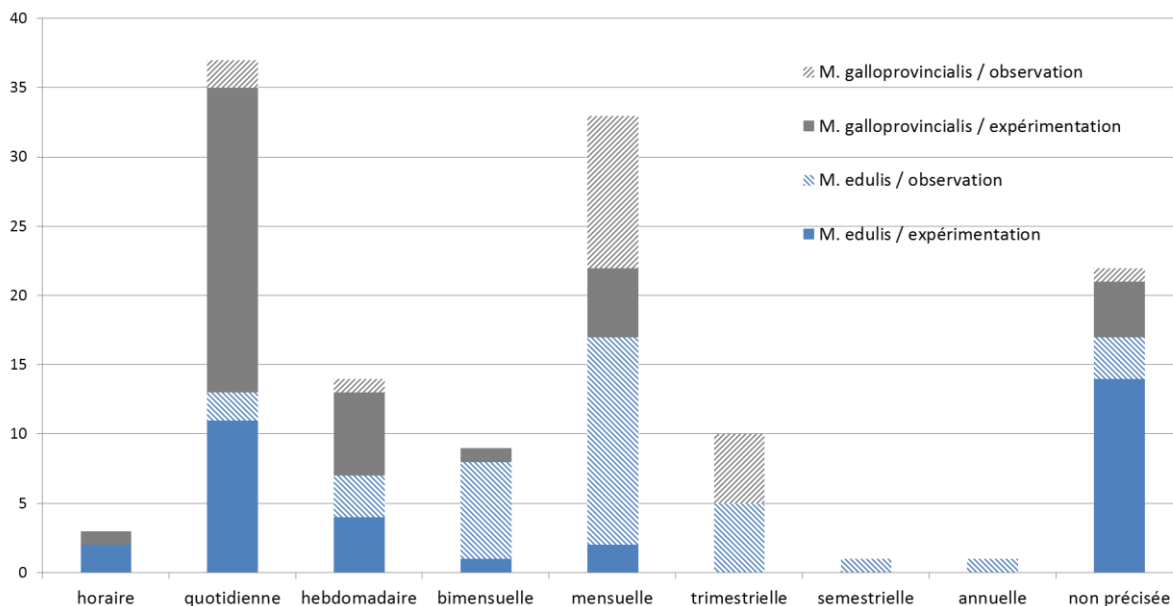


Figure 9. Fréquence d'estimation des mortalités

3.4 Mesure de l'association d'un facteur d'exposition avec la mortalité des moules

Une multitude de mesures d'association sont utilisées dans la littérature (Tableau 14). Le choix du type de la mesure d'association dépendait du format du facteur d'exposition étudié. Si le facteur étudié était qualitatif, la mesure d'association était une moyenne, médiane ou une proportion de mortalité alors que si le facteur étudié était quantitatif, la mesure d'association utilisée était une corrélation. Dans le cas particulier des expérimentations, cette association a pu être mesurée par la concentration de la substance étudiée entraînant 50% de mortalité de la population expérimentale (CL₅₀) ou le temps d'exposition à l'air entraînant 50% de mortalité (TL₅₀) (plutôt dans le cas des études d'impact des polluants).

Au total, 4 études d'observation n'ont pas comparé le niveau de mortalité des moules en présence du facteur étudié avec une situation dans laquelle le facteur étudié était absent. Elles ont suggéré des hypothèses de facteurs de risque suite à la description approfondie d'événements de mortalité de moules.

Tableau 14. Types de la mesure d'association entre la mortalité et le facteur étudié

Type de la mesure d'association	<i>Mytilus edulis</i> (N=81)	<i>Mytilus galloprovincialis</i> (N=70)
Comparaison de mortalités moyennes	20	15
Comparaison de proportions de mortalité	44	25
Comparaison de courbes de survie	8	6
Survie médiane	1	0
Corrélation	2	4
Concentration entraînant 50% de mortalité (CL ₅₀)	2	10
Temps d'exposition à l'air entraînant 50% de mortalité (TL ₅₀)	0	10
Absence de comparaison	3	0
Non précisé	1	0

3.5 Facteurs de risque de mortalité des moules identifiés

Au total, 125 facteurs différents ont été étudiés par les 151 études retenues dans la revue systématique, avec 72 facteurs différents pour *M. galloprovincialis* et 97 facteurs différents pour *M. edulis*. Ils ont été regroupés en sept thématiques différentes :

- caractéristiques de l'animal ;
- caractéristiques du site ;
- conditions climatiques ;
- caractéristiques de l'eau de mer ;
- apports des milieux aquatiques et terrestres ;
- organismes pathogènes ;
- pratiques culturelles / d'élevage / de pêche.

Les facteurs étudiés et leur effet sur le risque de mortalité sont intégralement rapportés dans le **tableau 15** pour *M. galloprovincialis* et dans le **tableau 16** pour *M. edulis*. Toutefois, seuls les facteurs étudiés par au moins trois études dont les caractéristiques sont transposables au contexte français sont détaillés et discutés dans ce rapport. Les études présentant une pertinence méthodologique insuffisante ou non transposables au contexte français sont identifiées entre parenthèses. L'**annexe 12** propose une représentation graphique de l'effet des facteurs étudiés sur le risque de mortalité par thématique.

Tableau 15. Facteurs étudiés pour l'espèce *Mytilus galloprovincialis*, et effet rapporté sur le risque de mortalité (25 études d'observation et 45 études expérimentales)

(Les études avec une pertinence méthodologique insuffisante pour identifier un facteur de risque ou non transposables au contexte français apparaissent entre parenthèses)

La correspondance entre les numéros et les auteurs des études est consultable p67-74

Facteur étudié	Nombre d'études	Effet sur le risque de mortalité		
		Augmentation	Diminution	Pas d'effet
Caractéristiques des animaux	10			
Espèce vs. <i>M. trossulus</i>	4		(2886_1) / (4294) / 7240	2303
Génotype intraspécifique vs. interspécifique	2		bi18_a	2303 ⁸
Petite taille	4		(7013_1 ⁹) / (7289)	1098 / 3834_b
Fréquence élevée d'individus présentant > 10% d'anomalies cytogénétiques hémocytaires dans la population	1	10112_b		
Caractéristiques du site	17			
Effet site général (caractéristiques non détaillées)	4	4172 / 6756 / maj2926		bi22
Zone au sein du site	1			4172
Site d'invasion vs. site natif	1	7454 ¹¹		
Côte vs. baie	2	2684 / 4367		
Augmentation de la durée d'ensablement	1	996_1		
Accumulation de sable ou de sédiment	3	4367 / 2698 / 996_2		
Augmentation de la concentration de matières organiques dans le sédiment	1	maj942		
Exposition aux vagues	1	3834_b		
Hauteur des vagues	3	2698 / 4367 ¹²		4367 ¹³
Position haute sur l'estran	2			4172 / 7454 ¹¹
Position milieu vs. bordure dans le gisement	1			2684
Exposition au soleil vs. à l'ombre	1	10038_2 ¹⁴		
Prédation benthique et pélagique	2	4409 / (10226 ¹⁵)		
Gradient croissant de pollution	2	(1154)		5028
Conditions climatiques	9			
Saison	3	LG82_b ¹⁶ / 2684 ¹⁷ / 4367 ¹⁸		
Réchauffement de la température de l'air	3	4294 ¹⁹ / 10215 ²⁰ / 2012_2		

⁷ Différents génotypes de *M. galloprovincialis* vs. différents génotypes d'hybrides de *M. edulis* et de *M. galloprovincialis*⁸ Génotype *M. trossulus* natif vs. introgressé vs. génotype introduit *M. galloprovincialis*⁹ Lors d'une exposition au cuivre, plomb et zinc¹⁰ Lors d'une exposition à des nanoparticules d'oxyde de zinc¹¹ Mortalité due à la présence d'endolithes¹² Habitat dans la baie¹³ Habitat sur la côte¹⁴ Mortalité par dessiccation¹⁵ Prédation par le plathelminthe (ver plat) polyclade *Imogine mediterranea*. La présence de ce ver est avérée en Méditerranée (Tunisie, Italie, Catalogne)¹⁶ En France, printemps vs. autres saisons¹⁷ En Afrique du Sud, fin de la saison estivale (Février) vs. autres saisons¹⁸ En Afrique du Sud, sur la côte : pics de mortalité en fin d'été (Février) et en hiver-printemps (Juin-Octobre) / dans la baie : pics de mortalité en été (Février) et en hiver (Juin)

Ecart thermique air / eau	4	3874 ²¹ / 7240 ²²	(2886_2 ²³)	(2886_1 ²⁴)
Augmentation du nombre de stress thermiques	1			7240 ²⁵
Caractéristiques de l'eau de mer	15			
Augmentation de la température	5	1204 ²⁶ / 7240 ²⁷ / 7791 ²⁸		10039 ²⁹ / (maj1185 ³⁰)
Augmentation du nombre de stress thermiques	1			maj2_129_a ³¹
Diminution de la salinité	5	(8239_1 ³²) / (8239_2 ³³) / 2012_1 ³⁴ / (2012_2 ³⁵)		(2012_2 ³⁶)
Diminution du pH	5	8146_1 ³⁷ / 10039 ³⁸ / maj942 ³⁹		7791 ⁴⁰ / 8146_2 ⁴¹
Diminution de l'oxygène dissous	1	996_3 ⁴² / 7869_2 ⁴³		
Augmentation de la turbidité	2	maj942	(7013_2 ⁴⁴)	
Faible quantité de nourriture	1	(4294) ⁴⁵		
Apports des milieux terrestres et aquatiques	19			
Métaux totaux (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, V, Pb, Zn, Al, Fe)	1	10565 ⁴⁶		
Al	2	10565 ⁴⁶ / maj942 ⁴⁷		

¹⁹ Air à 30°C vs. 20 ou 25°C

²⁰ Air à 27°C et salinité de l'eau de mer inférieure à 11 psu

²¹ Eau à 18°C ou 26°C et air à 32°C

²² Eau à 13°C et air à 33°C

²³ Eau à 12°C et air de 20°C à 30°C

²⁴ Eau à 18°C et air de 20°C à 30°C

²⁵ Eau à 13°C et air à 33°C

²⁶ Seuil thermique à 24°C ; passage de 18°C à 30°C selon une augmentation de 0,1°C par minute (donc en 2 heures)

²⁷ Eau de 13°C à 33°C

²⁸ Seuil thermique à 25°C ; variations de 15,7°C à 27,8°C et augmentation de °C par semaine pendant 3 semaines

²⁹ Eau à 21°C vs. 16°C

³⁰ Eau à 21°C vs. 17°C, lors d'une exposition au mercure (Hg)

³¹ Eau de 19°C à 29°C, deux stress thermiques espacés de 14 jours

³² Salinité inférieure à 8 psu lorsque la température de l'eau de mer est constante et égale à 15°C

³³ Salinité inférieure à 6 psu lorsque la température de l'eau de mer est supérieure à 28°C / salinité inférieure à 10 psu lorsque la température de l'eau de mer est à 30°C

³⁴ Salinité inférieure à 28 psu, lorsque la température de l'eau de mer est à 27°C

³⁵ Salinité inférieure à 11 psu, en été (température de l'air à 27°C)

³⁶ En hiver (température de l'air à 13°C)

³⁷ pH constant de 7,4 pendant 6 mois

³⁸ L'effet létal du pH est diminué lorsque les moules *M. galloprovincialis* sont mélangées avec une autres espèce de moules *Xenostrobus securis*

³⁹ pH inférieur à 6,0

⁴⁰ Diminution progressive de 0,3 unités de pH (de 8,01 à 7,98) (diminution de 0,1 unité par semaine pendant 3 semaines puis maintien 10 mois)

⁴¹ pH constant de 7,4 pendant 3 mois

⁴² 0,01-0,03 mL O₂/L

⁴³ Avec la température de l'eau de mer à 25°C, pas d'effet à 15°C

⁴⁴ Lors de l'exposition à des concentrations de cuivre, zinc ou plomb dans l'eau de mer

⁴⁵ Avec la température de l'air supérieure à 30°C

⁴⁶ Dans les tissus de moules

As	1		10565 ⁴⁶
Cd	2	(1406)	10565 ⁴⁶
Cr	1		10565 ⁴⁶
Cu	5	(1406) / (7013_1) / (7013_2) / maj942 ⁴⁷	10565 ⁴⁶
Fe	3	10565 ⁴⁶ / (1406) / maj942 ⁴⁶	
Hg	2	(maj1185)	10565 ⁴⁶
Ni	1		10565 ⁴⁶
Pb	4	10565 ⁴⁶ / (1406) / (7013_1) / (7013_2)	
V	1		10565 ⁴⁶
Zn	4	(7013_1) / (7013_2) / maj942 ⁴⁷	10565 ⁴⁶
Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	2	10565 ⁴⁶	(1154)
Polychlorobiphényles (PCB)	1		10565 ⁴⁶
Atrazine (herbicide)	2	(4768_1) / (4768_2)	
Cyperméthrine (insecticide pyréthroïde)	1		(5222)
Carbamazépine (médicament antiépileptique)	1	maj1757	
Phtalates (plastifiant)	1		10565 ⁴⁶
Alkylphénols (détergents, additifs de carburants et lubrifiants, résines)	1		10565 ⁴⁶
Pyrrithione de zinc (ZnPT, biocide antifouling)	2	(4490_1) / (4490_2)	
Nanoparticules d'oxyde de zinc (ZnO)	2	7289 / (maj989)	
2,4,6-trinitrotoluène (TNT, composé explosif)	1	(1717)	
Hexahydro-1,3,5-triazine (RDX, composé explosif)	1		(1717)
Octahydro-1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetrazocine (HMX, composé explosif)	1		(1717)
Liquides ioniques d'imidazolium (1-butyl-3-méthylimidazolium tétrafluoroborate + 1-méthyl-3-octylimidazolium tétrafluoroborate)	1	(9018)	
Eau usée de presse d'huile d'olive	1	(5373)	
Lixiviats (= effluent liquide issu des déchets par fermentation / eau de pluie)	1	(6141)	
Organismes pathogènes	11		
Agent infectieux non identifié	1	maj2_155_1b	
Profil bactériologique	1		LG82_b
Bactérie <i>Vibrio aestuarianus</i>	5	7869_2 ⁴⁸ / (7869_3 ⁴⁹) / (7869_4 ⁵⁰)	7869_2 ⁵¹ / maj2_155_1b
Bactéries <i>Vibrio</i> du groupe <i>Splendidus</i>	5	7869_2 ⁴⁸ / (7869_3 ⁴⁹) /	7869_2 ⁵¹ / maj2_155_1b

⁴⁷ Dans le sédiment

⁴⁸ Infection par exposition en immersion dans de l'eau contaminée à 10¹⁰ CFU/mL, à température de l'eau de mer à 25°C et en immersion pendant 8 heures (pour simuler une hypoxie)

⁴⁹ Infection par injection intramusculaire de 100 µL d'isolats de terrain (Espagne) à une dose de 10¹¹ CFU/mL

⁵⁰ Infection par injection intramusculaire de 100 µL de la souche de référence à des doses de 10⁹ et 10⁷ CFU/mL

⁵¹ Infection par exposition en immersion dans de l'eau contaminée à 10¹⁰ CFU/mL, à température de l'eau de mer 15°C ou à 25°C

		(7869_4 ⁵⁰)		
Virus Ostreid Herpesvirus-1 (OsHV-1)	2		(8621_8b ⁵²)/	maj2_155_1b
Parasite <i>Marteilia refringens</i>	1			maj2_155_1b
Algue toxique dinoflagellée <i>Ostreopsis cf ovata</i>	1	9283_1 ⁵³		
Présence d'épibiontes sur la coquille	1	3834_b ⁵⁴		
Parasitisme externe (endolithes)	3	maj2_486 ⁵⁵ / 7454	10632 ⁵⁶	
Pratiques d'élevage/de culture/de pêche	13			
Origine géographique du naissain locale vs. transplantée	7	maj2462 ⁵⁷ / 2303 ⁵⁸ / bi25 ⁵⁹	1159 ⁶⁰ / bi22 ⁶¹ / LG82_b ⁶² / 6756 ⁶³	
Position au sein de la structure d'élevage ⁶⁴	2		bi25	bi22
Mélange d'espèces de moules	2		10039 ⁶⁵ / 10215 ⁶⁵	
Polyculture (poissons)	1	maj1428		
Polyculture (algue <i>Gracilaria verrucosa</i>)	1		maj1351	
Durée de retrempage des moules avant leur transport pour commercialisation > 11 jours	1	(maj2616)		
Densité de stockage pendant le retrempage des moules avant leur transport pour commercialisation (kg/poche) ⁶⁶	1			(maj2616)
Augmentation de l'intensité de de la marche sur les gisements de moules exploités	1	maj2_486		

⁵² Infection par injection ou par cohabitation

⁵³ Effet dose

⁵⁴ Dans les sites abrités des vagues, NS sur les sites exposés aux vagues

⁵⁵ Mortalité par écrasement suite à l'intensité de la marche sur les gisements de moules exploités

⁵⁶ Mortalité causée par une chaleur extrême

⁵⁷ Différents sites de la même zone, Croatie, espèce native

⁵⁸ Une seule origine, deux zones d'élevage, Colombie Britannique, Canada, espèce introduite

⁵⁹ Quatre zones de Galice, Espagne : mortalité des sites au Nord supérieure à celle des sites au Sud

⁶⁰ Deux zones de Galice, Espagne, espèce native

⁶¹ Quatre zones de Galice, Espagne, espèce native

⁶² Trois zones de Bretagne Nord, France, espèce native

⁶³ Une seule origine, deux sites d'élevage au sein de la même zone, Nouvelle-Zélande, espèce native

⁶⁴ Proue vs. poupe du raft

⁶⁵ Mélange avec *Xenostrobus securis*, espèce invasive en Galice, Espagne

⁶⁶ 7,5 / 10 / 12,5 / 15 kg par poche

Tableau 16. Facteurs étudiés pour l'espèce *Mytilus edulis*, études d'observation (N=45) et études expérimentales (N=36)

(Les études avec une pertinence méthodologique insuffisante pour identifier un facteur de risque ou non transposables au contexte français apparaissent entre parenthèses)

La correspondance entre les numéros et les auteurs des études est consultable p67-74

Facteur étudié	Nombre d'études	Effet sur le risque de mortalité		
		Augmentation	Diminution	Pas d'effet
Caractéristiques des animaux	25			
Espèce vs. <i>M. trossulus</i>	3		(bi19 ⁶⁷)	323 / 2587_1
Espèce vs. <i>M. galloprovincialis</i>	2	LG81 / (maj2_155_2)		
Génotype interspécifique	3	bi18_b ⁶⁸ / 2587_1 ⁶⁹	(maj2_155_2 ⁷⁰)	
Génotype intraspécifique	4		10292_5 ⁷¹ / 10292_7 ⁷² / 10292_8 ⁷¹ / (maj2_155_2) ⁷¹	
Faible degré d'hétérozygotie	1	bi24		
Fréquence élevée d'individus présentant > 10% d'anomalies cytogénétiques hémocytaires dans la population	4	10112_a / 10292_11 / 10292_12		10292_8
Processus néoplasique hémocytaire	2	10292_12		LG82_a
Petite taille	8	177 ⁷³ / bi12_1 / bi12_2	365_2 ⁷⁴ / (4091_2) ⁷⁵ / 365_2 ⁷⁴	bi7 / bi24 / 3834_a ⁷⁶
Faible croissance	2	7718		
Faible index de condition	1	7718		
Age (juvéniles vs. Adultes)	1		bi21	
Faibles réserves énergétiques / besoins énergétiques de maintenance élevés	2	bi11 / bi24		
Fin de la ponte	1	bi11		
Période de ponte	2	10292_4 / LG81		
Accumulation de lipofuscine	1	7718		
Résistance de la coquille	1			7718
Caractéristiques du site	29			
Effet site général (caractéristiques non détaillées)	11	323 / 10292_10 / LG57_1 / LG81 / LG82_a / LG83		bi5 / bi8 / bi12_1 / bi15 / bi21
Augmentation de la profondeur d'enfouissement	2	10057_2		10057_1
Augmentation de la durée d'enfouissement	3	10057_1 / 10057_2 / 10727		
Diminution de la granulométrie du sédiment	2	10057_1 / 10727		
Augmentation de la concentration de matières organiques en suspension	1	10727		
Présence de vase	2	LG77 / (LG79)		

⁶⁷ En régime estuarien (eau de mer côtière non filtrée)

⁶⁸ Différents génotypes hybrides de *M. edulis* et *M. galloprovincialis* vs. génotypes purs de *M. galloprovincialis*

⁶⁹ Génotypes hybrides de *M. edulis* et de *M. trossulus* vs. génotypes purs *M. edulis* vs. génotypes purs de *M. trossulus*

⁷⁰ Génotypes hybrides de *M. edulis* et *M. galloprovincialis* vs. génotypes purs de *M. edulis*

⁷¹ Génotype « sélectionné » vs. « non sélectionné »

⁷² Génotypes issus de parents survivants d'épisodes de mortalité vs. issus de parents n'ayant pas connu de mortalité

⁷³ Mortalité par prédation par les canards plongeurs

⁷⁴ En conditions d'hypoxie

⁷⁵ Avec température de l'eau de mer élevée, égale à 27°C

⁷⁶ Mortalité par parasitisme externe (épibiontes)

Exposition aux vagues	1	3834 ⁷⁷ _a	
Substrat du gisement complexe	2		maj2_152_1 ⁷⁸ / maj2_152_2 ⁷⁹
Position haute sur l'estran	3	bi7 / bi10 ⁸⁰ / 5932	
Prédation benthique et pélagique	10	177 / 6023_1 / 6023_2 / 8841_1 ⁸¹ / 8841_2 ⁸¹ / 9560 / bi10 ⁸⁰ / maj2_152_1 ⁷⁸ / maj2_152_2 ⁷⁹	365_3 ⁸²
Présence de l'huître <i>Crassostrea gigas</i>	1		9560 ⁷⁸
Conditions climatiques	9		
Saison	3	bi11 ⁸³ / LG82_a ⁸⁴	bi15
Réchauffement de la température de l'air	5	3024_1 / (3024_3) / 4680 / bi7	10292_1
Augmentation du nombre de stress thermiques	3	4680 / 3024_1	maj2_153 ⁸⁵
Pluviométrie	1		10292_1
Caractéristiques de l'eau de mer	19		
Augmentation de la température	15	3024_1 ⁸⁶ / (3024_3 ⁸⁷) / (4091_2 ⁸⁸) / 7718 ⁸⁹ / 10057_2 ⁹⁰ / 10727 ⁹¹ / (maj1003 ⁹²) / 4680 / 10292_2 / LG82_a ⁹³ / bi16 ⁹⁴ / maj2_129_b ⁹⁵ / maj2_235_1 ⁹⁶	3960 ⁹⁷ / maj2_147_2 ⁹⁸

⁷⁷ Sur les sites abrités des vagues, NS sur les sites exposés aux vagues

⁷⁸ Mortalité par prédation par le crabe *Carcinus maenas*. Cette espèce de crabe est présente en France.

⁷⁹ Mortalité par prédation par l'étoile de mer *Asterias rubens*. Cette espèce d'étoile de mer est présente en France.

⁸⁰ Mortalité par prédation par le bigorneau blanc *Nucella lapidus*. Cette espèce de bigorneau est présente en France.

⁸¹ Mortalité par prédation par le crabe japonais *Hemigrapsus sanguineus*. Cette espèce de crabe envahissante est présente en France (présence avérée sur les côtes de la Manche-Mer du Nord).

⁸² En conditions d'hypoxie de l'eau de mer

⁸³ Canada, saison estivale (Juin-Septembre) vs. autres saisons

⁸⁴ France, saison printemps vs. autres saisons

⁸⁵ Température de l'air variant de 20°C à 35°C, animaux exposés de façon chronique à une pollution

⁸⁶ Température variant de 25°C à 45°C

⁸⁷ Température supérieure à 25°C

⁸⁸ Température supérieure à 30°C

⁸⁹ Température supérieure à 20-25°C

⁹⁰ Avec différentes profondeurs d'enfouissement, température variant de 8°C à 20°C

⁹¹ Température 20°C vs. 15°C

⁹² Température 22°C vs. 16°C

⁹³ Seuil thermique à 19-20°C

⁹⁴ Seuil thermique à 20°C, associé avec une diminution brutale de la quantité de nourriture

⁹⁵ Température de 15°C à 28°C, deux stress thermiques espacés de 14 jours

⁹⁶ Température à 35°C

Augmentation du nombre de stress thermiques	2	3024_1	maj2_129b
Diminution de la température	1	maj2_135_1 ⁹⁹	
Diminution de la salinité	2	3960 ¹⁰⁰	10292_2
Diminution du pH	4	10825 ¹⁰¹ / maj2_147_1 ¹⁰²	(maj1003) / maj2_147_2 ¹⁰²
Variations de la teneur en oxygène dissous	3	10292_2	maj2_147_1 ¹⁰³ / maj2_147_2 ¹⁰³
Augmentation de la turbidité	2	LG77	10292_2
Faible quantité de nourriture	1	bi16 ¹⁰⁴	
Présence de nutriments (nitrates, nitrites, phosphates, azote ammoniacal, silicates)	1		10292_2
Faible indice de diversité phytoplanctonique	1	10292_1	
Apports des milieux terrestres et aquatiques	6		
Al	1		LG77 ¹⁰⁵
As	2		LG77 ¹⁰⁵ / 10292_2 ¹⁰⁶
Ba	1		10292_2 ¹⁰⁶
Cd	3	3960 ¹⁰⁰	LG77 ¹⁰⁵ / 10292_2 ¹⁰⁶
Co	1		10292_2 ¹⁰⁵
Cr	2		LG77 ¹⁰⁵ / 10292_2 ¹⁰⁶
Cu	2		LG77 ¹⁰⁵ / 10292_2 ¹⁰⁶
Fe	2		LG77 ¹⁰⁵ / 10292_2 ¹⁰⁶
Hg	2		LG77 ¹⁰⁵ / 10292_2 ¹⁰⁶
Mn	2		LG77 ¹⁰⁵ / 10292_2 ¹⁰⁶
Mo	1		10292_2 ¹⁰⁶
Ni	2		LG77 ¹⁰⁵ / 10292_2 ¹⁰⁶
Pb	2		LG77 ¹⁰⁵ / 10292_2 ¹⁰⁶
Sb	1		10292_2 ¹⁰⁶
Ti	1		LG77 ¹⁰⁷
Zn	3	3960 ¹⁰⁰	LG77 ¹⁰⁵ / 10292_2 ¹⁰⁶
Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	2		LG77 ¹⁰⁵ / 10292_2 ¹⁰⁸
Polychlorobiphényles (PCB)	2		LG77 ¹⁰⁵ /

⁹⁷ Mortalité liée à l'exposition au zinc (Zn) ou au cadmium (Cd), à faible salinité égale à 20psu, à 6°C ou 12°C

⁹⁸ Température à 20°C vs. 26°C

⁹⁹ Température à 4°C

¹⁰⁰ Salinité à 20 psu

¹⁰¹ pH égal à 6,5

¹⁰² pH égal à 7,2 vs. 9,7

¹⁰³ Concentration en O₂ de 2,0 mg/L vs. 8,0 mg/L

¹⁰⁴ Diminution brutale de la concentration en chlorophylle totale

¹⁰⁵ Analyses conduites dans le sédiment

¹⁰⁶ Analyses conduites dans les tissus de moules, résultats intermédiaires de l'étude

¹⁰⁷ Analyses conduites dans le sédiment, dans les tissus de moules et dans l'eau de mer

¹⁰⁸ Analyses conduites dans l'eau de mer, sur membranes SPMD, résultats intermédiaires de l'étude

				10292_2 ¹⁰⁹
Pesticides organochlorés (HCB, HCH)	1			10292_2 ¹⁰⁹
Dichlorodiphényltrichloroéthane (DDT, pesticide organochloré)	1			10292_2 ¹⁰⁹
Chlordanes (insecticides organochlorés)	1			10292_2 ¹⁰⁹
Pesticides organophosphorés	1			10292_2 ¹⁰⁹
Herbicides et pesticides et phytosanitaires hydrophiles	1			10292_2 ¹¹⁰
Atrazine (herbicide)	1			10292_2 ¹¹⁰
Tributylétains (TBT, composés organostanneux <i>i.e.</i> dérivés de l'étain, antifoulings utilisés jusqu'en 1982)	1			LG77 ¹⁰⁵
Pyrithione de zinc (ZnPT, biocide antifouling)	1	(maj63)		
Eaux usées non traitées	1	(1228_1 ¹¹¹)		
Huile diesel	1	(1118)		
Organismes pathogènes	14			
Agent infectieux non identifié	3	maj2_155_1a / (maj2_155_2) / 10292_7		
Profil bactériologique	1			LG82_a
Bactéries anaérobies	1	(2800)		
Bactéries opportunistes hétérotrophiques	1	bi2		
Bactérie <i>Vibrio aestuarianus</i>	3			9276 / maj2_155_1a / (maj2_155_2)
Bactéries <i>Vibrio</i> du groupe <i>Splendidus</i>	7	9276 / (10713 ¹¹²) / maj1890 / 10292_11 ¹¹² / (bi26 ¹¹³)		maj2_155_1a / (maj2_155_2)
Bactéries du groupe <i>Splendidus</i> de l'espèce <i>V. splendidus/V. hemicentroti</i> ou <i>V. lentus/V. atlanticus</i>	1	(10713 ¹¹²)		
Bactéries du genre <i>Photobacterium</i>	1	maj1890		
Virus OsHV-1	4			(8621_8a) / 9276 / maj2_155_1a / (maj2_155_2)
Parasite <i>Marteilia refringens</i>	4			LG82_a / 9276 / maj2_155_1a / (maj2_155_2)
Parasite <i>Polydora</i> sp.	1	(LG79)		
Présence d'épibiontes sur la coquille	1	3834_a ¹¹⁴		
Pratiques d'élevage/de culture/de pêche	25			
Origine géographique du naissain locale vs. transplantée	9	LG60 ¹¹⁵	bi4 ¹¹⁶	323 ¹¹⁷ / bi5 ¹¹⁸ / LG57_1 ¹¹⁵ /

¹⁰⁹

Analyses conduites dans les tissus de moules et dans l'eau de mer, sur membranes SPMD, résultats intermédiaires de l'étude

¹¹⁰ Analyses conduites dans l'eau de mer, sur membranes POCIS, résultats intermédiaires de l'étude

¹¹¹ Hypothèse des auteurs : les eaux usées non traitées affectent le système immunitaire des moules et par conséquent, augmentent leur sensibilité aux agents pathogènes tels que *Listonella anguillarum* dans ce papier.

¹¹² Injection intramusculaire

¹¹³ Infection par injection intramusculaire de 100 µL d'isolats de terrain (France) à une dose de 10⁴ CFU/mL

¹¹⁴ Dans les sites abrités des vagues, NS sur les sites exposés aux vagues

¹¹⁵ Deux origines de naissain : locale où présence de mortalité et transplantée où absence de mortalité, France

¹¹⁶ Deux zones de Colombie Britannique, Canada, espèce *M. trossulus*

¹¹⁷ Deux sites d'élevage, Nouvelle-Ecosse, Canada, espèces et hydrides de *M. edulis* et *M. trossulus*

			LG59 ¹¹⁴ / bi15 ¹¹⁹ / bi8 ¹²⁰ / bi21
Origine géographique du naissain	7	LG82_a / bi5 ¹¹⁸ / bi15 ¹¹⁹ / bi21	LG60 ¹²¹ / LG57_1 / LG83
Origine zootechnique élevage en filière vs. collecte sur gisement	2		6023_2 ¹²² 6023_1 ¹²²
Elevage en cages suspendues vs. boudins suspendus	1		bi24
Elevage en cages suspendues à 16 m de profondeur (mer ouverte) vs. 6 m (lagon)	1		bi11
Profondeur des lanternes sur filière à 6 m vs. 2 m	1		bi6
Position au sein de la structure d'élevage ¹²³	1		bi6
Densité élevée dans les cages suspendues	3	bi12_1 ¹²⁴	2587_2 ¹²⁵ / bi12_2
Petite maille du filet de protection des boudins mis sur filière	1		177 ¹²⁶
Tri des moules trop petites et remise sur le gisement	1	bi23	
Epreuve thermique avant déploiement du naissain (<10 mm) sur le terrain	1		2493 ¹²⁷
Dépuration vs. Stockage sur glace, 48H avant le transport pour commercialisation	1		10084 ¹²⁸
Stockage sur glace, 48H avant le transport + transport à température ambiante vs. dépuration 48H avant le transport + transport sur glace pour commercialisation	1	10084 ¹²⁹	
Mélange d'espèces	1		2587_2 ¹³⁰
Désinfectant antifouling Virkon© (contenant du hydrogénopersulfate de potassium, du dodecyl-benzenesulfonate de sodium, de l'acide sulfamique et des tampons inorganiques)	1		5066
Application d'antifouling (saumure, vinaigre, chaux hydratée) avant un transport de 24H, avec ou sans rinçage	1		(3267_1)

¹¹⁸ Quatre zones des îles Madeleine, Golfe sur Saint Laurent, Canada

¹¹⁹ Onze zones de Nouvelle-Ecosse, Canada

¹²⁰ Deux lochs différents, Ecosse

¹²¹ Plusieurs zones de l'Atlantique, France

¹²² Mortalité par prédation par le crabe *Carcinus maenas*. Cette espèce de crabe est présente en France.

¹²³ Poupe ou proue du raft

¹²⁴ 273 moules/30 cm de boudin, chez la classe de moules « petites »

¹²⁵ 30 moules par cage, 15 *M. edulis* et 15 *M. trossulus*

¹²⁶ Mortalité par prédation par les canards plongeurs

¹²⁷ Température de l'eau élevée

¹²⁸ Mortalité avant le transport

¹²⁹ Mortalité lors du retrempeage, après le transport

¹³⁰ Espèce *M. trossulus*

3.5.1. Caractéristiques des animaux

L'effet des caractéristiques des animaux a été beaucoup plus étudié chez *M. edulis* (16 caractéristiques différentes étudiées par 26 études) que chez *M. galloprovincialis* (4 caractéristiques différentes étudiées par 10 études).

Chez *M. galloprovincialis*, près de la moitié des études (6/10) se sont intéressés à l'effet de l'espèce des moules et des génotypes intra- ou interspécifiques sur le risque de mortalité, dans le cadre de l'étude de la génétique des populations naturelles ou invasives et de l'introgression par hybridation. L'espèce *M. galloprovincialis* présentait souvent un risque de mortalité inférieur à celui des espèces *M. edulis* ou *M. trossulus*, bien que les résultats des études ne soient pas complètement unanimes.

Chez *M. edulis*, 40% des études (10/26) ont également exploré l'effet de l'espèce ou du génotype des moules sur le risque de mortalité. Globalement, *M. edulis* ne montrait pas de différence de mortalité avec l'espèce *M. trossulus*, mais semblait présenter un risque de mortalité supérieur à celui de *M. galloprovincialis*.

Quatre études, conduites par le même groupe de recherche français, ont conclu à une diminution du risque de mortalité chez des moules ayant un génotype « sélectionné » intraspécifique, *i.e.* des animaux issus de parents ayant survécu à un épisode de mortalité, illustrant le bénéfice de la reproduction des moules survivantes. A l'inverse, les génotypes hybrides interspécifiques de *M. edulis* semblaient présenter un risque de mortalité supérieur à celui des génotypes purs, quelle que soit l'espèce *M. edulis*, *M. galloprovincialis* ou *M. trossulus*.

Les caractéristiques physiologiques de l'animal ont été principalement étudiées chez *M. edulis*, notamment l'effet de la taille des animaux, alors que seulement quatre études se sont intéressées à ce caractère chez *M. galloprovincialis*. Les résultats des études étaient discordants quant à l'effet de ce facteur sur le risque de mortalité, pour les deux espèces. En effet, la taille des moules a souvent été étudiée en interaction avec d'autres facteurs, par exemple des caractéristiques de l'eau de mer stressantes pour *M. edulis*, ne permettant pas de réellement comparer ces résultats. Chez *M. edulis*, d'autres caractéristiques physiologiques ont été étudiées par une ou deux études au maximum.

Plusieurs études françaises (4/5 études), conduites par deux groupes différents, ont identifié qu'une fréquence élevée de moules présentant plus de 10 % d'anomalies cytogénétiques hémocytaires (*i.e.* nombre anormal de chromosomes dans les hémocytes) dans une population était associée à une augmentation du risque de mortalité chez les deux espèces, bien que l'espèce *M. edulis* ait été plus étudiée (4/5 études). Il est probable que ces anomalies cytogénétiques hémocytaires engendrent une fragilisation des animaux atteints, les rendant alors plus sensibles aux stress biotiques comme abiotiques.

3.5.2. Caractéristiques du site

L'effet des caractéristiques du site a été plus étudié chez *M. edulis* (11 caractéristiques différentes étudiées par 29 études) que chez *M. galloprovincialis* (14 caractéristiques différentes étudiées par 19 études).

Une variation géographique du risque de mortalité a été mise en évidence de façon globale par de nombreuses études chez les deux espèces (4/17 études chez *M. galloprovincialis* et 11/29 études chez *M. edulis*). Toutefois, les caractéristiques du site expliquant ces variations n'ont pas toujours été explorées, ce qui limite les possibilités d'explication de résultats parfois discordants.

Chez *M. galloprovincialis*, la moitié des caractéristiques (7/14) du site ont été étudiées par une seule étude, ce qui limite les possibilités de généralisation des résultats obtenus. Seule l'accumulation de sable ou de sédiment a été identifiée par trois études, conduites par la même équipe en Afrique du Sud, comme un facteur de risque de mortalité pour les moules de gisement. Cette même équipe de recherche a également rapporté que la hauteur des vagues avait une influence sur l'ampleur des mortalités de moules lorsque les gisements sont situés sur une côte, en comparaison avec une localisation plus protégée au sein d'une baie. Dans ces deux études d'observation, les mortalités ont été extrapolées à partir de l'observation de diminution de densité des moules sur les gisements suivis. D'après les auteurs, ces diminutions de densité étaient dues à un décrochement des moules, suite à l'action mécanique des vagues.

Chez *M. edulis*, trois études expérimentales, conduites par la même équipe au Royaume-Uni, se sont accordé pour conclure que l'augmentation de la durée d'enfouissement des moules est associé à un risque accru de mortalité. Ces recherches ont été conduites dans le cadre d'évaluations de l'impact des activités de dragage sur les fonds marins, en lien notamment avec la sédimentation.

L'effet de la présence de particules sédimentaires fines ou de vase a fait l'objet de quatre études, deux études expérimentales et deux études d'observation. Les deux études expérimentales, conduites par la même équipe de recherche, ont montré que le risque de mortalité des moules augmentait quand la granulométrie du sédiment diminuait. De même, une étude d'observation française, conduite sur le littoral de Oye-plage et Marck, a identifié une association entre la mortalité des moules d'élevage, la sédimentation de particules fines et la concentration en matières en suspension, conduisant à un processus d'envasement.

La présence de prédateurs a souvent été étudiée pour expliquer les mortalités chez *M. edulis*. Ce facteur représente près d'un tiers des études (10/29 études) dans la thématique des caractéristiques du site. La grande majorité des espèces de prédateurs étudiées sont présentes en France (**Tableau 17**).

Tableau 17. Espèces de prédateurs étudiées dans le corpus bibliographique : présence en France

Espèces de prédateurs	Référence des études	Présence en France
Canard Fuligule milouinan (<i>Aythya marila</i>)	177	oui
Canard Harelde de Miquelon (<i>Clangula hyemalis</i>)	177	oui
Crabe vert européen (<i>Carcinus maenas</i>)	9560 / 6023_1 / 6023_2 / maj2_152_1	oui
Crabe japonais (<i>Hemigrapsus sanguineus</i>)	8841_1 / 8841_2	oui, sur les côtes de la Manche-Mer du Nord
Bigorneau perceur (<i>Nucella lapillus</i>)	bi10	oui
Etoile de mer (<i>Asterias rubens</i>)	maj2_152_1	oui
Etoile de mer (<i>Asterias forbesi</i>)	365_3	non
Crabe araignée (<i>Libinia emarginata</i>)		non
Crabe vert européen (<i>Carcinus maenas</i>)		oui
Crabe tourteau (<i>Cancer irroratus</i>)		non
Escargot faux perceur d'huîtres (<i>Eupleura caudata</i>)		oui
Perceur d'huîtres (<i>Urosalpinx cinerea</i>)		oui, sur certaines côtes de l'Atlantique
Bulbe à crampons (<i>Busycon carira</i>)		oui
Buccin (<i>Busycotypus canaliculatus</i>)		oui

3.5.3. Conditions climatiques

L'effet des conditions climatiques a assez peu été étudié chez *M. galloprovincialis* comme chez *M. edulis* (4 facteurs différents étudiés par 9 études pour les deux espèces).

Une variation saisonnière du risque de mortalité a été mise en évidence de façon globale par près d'un tiers des études chez les deux espèces de moules (3/9 études chez *M. galloprovincialis* et 3/9 études chez *M. edulis*). Les saisons à risque variaient selon l'hémisphère dans laquelle les études étaient conduites et ne correspondaient pas forcément aux saisons les plus chaudes, notamment en Afrique du Sud où des pics de mortalité ont été rapportés en saison hivernale.

Deux facteurs saisonniers ont été explorés, notamment la température de l'air ou les écarts de température entre l'air et l'eau de mer. La pluviométrie n'a, quant à elle, fait l'objet que d'une seule étude chez *M. edulis*.

Les trois études conduites chez *M. galloprovincialis* ont conclu à une augmentation du risque de mortalité des moules lors de vagues de chaleur (température de l'air supérieure à 27°C). Le réchauffement de la température de l'air a été associé à un risque accru de mortalité par quatre études sur cinq chez *M. edulis*, dont trois ont été conduites par la même équipe de recherche pour expliquer l'aire de distribution de l'espèce et sa potentielle modification liée au réchauffement climatique. En revanche, l'étude française n'a pas mis en évidence d'effet particulier de ce facteur sur le risque de mortalité. Néanmoins, cette étude a considéré l'effet des variations saisonnières de la température de l'air sur le risque de mortalité des moules, qui sont nettement moins contrastées que lors d'une canicule, comme cela a été étudié dans les autres études.

Chez *M. galloprovincialis*, l'écart thermique entre l'air et l'eau de mer a été étudié par quatre études expérimentales, avec des écarts de température relatifs variant d'un facteur 10 (de 2 à 20°C). Ces différences de définition d'un écart de température de l'air entre les études peuvent expliquer en partie les conclusions discordantes quant à l'impact de ce facteur sur le risque de mortalité.

3.5.4. Caractéristiques de l'eau de mer

L'effet des caractéristiques de l'eau de mer a été un peu moins étudié chez *M. galloprovincialis* (7 caractéristiques différentes étudiées par 17 études) que chez *M. edulis* (10 caractéristiques différentes étudiées par 19 études).

Chez *M. galloprovincialis*, cet effet a été étudié exclusivement selon une approche expérimentale. Les trois caractéristiques de l'eau de mer les plus étudiées étaient l'augmentation de la température, la diminution de la salinité et la diminution du pH (acidification) mais les résultats des études étaient discordants quant à leur effet sur le risque de mortalité des moules. En effet, les conditions expérimentales étaient différentes. Il semblerait qu'une température de l'eau de mer supérieure à 24°C soit associée à un risque de mortalité accru chez *M. galloprovincialis* car dans les deux études n'ayant pas observé d'effet du réchauffement de l'eau, la température maximale ne dépassait pas 21°C.

La diminution de la salinité a fait l'objet de quatre études, conduites par deux équipes de recherche. Les diminutions étudiées étaient très importantes (3/4 études), aboutissant à des salinités inférieures à 11 psu. Ce niveau de dessalure n'est quasiment jamais atteint sur le littoral français métropolitain (REPHY – French Observation and Monitoring program for Phytoplankton and Hydrology in coastal waters, 2017). De plus, l'effet d'une diminution de la salinité a été souvent étudié en combinaison avec des températures de l'eau élevées, supérieures à 27°C.

Enfin, une étude a montré qu'une exposition brutale des moules à une salinité basse entraînait des mortalités beaucoup plus importantes qu'une acclimatation progressive (sur 14 jours) jusqu'au même niveau final de salinité, et ceci quelle que soit la température de l'eau (à 13°C comme à 27°C).

L'effet d'une diminution du pH a été étudié dans cinq conditions expérimentales différentes (acclimatation progressive ou diminution brutale, durée de l'exposition variable, valeurs de pH variables), ce qui peut expliquer en partie les résultats discordants observés.

Chez *M. edulis*, le réchauffement est la caractéristique de l'eau de mer qui a été la plus étudiée (15/19 études) et la grande majorité (13/15) des études a conclu à un risque de mortalité accru pour les moules. Il semblerait qu'une température de l'eau de mer supérieure à 20°C soit associée à un risque de mortalité accru chez *M. edulis*. L'une des deux études qui n'a pas mis en évidence d'effet de ce facteur a étudié l'effet de températures de l'eau à 6°C et 12°C, inférieures à celles des autres études, en interaction avec une exposition au zinc ou au cadmium sur la mortalité des moules. L'autre étude a étudié une augmentation de la température de 20°C à 26°C, en interaction avec une diminution du pH et/ou de la concentration en oxygène de l'eau de mer. Les interactions avec deux autres stress ont pu compenser l'effet de l'augmentation de la température sur le risque de mortalité des moules.

L'effet d'une diminution du pH a fait l'objet de quatre études, dont seulement deux ont montré que ce facteur augmentait le risque de mortalité des moules. Une étude a conclu à l'absence d'effet d'une diminution du pH lorsque ce facteur est associé à une augmentation de la température de l'eau et/ou une diminution de sa concentration en oxygène. Cette étude a été présentée dans la même publication que l'une des deux études ayant conclu à un effet de l'acidification de l'eau de mer sur le risque de mortalité, pour illustrer l'effet parfois masquant des interactions entre plusieurs facteurs de stress sur le risque de mortalité des moules.

D'autres caractéristiques de l'eau de mer ont été majoritairement étudiées par une seule étude, ce qui limite les possibilités de généralisation des résultats obtenus.

3.5.5. Apports des milieux aquatiques et terrestres

L'effet des apports des milieux terrestres et aquatiques sur la mortalité des moules a été beaucoup plus étudié chez *M. galloprovincialis* (27 substances chimiques différentes étudiées par 19 études) que chez *M. edulis* (28 substances chimiques différentes étudiées par 6 études).

Chez *M. galloprovincialis*, cet effet a principalement été exploré selon des approches expérimentales : sur 19 études, 18 sont expérimentales et une seule est observationnelle.

La moitié des substances étudiées n'a fait l'objet que d'une seule étude. Seuls le cuivre (Cu), le fer (Fe), le plomb (Pb) et le zinc (Zn) ont été étudiés par plus de trois études.

Les concentrations d'exposition aux substances utilisées dans les trois quarts des expériences (14/18) étaient largement supérieures à la PNEC, d'un facteur allant de 25 à 50 000, limitant les possibilités d'extrapolation des résultats observés au contexte français. La seule étude d'observation sur le terrain a été conduite en Italie et a mis en évidence une corrélation positive entre le pourcentage de mortalité des moules et les concentrations dans les tissus des moules d'aluminium (Al), de fer, de plomb et d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Les 11 autres substances chimiques explorées dans cette étude n'étaient pas associées à la mortalité des moules, notamment le zinc et le cuivre, alors que plusieurs études expérimentales, dont une ayant utilisé des doses d'exposition environnementalement pertinentes, ont conclu à une augmentation du risque de mortalité des moules lors de leur exposition à chacun de ces deux métaux.

En conclusion, plusieurs substances chimiques ont été identifiées comme associées à une augmentation du risque de mortalité chez *M. galloprovincialis*, dans des conditions d'observation sur le terrain ou en conditions expérimentales utilisant des concentrations environnementalement réalistes. Deux études s'accordent sur l'effet létal du fer sur les moules alors que les résultats des études sont discordants pour le cuivre, le zinc et les HAP. Les risques de mortalité liés à une

exposition à l'aluminium, au plomb et à la carbamazépine ont été mis en évidence par une seule étude présentant des conditions transposables au contexte français, pour chacune de ces substances.

Chez *M. edulis*, l'effet des polluants a été étudié par quatre études expérimentales et deux études d'observation. Seuls les effets du cadmium (Cd) et du zinc ont été étudiés par plus de deux études. L'exposition à ces métaux était associée à un risque accru de mortalité des moules en laboratoire alors que les études d'observation n'ont pas identifié d'augmentation de risque particulière. Toutefois, les concentrations utilisées en laboratoire étaient 250 à 10 000 fois supérieures aux PNEC (**Annexe 9**).

Les résultats des deux études d'observation conduites en France sont concordants et n'identifient aucune substance chimique recherchée, aux concentrations détectées dans l'eau de mer, comme associée à un risque de mortalité accru chez les moules, notamment les métaux lourds et les HAP.

3.5.6. Organismes pathogènes

L'effet de la présence d'organismes pathogènes sur la mortalité des moules a été plus étudié chez *M. edulis* (12 organismes pathogènes différents étudiés par 14 études) que chez *M. galloprovincialis* (9 organismes pathogènes différents étudiés par 11 études).

Chez *M. galloprovincialis*, la présence de bactéries du genre *Vibrio*, de l'espèce *aestuarianus* ou du groupe *Splendidus*, a été identifiée comme un facteur de risque de mortalité par plusieurs études expérimentales, conduites par la même équipe de recherche espagnole. Toutefois, les résultats étaient discordants selon la voie d'exposition des moules à ces bactéries. En effet, l'injection de doses importantes de bactéries (de 10^7 à 10^{10} UFC/mL¹³¹) dans le muscle adducteur des moules entraînait des mortalités alors que l'immersion de moules dans un aquarium rempli d'eau et de bactéries, plus proche d'une exposition dans des conditions naturelles, n'entraînait pas de mortalité de moules, bien que la concentration de bactéries utilisée en immersion (10^{10} UFC/mL) soit assez élevée. Toujours dans cette même étude espagnole, pour pouvoir induire une mortalité des moules, les auteurs ont additionné deux stress supplémentaires à l'immersion de moules dans de l'eau contaminée : une température de l'eau élevée (25°C) et des conditions d'hypoxie pendant 8 heures.

L'étude française a reproduit la transmission d'un agent infectieux entre des moules issues d'un site ayant connu un épisode de mortalité et des moules sentinelles, obtenues par reproduction en éclosérie de moules n'ayant jamais connu d'épisode de mortalité. Toutefois, la présence de bactéries du genre *Vibrio*, de l'espèce *aestuarianus* ni du groupe *Splendidus* n'a pas été détectée dans cette étude.

Les études s'étant intéressées à l'effet de la présence d'endolithes sur les coquilles de *M. galloprovincialis* sur leur risque de mortalité ont montré des résultats discordants. Une étude Sud-Africaine a mis en évidence une diminution du risque de mortalité lors de vagues de chaleur, chez les moules de gisement qui présentaient des endolithes sur leurs coquilles. La présence des endolithes permettrait aux moules de diminuer la température de leur coquille et de leur corps, augmentant ainsi leur tolérance à la chaleur. A l'inverse, une autre étude Sud-Africaine a mis en évidence une augmentation du risque de mortalité des moules de gisement qui présentaient des endolithes sur leurs coquilles, lors de leur exploitation par l'homme. La présence d'endolithes fragiliserait la coquille des moules, les rendant alors plus vulnérables à l'intensité de marche des pêcheurs à pied sur le gisement, et augmentant leur risque de mortalité par écrasement. Enfin, la troisième étude a mis en évidence un risque de mortalité accru chez les moules *M.*

¹³¹ Unités formant colonies

galloprovincialis infestées par des endolithes en Afrique du Sud, où cette espèce a été introduite et est devenue invasive, par rapport au Portugal, dont *M. galloprovincialis* est native.

Chez *M. edulis*, la reproduction de mortalités de moules a été réalisée en conditions expérimentales par trois études conduites par la même équipe de recherche française, entre des moules issues d'un site ayant connu un épisode de mortalité et des moules sentinelles, obtenues par reproduction en éclosure de moules n'ayant jamais connu d'épisode de mortalité. Les résultats de ces études suggèrent la transmission horizontale d'un agent infectieux entre les moules, capable d'induire des mortalités. Toutefois, ces études n'ont pas pu identifier cet/ces organisme(s) pathogène(s) et deux d'entre elles ont pu confirmer l'absence de détection du virus OsHV-1, des bactéries du genre *Vibrio*, de l'espèce *aestuarianus* ou du groupe *Splendidus*, ainsi que celle du parasite réglementé *Marteilia refringens*.

L'absence d'association entre le risque de mortalité des moules et la présence de l'herpèsvirus OsHV-1 ou du parasite *Marteilia refringens* a été confirmée par quatre études pour chacun de ces organismes pathogènes déjà détectés dans les eaux françaises.

En revanche, des résultats discordants ont été obtenus par cinq études (dont quatre françaises conduites par trois équipes de recherche différentes), en identifiant la présence de bactéries du genre *Vibrio* du groupe *Splendidus* comme un facteur de risque de mortalité. Il est à noter que dans les quatre études françaises, les moules ont été exposées aux bactéries par injection intramusculaire, ce qui limite les possibilités d'extrapolation des résultats obtenus. En revanche, l'étude conduite par le Laboratoire National de Référence (LNR) français a détecté une surreprésentation des bactéries *Vibrio* du groupe *Splendidus* dans les isolats bactériens issus de moules prélevées lors de mortalités massives sur le terrain en 2014 en France. L'étude néerlandaise a induit une mortalité de moules adultes en bonne santé apparente, en laboratoire, en ajoutant un milieu nutritif bactérien dans l'eau de l'aquarium. Les bactéries isolées dans l'hémolymphe et les tissus des moules mortes, et dans l'eau de mer à la fin de l'expérience appartenaient pour moitié au genre *Vibrio* du groupe *Splendidus* et pour moitié au genre *Photobacterium*. L'étude s'est poursuivie par l'exposition par immersion de larves de moules et de moules adultes, en bonne santé apparente, à ces isolats bactériens. Des mortalités massives ont été observées chez les larves, confirmant le rôle pathogène de ces bactéries sur ce stade physiologique. En revanche, aucune mortalité de moule adulte n'a été observée. Les auteurs ont suggéré que les moules adultes sont assez résistantes aux infections opportunistes par des bactéries du genre *Vibrio*, en l'absence de facteur biotique ou abiotique favorisant la survenue de mortalité.

3.5.7. Pratiques culturelles / d'élevage / de pêche

L'effet des pratiques culturelles sur la mortalité des moules a été beaucoup plus étudié chez *M. edulis* (16 pratiques différentes étudiées par 25 études) que chez *M. galloprovincialis* (8 pratiques différentes étudiées par 13 études).

Chez *M. galloprovincialis*, l'origine géographique du naissain a été étudiée par la moitié des études (7/13), toutes observationnelles, sous l'aspect du naissain d'origine locale versus du naissain d'une autre origine et transplanté sur un site de grossissement. Le sens de l'effet de ce facteur sur le risque de mortalité variait selon les études.

Il est à noter que deux études expérimentales conduites par la même équipe espagnole ont mis en évidence une réduction de la mortalité de *M. galloprovincialis* lorsqu'elle est élevée en mélange avec *Xenostrobus securis*, espèce de moules invasive en Galice. Toutefois, les résultats ne sont pas extrapolables au contexte français, cette espèce n'étant pas présente sur le littoral français métropolitain.

Chez *M. edulis*, l'origine géographique du naissain locale vs. transplantée a été étudiée par un tiers des études (9/25). Six de ces études ont été conduites au Canada (dont quatre dans les années 1990) et trois ont été menées en France. La majorité des études (7/9) n'a pas identifié

d'effet particulier de ce facteur sur le risque de mortalité. La seule étude ayant mis en évidence un risque accru de mortalité pour les naissains transplantés a étudié l'espèce *M. trossulus*.

Sept études ont également étudié différentes origines géographiques de naissain, sans forcément les comparer au naissain capté localement, dans le but d'identifier des secteurs où les moules présenteraient naturellement des mortalités plus faibles. Les trois études canadiennes, conduites dans les années 1987-1995, ainsi qu'une étude française conduite en Bretagne Nord ont identifié des origines de naissain qui présentaient des risques de mortalité inférieurs. En revanche, les trois autres études françaises, conduites en région Pays de la Loire par la même équipe de recherche, n'ont pas mis en évidence de différence de risque de mortalité entre les différentes origines de naissain testées.

La densité des moules en cage a été explorée par trois études canadiennes, conduites par deux équipes de recherche différentes, mais seule une étude a mis en évidence une mortalité accrue des moules de petite taille au bout de 10 mois d'élevage, quand la densité initiale en cage est élevée (273 petites moules pour 30 cm de boudin).

D'autres pratiques d'élevage ont fait l'objet d'une seule étude, limitant les possibilités d'extrapolation des résultats obtenus.

3.5.8 Etude des combinaisons de facteurs d'exposition

Dans les chapitres précédents, les relations entre différents facteurs d'exposition et risque de mortalité de moule ont été examinées facteur par facteur. Cette approche permet de faire le point des connaissances globales existantes pour un facteur donné. Toutefois, les moules sont exposées simultanément à l'action conjointe de plusieurs facteurs de risque dans le milieu naturel. Seulement un tiers des études du corpus bibliographique (53/151) a étudié l'effet conjoint de l'exposition simultanée à deux ou trois facteurs. Ces interactions entre plusieurs facteurs d'exposition interviennent en synergie ou en antagonisme et modifient l'effet d'un facteur individuel sur le risque de mortalité des moules. Les interactions de facteurs d'exposition étudiées dans le corpus bibliographique ont déjà été discutées dans les chapitres précédents relatifs à chaque thématique de facteurs étudiés, souvent pour éclairer des résultats discordants sur un même facteur. L'objet de ce chapitre vise à recenser ces interactions et à décrire les études s'y étant intéressées.

Près d'un tiers des études portant sur *M. galloprovincialis* (20/70 études) ont étudié l'effet combiné de plusieurs facteurs d'exposition sur le risque de mortalité (**Tableau 18**), réparties en 22 combinaisons différentes de facteurs, dont la majorité était des combinaisons de deux facteurs. Seulement cinq combinaisons de trois facteurs ont été étudiées. Les interactions entre les facteurs d'exposition ont plutôt été étudiées par des approches expérimentales (13/20 études), permettant de contrôler tous les autres facteurs lors de la variation des deux ou trois facteurs d'exposition d'intérêt, afin d'être en mesure d'interpréter l'interaction observée.

Par exemple, une interaction synergique entre trois facteurs d'exposition a été explorée et interprétée par une étude espagnole. Pour pouvoir induire une mortalité des moules, les auteurs ont dû additionner trois facteurs d'exposition concomitants : l'immersion de moules dans un aquarium rempli d'eau (1) contaminée par des bactéries du genre *Vibrio*, de l'espèce *aestuarianus* ou du groupe *Splendidus*, (2) avec une température élevée (25°C), et (3) en conditions d'hypoxie pendant 8 heures. Dans une autre étude, les mêmes auteurs n'ont pas pu reproduire les mortalités de moules en combinant l'immersion des animaux dans un aquarium d'eau contaminée par les mêmes bactéries avec, soit une eau de mer à température de 25°C, soit des conditions d'hypoxie. Une autre étude espagnole a mis en évidence l'atténuation de l'effet de la diminution du pH de l'eau de mer, qui, seule, augmente le risque de mortalité des moules dans cette étude, par l'effet du mélange d'espèces de moules (avec *Xenostrobus securis*). Ce second facteur permet de diminuer le risque de mortalité de *M. galloprovincialis* liée à l'acidification de l'eau.

Chez *M. edulis*, des interactions entre facteurs d'exposition ont été étudiées par 41% (33/81) des études, dont la moitié était conduite selon une approche observationnelle (18/33 études). Au total,

25 combinaisons distinctes de facteurs ont été étudiées, majoritairement de deux facteurs (**Tableau 19**). Ces études d'observation n'ont tenu compte de l'effet que de seulement deux facteurs d'exposition sur le risque de mortalité des moules, sans intégrer d'autres circonstances du terrain. Cette prise en compte minimaliste des interactions survenant en milieu naturel peut expliquer les résultats discordants observés entre des études ayant étudié les effets des mêmes facteurs (notamment le site géographique et l'origine du naissain) sur le risque de mortalité, conduites dans des contextes différents.

L'unique combinaison de trois facteurs a été étudiée en conditions expérimentales et cette étude a démontré une interaction antagoniste. Elle a mis en évidence une absence d'effet des actions conjuguées d'une diminution de la température de l'eau de mer, d'une diminution de sa concentration en oxygène et d'une augmentation de sa température sur le risque de mortalité des moules.

1
2

Tableau 18. Combinaisons de facteurs d'exposition étudiées pour *M. galloprovincialis*
(Les interactions de deux facteurs sont identifiées par des cases noires, les interactions de trois facteurs d'exposition sont identifiées par des croix jaunes)

	Animal		Site		Climat		Eau de mer		Polluants		Organismes pathogènes		Pratiques	
	espèce génotype petite taille anomalies cytogénétiques	zone au sein du site site d'invasion vs. site natif site vs. baie accumulation de sable/sédiment augmentation de la durée d'enfouissement exposition aux vagues hauteur des vagues position haute sur estran position dans le gisement exposition au soleil vs. ombre prédation gradient de pollution	saïson réchauffement de température de l'air écart thermique eau/air nombre de stress thermiques	Augmentation de la température Augmentation du nombre d'expositions à une température de l'eau de mer élevée Diminution de la salinité Diminution du pH Diminution de l'oxygène dissous Augmentation de la turbidité Faible quantité de nourriture	Métaux lourds (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, V, Pb, Zn, Al, Fe) Al As Cd Cr Cu Fe Hg Ni Pb V Zn Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) Polychlorobiphényles (PCB) Atrazine (herbicide) Cyperméthrine (insecticide pyréthroïde) Carbamazépine (médicament antiépileptique) Phthalates (plastifiant) Alkylphénols (détergents, additifs de carburants et lubrifiants, résines) Pyriéthène de zinc (ZnPT, biocide antifouling) Nanoparticules d'oxyde de zinc (ZnO) 2,4,6-trinitrotoouine (TNT, composé explosif) Hexahydro-1,3,5,7-tiazine (RDX, composé explosif) Octahydro-1,3,5,7-tétranitro-1,3,5,7-tétrazocine (HMX, composé explosif) Liquides toxiques d'imidazolium (1-butyl-3-méthylimidazolium tétrafluoroborate + 1-méthyl-3-octylimidazolium tétrafluoroborate) Eau usée de presse d'huile d'olive Lixivats (= effluent liquide issu des déchets par fermentation / eau de pluie)	Agent infectieux non identifié Profil bactériologique Bactérie <i>Vibrio aestuvarius</i> Bactéries <i>Vibrio</i> du groupe <i>Splendidus</i> Virus Ostreid Herpesvirus-1 (OstHV-1) Parasite <i>Marteilia refringens</i> Algue toxique dinoflagellée <i>Ostreopsis cf. ovata</i> Présence d'épibiontes sur la coquille Parasitisme externe (endolithes)	Origine géographique du naissain locale vs. transplantée Position au sein de la structure d'élevage Mélanges d'espèces de moules Polyculture (poissons) Polyculture (algues <i>Gracilaria vermicosa</i>) Durée de retrempage des moules avant leur transport pour commercialisation > 11 jours Densité de stockage pendant le retrempage des moules avant leur transport pour commercialisation (kg/poche) Augmentation de l'intensité de de la marche sur les gisements de moules exploités							
Animal														
Site														
Climat														
Eau de mer														
Polluants														
Organismes pathogènes														
Pratiques														

3

Tableau 19. Combinaisons de facteurs d'exposition étudiées pour *M. edulis*
 (Les interactions de deux facteurs sont identifiées par des cases noires, les interactions de trois facteurs d'exposition sont identifiées par des croix jaunes)

	Animal	Site	Climat	Eau de mer	Polluants	Organismes pathogènes	Pratiques	
Mytilus edulis	Animal Espèce vs. <i>M. trossulus</i> Espèce vs. <i>M. galloprovincialis</i> Génotype interspécifique Génotype intraspécifique Génotype intraspecific Palme degré cholestérolémie Présence d'ovaires d'ovocytes présentant > 10% d'anomalies cytogénétiques hématocytaires dans la population Présence néoplasme hématocytaires Palme taille Palme croissance Palme santé de condition Age (juvéniles vs. Adultes) Palme mortels émergences / lesions émergences de maintenance élevés Rit de la ponte Période de ponte Accumulation d'épibiose Régénération de la coquille							
	Site Bât site général (caractéristiques non détaillées) Augmentation de la profondeur d'attachement Augmentation de la durée d'attachement Dimension de la granulométrie du sédiment Augmentation de la concentration de matériaux organiques en suspension Présence de vase Elevation aux vagues Sûreté de gisement complexe Position haute sur rochers Position latérale et oblique Présence de flûtes Chamaejasme gigan							
	Climat Barrage Régularisation de la température de l'air Augmentation du nombre de stress thermiques Prévalence							
	Eau de mer Augmentation de la température Augmentation du nombre de stress thermiques Diminution de la température Diminution de la salinité Diminution du pH Variation de la teneur en oxygène dissous Augmentation de la viscosité Palme quantité de nourriture Présence de nutriments minéraux, vitamines, phosphates, acides aminés, silicates) Egalité entre les divers phylogénétiques							
	Polluants Al Ba Bis Cd Co Cr Cu Pb Pc Mn Ni Pb Sb Ti Zn Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) Polychlorobiphényles (PCB) Pesticides organochlorés (POC, HCH Dichlorodiphénylchlorométhane (DDT, pesticide organochloré) Chlorure (insecticides organochlorés) Pesticides organophosphorés Pesticides et pesticides et phytosanitaires hydrolytiques Azoteux (nitrites) Bromures (BT, composé organosoluble et dérivés de l'édéin, arbutolins utilisés jusqu'en 1992) Pyréthrine de zinc (ZPT, insecte antiparasitaire) Eau usées non traitées Palme densité							
	Organismes pathogènes Agent pathogène non identifié Puif bactériologique Bactéries anaérobies Bactéries opportunistes hétérotrophes Bactérie Vibrio aestuvarius Bactéries Vibrio du groupe Splendidus Bactéries du groupe Splendidus de l'espèce V. aestuvarius, V. parvulus et V. anguillarum Bactéries du genre Photobacterium Virus CHUV-1 Peste de Mytilus edulis Peste de Mytilus edulis							
	Pratiques Origine géographique du matériel local de semenciers Origine géographique du matériel local de semenciers Origine zoonotique élevage en flûte vs. collecte sur rochers Élevage en cages suspendues vs. bouées suspendues Élevage en cages suspendues à 16 m de profondeur (en cascade) de 6 m (top) Profondeur des lanternes sur flûte à 6 m vs. 2 m Position au sein de la structure d'élevage Densité élevée dans les cages suspendues Palme maille du filet de protection des bouées mis sur flûte Rit des moules trop petites et ramées sur le gisement Épave thermique avant déplacement du matériel (10-20 min) sur le terrain Déposition vs. Stockage sur glace, 48h avant le transport pour commercialisation Stockage sur glace, 48h avant le transport + transport à température ambiante vs. déposition 48h avant le transport + transport sur glace pour commercialisation Mélange d'espèces Bactéricide antifongique Virucide (contenant du hydroxybenzotriazole de potassium, de doxycycline benzoyldiméthyle de sodium, de lactate sodique et des tampons inorganiques) Application d'antifongique (amoxicilline, vancomine, chlorhexidine) avant un transport de 24h, avec ou sans bricole							

4 Discussion

4.1 Principaux enseignements

La recherche bibliographique maximalisée réalisée dans le cadre de cette revue systématique de la littérature a permis de décrire le paysage de la connaissance existante sur les facteurs de risque de mortalité des espèces de moules *M. edulis* et *M. galloprovincialis*. Cette revue a décrit la diversité des définitions de la mortalité des moules et ses facteurs de risque. Elle a également permis d'apprécier la quantité et la qualité des preuves recensées.

De façon générale, les résultats de cette revue étaient très hétérogènes, que ce soit au regard de la méthode de mesure de la mortalité, des thématiques des facteurs d'exposition étudiés, ou de la définition de ces facteurs. De fait, il n'a pas été possible de comparer les facteurs sur la base de l'importance de leur relation avec le risque de mortalité des moules. Par conséquent, il n'a pas été possible d'aboutir à une hiérarchisation des facteurs de risque de mortalité de moules identifiés, ni de leurs combinaisons.

Au final, 151 études présentées dans 115 documents ont été incluses dans cette revue systématique. L'analyse des caractéristiques clés des 151 études a montré que ce corpus bibliographique comportait deux grands groupes. Le premier groupe rassemble des études concernant l'espèce *M. edulis*, plutôt des animaux d'élevage ou d'écloserie, selon une approche observationnelle, conduites dans les Océans Atlantique et Pacifique et en Mer du Nord, s'étant intéressées à l'effet des caractéristiques du site, de l'animal, des organismes pathogènes, des conditions climatiques ou des pratiques d'élevage sur le risque de mortalité des moules. Le second groupe rassemble des études concernant l'espèce *M. galloprovincialis*, plutôt des animaux de gisement, selon une approche expérimentale, conduites en Mer Noire ou Méditerranée, s'étant intéressées à l'effet des polluants, des caractéristiques de l'eau de mer ou des conditions climatiques sur le risque de mortalité des moules.

La mortalité des moules était définie différemment selon le type d'étude. Cette hétérogénéité peut s'expliquer d'une part par la nature des études rassemblées dans le corpus bibliographique, issues de disciplines très variées. D'autre part, cette revue a agrégé les données d'études expérimentales et observationnelles, qui n'impliquent pas les mêmes contraintes pour mesurer la mortalité des moules. La mortalité était une variable qualitative, évaluée au niveau individuel de l'animal et son format était binaire dans les études expérimentales. Dans les études d'observation, la mortalité était quantifiée au niveau de la population étudiée et son format était principalement une prévalence, permettant de faire le bilan d'une situation sur toute la période étudiée ou à un moment donné au cours de l'étude. Bien que le comptage soit la méthode d'estimation de la mortalité privilégiée par la majorité des études d'observation, une grande diversité des techniques a été observée. En général, la mortalité était mesurée plusieurs fois au cours de la période étudiée, selon une fréquence variant de l'heure à l'année. La plupart des études expérimentales avait une fréquence quotidienne de suivi de la mortalité, alors que la fréquence était le plus souvent mensuelle pour les études d'observation.

Cette revue systématique de la littérature a permis de recenser 125 facteurs étudiés pour leur relation avec la mortalité des moules. Certains facteurs ont été identifiés de façon consensuelle alors que d'autres sont anecdotiques, certains facteurs sont modifiables par l'homme et d'autres ne le sont pas, certains facteurs sont transposables au contexte français et d'autres ne le sont pas. La majorité des facteurs potentiellement associés à un risque accru de mortalité a été étudiée par une ou deux études. Quelques facteurs ont été plus étudiés mais les résultats des études n'étaient pas toujours concordants, sans que les conditions d'étude ne permettent d'expliquer cette discordance en général. Pour certains facteurs, plusieurs études ayant rapporté des résultats concordants ont parfois été conduites par une même équipe de recherche. Si les études n'étaient pas indépendantes, ceci augmentait artificiellement le nombre d'études s'étant intéressées à un même facteur, entraînant un biais de publication et limitant la pertinence d'une interprétation strictement quantitative de ces résultats (« vote counting »). Pour limiter ce biais, la diversité des

équipes de recherche a été prise en compte pour les facteurs étudiés par plusieurs études. Au final, le CST a choisi de privilégier les facteurs étudiés par au moins trois études dont les caractéristiques étaient transposables au contexte français et conduites par au moins deux équipes de recherche différentes.

Par ailleurs, au regard de la diversité des mesures d'association utilisées dans les études, les associations entre les facteurs étudiés et l'augmentation du risque de mortalité chez les moules n'ont pas pu être quantifiées. Le nombre d'études s'étant intéressées à un facteur n'a pas permis de présager de l'importance de sa relation avec la mortalité des moules, en raison de potentiels biais de publication évoqués ci-dessus. Par conséquent, il n'a pas été possible de hiérarchiser les facteurs de risque de mortalité de moules identifiés, ni leurs combinaisons.

Chez les deux espèces de moules exploitées en France, une variation géographique du risque de mortalité a été mise en évidence de façon globale, sans que des caractéristiques particulières du site expliquant ces variations aient été identifiées. Seule la présence de prédateurs présente une responsabilité évidente en termes de mortalités mytilicoles. De même, une variation saisonnière du risque de mortalité a été mise en évidence, sans que des conditions climatiques particulières aient été identifiées à l'exception de vagues de chaleur. L'augmentation de la température de l'eau de mer (supérieure à 24°C pour *M. galloprovincialis* et supérieure à 20°C pour *M. edulis*) était le seul facteur d'exposition commun aux deux espèces de moules et identifié de façon consensuelle comme associé à un risque de mortalité des moules accru.

Chez *M. galloprovincialis*, les facteurs d'exposition suivants ont été identifiés de façon consensuelle comme associés à une augmentation du risque de mortalité :

- l'accumulation de sable ou de sédiment sur un gisement ;
- la présence de fer dans l'eau de mer ;
- la présence de plomb dans l'eau de mer ;
- la présence de bactéries du genre *Vibrio*, de l'espèce *aestuarianus* ou du groupe *Splendidus*, associée à une température de l'eau de mer élevée et en conditions d'hypoxie.

Chez *M. edulis*, les moules issues de parents ayant naturellement survécu à un épisode de mortalité, *i.e.* ayant un génotype intraspécifique « sélectionné », présentaient un risque de mortalité diminué. Les facteurs suivants ont été identifiés de façon consensuelle comme associés à une augmentation du risque de mortalité :

- la présence, dans la population, d'une fréquence élevée de moules présentant plus de 10 % d'anomalies cytogénétiques dans leurs cellules hématocytaires (*i.e.* nombre anormal de chromosomes dans les hématocytes) ;
- l'augmentation de la durée d'enfouissement des moules sur un gisement ;
- une augmentation de particules sédimentaires fines ou la présence de vase ;
- la présence d'un agent infectieux transmissible, non identifié.

De plus, il est probable que des facteurs de risque identifiés appartenant à plusieurs groupes thématiques soient concomitants, et que les relations qui les lient à la mortalité soient seulement des associations statistiques, sans nature strictement causale. Certains de ces facteurs sont probablement des facteurs de confusion. Ainsi, le CST rappelle que ce n'est pas parce qu'un facteur est statistiquement lié à la mortalité de moules qu'il en est la cause. Un facteur de risque est une notion probabiliste. Dire que le risque de mortalité de *M. edulis* est augmenté quand la température de l'eau de mer dépasse 20°C ne veut pas dire qu'une eau de mer supérieure à 20°C va entraîner des mortalités de moules. Cela signifie que quand la température de l'eau dépasse 20°C, les moules ont plus de chances de mourir que quand l'eau est plus froide.

Par ailleurs, les mortalités de moules sont probablement la résultante d'un cumul d'expositions à plusieurs facteurs de risque. Ces interactions entre les différents facteurs d'exposition ont été assez peu étudiées dans le corpus bibliographique et les études se sont souvent limitées à l'exploration de l'effet conjoint de seulement deux facteurs sur le risque de mortalité des moules, simplifiant à l'extrême la complexité du milieu marin.

Cette revue a permis de faire apparaître des lacunes dans la connaissance, qui peuvent s'expliquer par trois grands motifs. Premièrement, il existe un manque véritable d'études dans certaines thématiques de facteurs d'exposition comme les conditions climatiques ou les

organismes pathogènes. Plus précisément, il existe peu d'études de l'effet des apports des milieux aquatiques et terrestres, des caractéristiques de l'eau de mer ou des organismes pathogènes sur le risque de mortalité en conditions d'observation sur le terrain, bien que ce déficit puisse s'expliquer par une maîtrise plus aisée de ces facteurs en conditions de laboratoire. De même, peu d'études expérimentales se sont intéressées aux effets cocktail, aux multi-expositions ou aux effets chroniques des polluants. Ce déficit de connaissance est d'autant plus marqué en France, qui ne compte que 19% des études incluses dans cette revue. De plus, aucune étude d'observation n'a étudié l'effet concomitant de plus de deux facteurs sur le risque de mortalité, alors que de telles interactions (synergie, antagonisme) existent en milieu naturel entre de très nombreux facteurs.

Deuxièmement, il existe des études dont les protocoles sont en réalité peu robustes et qui n'ont pas pu être pleinement exploitées pour cette revue systématique. En effet, il a été constaté que seulement 35% des études disposait d'un protocole d'étude fiable (*i.e.* pertinence méthodologique satisfaisante).

Troisièmement, les connaissances sont trop disparates pour pouvoir en faire une synthèse et le CST a fait le choix de ne pas considérer les facteurs étudiés par une seule étude ou par plusieurs études conduites par la même équipe de recherche, ni les études dont les conditions n'étaient pas transposables au contexte français. Les principales sources d'hétérogénéité relevées dans cette revue sont : les approches (observationnelle vs. expérimentale), les thématiques de facteurs d'exposition étudiés relevant de disciplines différentes pouvant avoir des conventions différentes, les populations de moules étudiées (gisement vs. élevage sur estran ou en mer vs. éclosion) ayant un impact sur leur accès pour estimer les mortalités ou pour évaluer leur exposition aux facteurs étudiés.

Au final, si cette revue systématique a identifié plusieurs facteurs de risque de mortalité chez les moules exploitées en France, elle n'a pas permis de hiérarchiser ces facteurs de risque, ni leur combinaisons. Par conséquent, ce bilan des connaissances existantes n'a pas permis de répondre à la question des commanditaires relative à l'identification et à la hiérarchisation des facteurs de risque de mortalité des moules exploitées en France. Toutefois, cette synthèse pourra orienter utilement la construction d'éventuelles futures études à mener sur le terrain pour compléter la connaissance des facteurs de risque de mortalité de moules. En particulier, elle a souligné la nécessité de prise en compte et d'exploration de l'action conjointe des nombreux facteurs d'exposition intervenant de manière simultanée dans le milieu naturel.

4.2 Limites de la revue

Une seule personne a lu l'intégralité des études considérées dans cette revue systématique de la littérature. Bien qu'une stratégie de vérification collective de la sélection des références et de l'extraction des caractéristiques clés des études sélectionnées ait été mise en place, il n'est pas exclu qu'un biais de classement de certaines études ait pu survenir. Le premier niveau de vérification collective s'est appuyé sur la relecture des titres et résumés de 30 références par membre du CST, tirées au sort parmi l'ensemble des références analysées par la Coordinatrice scientifique. Ce premier niveau de vérification a été conduit sur 10% (366/3 667) des références identifiées au total, et l'accord entre le CST et la Coordinatrice était fort (coefficient Kappa = 0,66, IC95% [0,58-0,75]). Cette vérification a permis de réduire les erreurs et les biais de subjectivité à l'étape de la sélection des études à la lecture des titres et résumés. Toutefois, le second niveau de vérification collective de l'extraction des caractéristiques clés des études sélectionnées n'a pas été conduit en aveugle, c'est-à-dire que les membres du CST ont directement vérifié les informations extraites par la Coordinatrice. Une extraction indépendante des caractéristiques clés des études par chaque membre du CST, suivie d'une confrontation des informations extraites par le CST et par la Coordinatrice des mêmes références auraient permis de mieux limiter les biais d'évaluation.

Les études publiées dans d'autres langues que la Française ou l'Anglais ont été exclues du corpus bibliographique par manque de ressources pour les traduire. Par conséquent, il est possible que

les recherches conduites sur les facteurs de risque de mortalité des moules dans certaines régions du monde aient été sous-représentées dans cette revue systématique de la littérature.

5 Conclusions et recommandations du CST

5.1 Conclusions

5.1.1 Sur l'identification des facteurs de risque de mortalité de moules

Cette revue systématique a permis de recenser 125 facteurs étudiés pour leur relation avec la mortalité des moules, avec 72 facteurs différents pour *M. galloprovincialis* et 97 facteurs différents pour *M. edulis*. Mais, au regard de la grande hétérogénéité des données, peu de facteurs de risque ont été finalement identifiés.

Chez les deux espèces de moules exploitées en France, une variation géographique du risque de mortalité a été mise en évidence de façon globale, sans que des caractéristiques particulières du site expliquant ces variations aient été identifiées. Seule la présence de prédateurs présente une responsabilité évidente en termes de mortalités mytilicoles. De même, une variation saisonnière du risque de mortalité a été mise en évidence, sans que des conditions climatiques particulières aient été identifiées à l'exception de vagues de chaleur. L'augmentation de la température de l'eau de mer (supérieure à 24°C pour *M. galloprovincialis* et supérieure à 20°C pour *M. edulis*) était le seul facteur d'exposition commun aux deux espèces de moules et identifié de façon consensuelle comme associé à un risque de mortalité des moules accru.

Chez *M. galloprovincialis*, les facteurs d'exposition suivants ont été identifiés de façon consensuelle comme associés à une augmentation du risque de mortalité :

- l'accumulation de sable ou de sédiment sur un gisement ;
- la présence de fer dans l'eau de mer ;
- la présence de plomb dans l'eau de mer ;
- la présence de bactéries du genre *Vibrio*, de l'espèce *aestuarianus* ou du groupe *Splendidus*, associée à une température de l'eau de mer élevée et en conditions d'hypoxie.

Chez *M. edulis*, les moules issues de parents ayant naturellement survécu à un épisode de mortalité, *i.e.* ayant un génotype intraspécifique « sélectionné », présentaient un risque de mortalité diminué. Les facteurs suivants ont été identifiés de façon consensuelle comme associés à une augmentation du risque de mortalité :

- la présence, dans la population, d'une fréquence élevée de moules présentant plus de 10 % d'anomalies cytogénétiques dans leurs cellules hématocytaires (*i.e.* nombre anormal de chromosomes dans les hématocytes) ;
- l'augmentation de la durée d'enfouissement des animaux sur un gisement ;
- une augmentation de particules sédimentaires fines et la présence de vase ;
- la présence d'un agent infectieux transmissible, non identifié.

Ces conclusions relatives à la revue systématique de la littérature ne permettent pas de proposer des mesures opérationnelles qui influenceraient (*i.e.* modifieraient) les facteurs de risque identifiés et limiteraient ainsi le risque de mortalité chez les moules. Le seul facteur ayant un effet sur le risque de mortalité des moules potentiellement manipulable par l'homme semble être la sélection de moules ayant survécu à un épisode de mortalité. Des pratiques de sélection (naturelle ou non) des moules pourraient être envisagées, sans préjuger de leur faisabilité ni de leur acceptabilité par les différents acteurs de la filière conchylicole.

Ce bilan des connaissances existantes sur les facteurs de risque de mortalité des moules a tout de même identifié l'effet consensuel de certains facteurs, à considérer pour bâtir une étude adaptée au contexte français.

5.1.2 Sur la hiérarchisation des facteurs de risque

Les résultats de cette revue étaient très hétérogènes, que ce soit au regard de la méthode de mesure de la mortalité, des thématiques des facteurs d'exposition étudiés, ou de la définition de

ces facteurs. De fait, il n'a pas été possible de comparer les facteurs sur la base de l'importance de leur relation avec le risque de mortalité des moules. Par conséquent, il n'a pas été possible d'aboutir à une hiérarchisation des facteurs de risque de mortalité de moules identifiés.

5.1.3 Sur la compréhension des interactions entre les facteurs

Pour un grand nombre de facteurs, leur seule présence ne saurait souvent expliquer l'augmentation du risque de mortalité. Les mortalités de moules sont probablement la résultante d'un cumul d'expositions à plusieurs facteurs de risque. C'est alors l'association de plusieurs de ces facteurs, en tenant compte de critères quantitatifs (charges bactériennes, concentration d'agents chimiques,...), qui peuvent expliquer ces phénomènes de mortalité observés. Toutefois, seulement un tiers (53/151) des études du corpus bibliographique a étudié l'effet combiné de plusieurs facteurs d'exposition sur le risque de mortalité. Ces études se sont souvent limitées à l'exploration de l'effet conjoint de seulement deux facteurs sur le risque de mortalité des moules, ne permettant pas d'éclairer la complexité du phénomène de mortalité des moules.

5.2 Priorités et recommandations pour les recherches à venir

Les différentes conclusions issues de la revue systématique de la littérature ont conduit le CST à formuler des recommandations et des propositions pour les recherches à venir visant à identifier des facteurs de risque de mortalité de moules (**Tableau 20**).

Au vu de la multiplicité des expositions concomitantes à prendre en compte, le CST souligne la complémentarité entre des observations régulières réalisées par différents acteurs (un réseau de professionnels, les réseaux d'observation ou surveillance déjà existants) et des études scientifiques ponctuelles permettant d'approfondir la connaissance relative à certains facteurs particuliers. De plus, au regard des lacunes dans la connaissance identifiées par la présente revue systématique de la littérature, la mutualisation des moyens scientifiques et techniques semble indispensable à l'échelle nationale. Pour réaliser des économies d'échelle, de ressources humaines et financières, le CST recommande la mise en commun des informations obtenues par les diverses sources et l'utilisation d'outils développés dans le cadre de réseaux existants, pour toutes les thématiques pertinentes (par exemple : détection d'organismes pathogènes, détection de polluants,...).

Tableau 20. Propositions de priorités de recherche à venir

Problème identifié	Orientations de recherche
Hétérogénéité des méthodes d'estimation de la mortalité des moules	<ul style="list-style-type: none"> • Soutien au développement de méthodes et de dispositifs innovants et validés pour mieux estimer les mortalités de moules en conditions d'élevage ; • Harmonisation des protocoles des réseaux d'observation et de surveillance de la mortalité des moules entre tous les acteurs français de la filière conchylicole ;
Faible niveau de pertinence méthodologique pour identifier les facteurs de risque de mortalité	<ul style="list-style-type: none"> • Recourt à des méthodes telles que les études de type cas/témoins, exposés/non exposés... permettant de comparer des profils d'exposition aux facteurs de risque (en diversité et en quantité), entre unités épidémiologiques cas et témoins (ou exposés et non exposés) et dans le temps ; • Prise de contact avec une « Plateforme méthodologique » lors du montage d'études de

	<p>terrain en lien avec la compréhension des mortalités de coquillages, pour consolider la méthodologie tout en permettant une certaine flexibilité méthodologique en fonction des objectifs initiaux de l'étude ;</p> <ul style="list-style-type: none"> • Soutien au développement de dispositifs expérimentaux intermédiaires entre l'observation et l'expérimentation (études de mésocosmes), qui permettent d'examiner le milieu naturel dans des conditions contrôlées ;
Faible prise en compte des interactions de facteurs d'exposition	<ul style="list-style-type: none"> • Mise en place d'études d'épidémiologie observationnelles (éco-épidémiologiques), visant à collecter des données de nature différente de façon concomitante ; • Mise en place d'études de laboratoire visant à préciser les multi-expositions aux substances chimiques, les effets cocktails, les effets chroniques des polluants ; • Mise en place d'un réseau de référents professionnels sur tout le littoral français pour collecter des informations (à définir) en temps réel lors de mortalités de moules, afin d'augmenter le nombre de données disponibles, complémentaires des études d'observation éco-épidémiologiques sur les interactions de facteurs d'exposition ;
Déficit de connaissance sur les facteurs d'exposition appartenant à la thématique des caractéristiques des animaux	<ul style="list-style-type: none"> • Poursuite de la comparaison des phénomènes de mortalité en fonction de l'état physiologique de la moule ; • Développement d'outils pour évaluer et mesurer l'état physiologique des individus préalablement à un épisode de mortalité, par exemple : utilisation concomitante de plusieurs de biomarqueurs validés (expression de gènes, activités mitochondriales, composition des tissus...) en relation avec certains stress en tenant compte des variations spatiotemporelles de ces biomarqueurs, outils visant à mieux caractériser les anomalies cytogénétiques,... ; • Développement d'outils visant à identifier les déterminants génétiques d'une meilleure survie des moules ; • Mise en place d'un réseau de référents professionnels sur tout le littoral français pour collecter régulièrement les informations relatives aux caractéristiques des moules lors de mortalités mais aussi en dehors d'épisodes de mortalité ;
Déficit de connaissance sur les facteurs d'exposition appartenant aux thématiques des caractéristiques du site, des caractéristiques des conditions climatiques, et des caractéristiques de l'eau de mer	<ul style="list-style-type: none"> • Mutualisation au sein d'une « Plateforme » des suivis des sites, des outils de collecte de données (sondes multi-paramètres, études courantologiques...) et d'un appui à l'interprétation de ces données ; • Mutualisation des observations avec les autres réseaux de suivi existants (par exemple : REPHY...) ; • Mise en place d'un réseau de référents professionnels sur tout le littoral français pour collecter des informations ;

<p>Déficit de connaissance sur les facteurs d'exposition appartenant à la thématique des polluants</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Développement d'études sur l'exposition chronique aux polluants ; • Développement d'études expérimentales utilisant des concentrations de polluants environnementalement pertinentes ; • Mutualisation des informations avec les organismes et institutions dédiées (ex : SAGE, Agences de l'eau...) ; • Soutien au développement d'outils de mesure des concentrations des polluants dans l'eau de mer en routine (moins onéreux, par ex : capteurs passifs...) ; • Poursuite d'études visant à appliquer le concept de l'exposome (totalité des expositions reçues par un lot d'animaux au cours de sa vie) avec l'utilisation des technologies « -omics » et les biomarqueurs appropriés (restant à valider) ; • Mise en place d'un réseau de référents professionnels sur tout le littoral français pour collecter des informations ;
<p>Déficit de connaissance sur les facteurs d'exposition appartenant à la thématique des organismes pathogènes/maladies</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Développement d'outils et d'études métagénomiques, sans <i>a priori</i>, visant à identifier la composition d'un microbiome (espèces présentes, abondances et diversités) ; • Sensibilisation des professionnels à l'importance du réseau national de surveillance des pathologies des mollusques (Repamo) ; • Surveillance de la prévalence ou de l'incidence des organismes pathogènes d'intérêt en dehors des épisodes de mortalité de moules ; • Poursuite du développement d'outils visant à étudier de la pathogénicité des souches bactériennes isolées lors de mortalité de moules ; • Approfondissement des connaissances sur la néoplasie ; • S'appuyer sur les outils de détection des organismes pathogènes (dépistage/diagnostic) développés dans le cadre du réseau de laboratoires d'analyses diagnostiques, en lien le LNR ;
<p>Déficit de connaissance sur les facteurs d'exposition appartenant à la thématique des pratiques d'élevage</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Mise en place d'études d'observation appliquées au contexte français selon un suivi longitudinal des populations de moules, permettant d'associer les professionnels à l'étude dans la mesure où ils deviennent parties prenantes du suivi régulier de leurs lots d'animaux ; • Collecte des observations réalisées par les professionnels lors des études d'investigation des cas de mortalité de moules ; • Réalisation d'un inventaire et d'un recensement des

	<p>techniques d'élevage appliquées en fonction des bassins de production ;</p> <ul style="list-style-type: none"> • S'appuyer sur l'harmonisation en cours de structuration entre les Centres techniques régionaux relative à l'étude des stratégies de production conchylicole ; • Prise de contact avec une « Plateforme » lors du montage d'études sur le terrain, pour consolider la méthodologie tout en permettant une certaine flexibilité méthodologique en fonction des objectifs initiaux de l'étude.
--	---

5.3 Perspectives

Cette revue systématique de la littérature a permis la réalisation d'un état des lieux complet sur l'état des recherches relatives aux facteurs de risque de mortalité chez les espèces de moules exploitées en France. Ces travaux ont abouti à une base de données au format d'un fichier tableur, permettant l'utilisation de requêtes pour diverses exploitations. Cette base de données pourrait être le support d'un outil transférable à la filière conchylicole, afin de mettre à disposition cet état des lieux de la connaissance existante sur les facteurs de risque de mortalité des moules, sous la forme du fichier tableur existant mis à disposition sur un/des site(s) internet ou sur un espace RShiny© dédié à développer. Une mise à jour régulière, par exemple annuelle, du paysage des connaissances sur le sujet sera à conduire, notamment pour mieux cibler les futurs efforts de recherche.

Ces travaux du CST ont abouti à la formalisation d'une méthodologie rigoureuse, transparente et reproductible pour la réalisation de revue systématique relative aux facteurs de risque de mortalité chez les coquillages marins. Cette méthodologie s'appuie sur plusieurs outils pour standardiser et fiabiliser cette méthode, présentés dans la section « Matériel et Méthodes » du présent rapport et repris dans l'**Annexe 13**. Elle est transférable vers d'autres acteurs de la filière conchylicole pour conduire le même type de synthèse de la connaissance existante sur les autres espèces de coquillages exploitées en France. Au moment de la parution de ce rapport, les recherches bibliographiques dans les 10 bases de données sélectionnées ont identifié 14 139 références sur la période 2006-2018, pour toutes les espèces de coquillages ciblées par le programme de recherche (huître creuse, huître plate, moule bleue, moule méditerranéenne, palourde, coque et telline).

Devant le constat de l'hétérogénéité des facteurs de risque de mortalité étudiés chez les moules et la multiplicité des approches méthodologiques, le CST recommande la mise en place d'une étude de terrain éco-épidémiologique spécifique et adaptée au contexte français. Ce type d'étude repose sur la notion de suivi longitudinal de groupes d'animaux sur une longue période et sur le recueil systématique et concomitant d'un grand nombre de données relatives à la mortalité des moules et aux multiples facteurs d'exposition d'intérêt. Ce projet envisage une approche populationnelle, multifactorielle (*i.e.* non spécifiquement centrée sur les facteurs infectieux) et interdisciplinaire. Les données recueillies devront être de nature très variées : données climatiques, caractéristiques physico-chimiques et nutritives de l'eau de mer, état physiologique des animaux, analyses diagnostiques de laboratoire, etc. Le CST souligne l'importance d'une réflexion transdisciplinaire approfondie avant la mise en place d'une telle étude, afin de s'assurer de l'adaptation des outils analytiques, de l'échantillonnage, des données recueillies par questionnaire et des traitements statistiques avec les questions posées, sans en oublier la faisabilité qui doit être discutée entre tous les acteurs impliqués dans ce projet ambitieux.

Au regard de la multiplicité des données à recueillir, en nombre important, le CST souligne l'importance d'une implication de tous les acteurs de la santé des coquillages. Une étude éco-

épidémiologique sera ainsi une façon d'associer les professionnels à l'évaluation des risques dans la mesure où ils seraient parties prenantes du suivi longitudinal de leurs lots. Ce type d'approche promeut la co-construction des études par l'ensemble des participants, qu'il s'agisse de la définition des protocoles d'étude, de l'analyse des résultats ou de leur interprétation, tout en garantissant la précision scientifique et la rigueur de la méthode, en associant les différents acteurs de la santé conchylicole. Une telle enquête éco-épidémiologique pourrait concrétiser un espace de circulation des savoirs et des pratiques d'élevage mais aussi d'évaluation des risques. La collecte des données mettrait en scène les mytiliculteurs, qui noteraient les événements survenant dans leurs lots, et les enquêteurs formés et affiliés spécifiquement à l'étude, qui effectueraient des visites régulières pour vérifier et transmettre les informations à un groupe en charge du traitement et de l'interprétation des données. Ce type d'études constitueraient ainsi un dispositif où les savoirs et les pratiques de la santé des moules seraient en définitive partagés entre tous les acteurs gravitant autour de la filière mytilicole.

Toutefois, le manque d'outils disponibles pour détecter les organismes pathogènes ou les polluants en routine, les difficultés d'estimation des mortalités de moules en conditions d'élevage, la grande ampleur nécessaire de l'étude,... sont autant de points qui soulèvent des interrogations de faisabilité d'une telle étude, en termes de ressources humaines et financières.

Par conséquent, le CST suggère la pérennisation d'un groupe de réflexion méthodologique rassemblant l'ensemble des acteurs scientifiques et techniques de la filière conchylicole en proposant la création d'une « Plateforme », adossée à une structure déjà existante (par exemple : la Plateforme nationale de surveillance épidémiologique en santé animale qui associe l'ensemble des acteurs majeurs de la surveillance des maladies chez les autres productions animales, au niveau national). L'objectif d'une telle « Plateforme » serait de développer un référentiel méthodologique (concevoir et échanger des méthodologies) pour une meilleure harmonisation à l'échelle nationale, et d'apporter un appui aux responsables d'études régionales sur la conception des protocoles, à la mise en œuvre, ou à l'interprétation des données. La finalité serait de créer un espace d'échange méthodologique sur les questions de mortalités de coquillages, auquel les différents acteurs de la filière conchylicole pourraient accéder. Le bénéfice de la pérennisation d'un tel espace serait le partage et la diffusion des connaissances, une structuration et une centralisation de l'information.

Cette « Plateforme » pourrait intervenir sur plusieurs domaines d'intérêt. Par exemple, il n'existe pas à l'heure actuelle d'évaluation des méthodes existantes pour estimer une mortalité de moules en conditions d'élevage. Une telle « Plateforme » permettrait de comparer plusieurs méthodes d'estimation des mortalités de moules développées par les différents acteurs et peut-être d'aboutir à des recommandations d'utilisation de ces méthodes en fonction de l'objectif visé par l'étude. De même, l'épidémiosurveillance, à visée descriptive, nécessite une standardisation du recueil des données, indispensable pour permettre l'analyse des données. Cette standardisation implique notamment une coordination centrale assurant le respect des protocoles, la remontée de l'information, le retour d'information, le traitement statistique pertinent, basé sur des effectifs suffisants. Le dispositif d'épidémiosurveillance de la santé des coquillages actuel, le réseau national de surveillance des pathologies des mollusques (Repamo) s'appuie uniquement sur la surveillance des mortalités de coquillages. Une réflexion de la « Plateforme » pourrait contribuer à étoffer le dispositif d'épidémiosurveillance, comme par exemple cibler des organismes pathogènes spécifiques ou mettre en place un réseau de référents professionnels ou de structures professionnelles sur tout le littoral français qui remonteraient des informations régulièrement, pour mieux évaluer la santé des coquillages.

6 Bibliographie

- Buscemi, N., Harding, L., Vandermeer, B., Tjosvold, L., Klassen, T.P., 2006. Single data extraction generated more errors than double data extraction in systematic reviews. *Journal of clinical epidemiology* 59, 697-703.
- Counsell, C., 1997. Formulating questions and locating primary studies for inclusion in systematic reviews. *Annals of internal medicine* 127, 380-387.
- European Food Safety Agency, 2010. Application of systematic review methodology to food and feed safety assessments to support decision making. *EFSA Journal* 8, 1637.
- Landis, J.R., Koch, G.G., 1977. Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics* 33, 159-174.
- Lean, I.J., Rabiee, A.R., Duffield, T.F., Dohoo, I.R., 2009. Invited review: Use of meta-analysis in animal health and reproduction: methods and applications. *Journal of dairy science* 92, 3545-3565.
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D.G., Grp, P., 2009. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. *Bmj-Brit Med J* 339.
- Muséum national d'Histoire naturelle [Ed], 2003-2018. Inventaire National du Patrimoine Naturel.
- R Core Team, 2017. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- REPHY – French Observation and Monitoring program for Phytoplankton and Hydrology in coastal waters, 2017. REPHY dataset - French Observation and Monitoring program for Phytoplankton and Hydrology in coastal waters. 1987-2016 Metropolitan data. SEANOE, <https://doi.org/10.17882/47248>.
- Susser, M., Susser, E., 1996. Choosing a future for epidemiology .2. From black box to Chinese boxes and eco-epidemiology (vol 86, pg 674, 1996). *Am J Public Health* 86, 1093-1093.
- Toma, B., Benet, J.-J., Dufour, B., Eloit, M., Moutou, F., Sanaa, M., 1991. Glossaire d'épidémiologie animale. Editions du Point Vétérinaire.
- Toma, B., Dufour, B., Sanaa, M., Bénét, J.J., Shaw, A., Moutou, F., Louza, A., 2001. Epidémiologie appliquée à la lutte collective contre les maladies animales transmissibles majeures.

Références incluses dans la revue systématique de la littérature :

177. Dionne, M., Lauzon-Guay, J. S., *et al.* (2006). Protective socking material for cultivated mussels: a potential non-disruptive deterrent to reduce losses to diving ducks. *Aquaculture International* 14(6): 595-613.
323. Penney, R. W., Hart, M. J., *et al.* (2006). Genotype-dependent survival, growth, and production in cultured blue mussels, *Mytilus* spp.: Results of a reciprocal seed transfer experiment. *Journal of Shellfish Research* 25(2): 515-525.
365. Altieri, A. H. and Witman, J. D. (2006). Local extinction of a foundation species in a hypoxic estuary: integrating individuals to ecosystem. *Ecology* 87(3): 717-730.
996. Zardi, G. I., Nicastro, K. R., *et al.* (2006). Sand stress as a non-determinant of habitat segregation of indigenous (*Perna perna*) and invasive (*Mytilus galloprovincialis*) mussels in South Africa. *Marine Biology* 148(5): 1031-1038.
1098. Lok, A., Acarli, S., *et al.* (2007). Growth and mortality of Mediterranean mussel *Mytilus galloprovincialis* Lam., 1819, in relation to size on longline in Mersin Bay, Izmir (Turkey-Aegean Sea) (vol 38, pg 819, 2007). *Aquaculture Research* 38(11): 1228-1228.
1118. Suni, S., Koskinen, K., *et al.* (2007). Removal by sorption and in situ biodegradation of oil spills limits damage to marine biota: A laboratory simulation. *Ambio* 36(2-3): 173-179.

1154. Bihari, N., Fafandel, M., *et al.* (2007). Polycyclic aromatic hydrocarbons and ecotoxicological characterization of seawater, sediment, and mussel *Mytilus galloprovincialis* from the Gulf of Rijeka, the Adriatic Sea, Croatia. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* **52**(3): 379-387.
1159. Ramon, M., Fernandez, M., *et al.* (2007). Development of mussel (*Mytilus galloprovincialis*) seed from two different origins in a semi-enclosed Mediterranean Bay (NE Spain). *Aquaculture* **264**(1-4): 148-159.
1204. Anestis, A., Lazou, A., *et al.* (2007). Behavioral, metabolic, and molecular stress responses of marine bivalve *Mytilus galloprovincialis* during long-term acclimation at increasing ambient temperature. *American Journal of Physiology-Regulatory Integrative and Comparative Physiology* **293**(2): R911-R921.
1228. Akaishi, F. M., St-Jean, S. D., *et al.* (2007). Immunological responses, histopathological finding and disease resistance of blue mussel (*Mytilus edulis*) exposed to treated and untreated municipal wastewater. *Aquatic Toxicology* **82**(1): 1-14.
1406. Vlahogianni, T. H. and Valavanidis, A. (2007). Heavy-metal effects on lipid peroxidation and antioxidant defence enzymes in mussels *Mytilus galloprovincialis*. *Chemistry and Ecology* **23**(5): 361-371.
1717. Rosen, G. and Lotufo, G. R. (2007). Toxicity of explosive compounds to the marine mussel, *Mytilus galloprovincialis*, in aqueous exposures. *Ecotoxicology and Environmental Safety* **68**(2): 228-236.
2012. Hamer, B., Jaksic, Z., *et al.* (2008). Effect of hypoosmotic stress by low salinity acclimation of Mediterranean mussels *Mytilus galloprovincialis* on biological parameters used for pollution assessment. *Aquatic Toxicology* **89**(3): 137-151.
2303. Shields, J. L., Barnes, P., *et al.* (2008). Growth and survival differences among native, introduced and hybrid blue mussels (*Mytilus* spp.): genotype, environment and interaction effects. *Marine Biology* **154**(5): 919-928.
2493. LeBlanc, N., Tremblay, R., *et al.* (2008). The effect of selection treatments on *Mytilus edulis*, modifications of genetic and physiological characteristics. *Marine Biology* **153**(6): 1141-1152.
2587. Lowen, J. B. (2008). To grow and survive or reproduce and die? Life-history strategies and ecological interactions between the mussels *Mytilus edulis* (Linnaeus, 1758) and *Mytilus trossulus* (Gould, 1850) in the northwest Atlantic. *Dissertation Abstracts International* **71**(no. 01, suppl. B): 152.
2684. Nicastro, K. R., Zardi, G. I., *et al.* (2008). Movement behaviour and mortality in invasive and indigenous mussels: resilience and resistance strategies at different spatial scales. *Marine Ecology Progress Series* **372**: 119-126.
2698. Zardi, G. I., Nicastro, K. R., *et al.* (2008). Sand and wave induced mortality in invasive (*Mytilus galloprovincialis*) and indigenous (*Perna perna*) mussels. *Marine Biology* **153**(5): 853-858.
2800. Babarro, J. M. F. and De Zwaan, A. (2008). Anaerobic survival potential of four bivalves from different habitats. A comparative survey. *Comparative Biochemistry and Physiology a-Molecular & Integrative Physiology* **151**(1): 108-113.
2886. Schneider, K. R. (2008). Heat Stress in the Intertidal: Comparing Survival and Growth of an Invasive and Native Mussel Under a Variety of Thermal Conditions. *Biological Bulletin* **215**(3): 253-264.
3024. Jones, S. J., Mieszkowska, N., *et al.* (2009). Linking Thermal Tolerances and Biogeography: *Mytilus edulis* (L.) at its Southern Limit on the East Coast of the United States. *Biological Bulletin* **217**(1): 73-85.
3267. Vickerson, A. (2009). Managing the health of mussel (*Mytilus* spp.) seed from Newfoundland: The effects of thermal stressors, transport times, storage conditions and

- anti-biofouling treatments on the short-term and long-term performance of mussel seed. *Masters Abstracts International* **48**(03): 114.
3834. O'Connor, N. E. (2010). Shore exposure affects mussel population structure and mediates the effect of epibiotic algae on mussel survival in SW Ireland. *Estuarine Coastal and Shelf Science* **87**(1): 83-91.
3874. Anestis, A., Portner, H. O., et al. (2010). Anaerobic metabolic patterns related to stress responses in hypoxia exposed mussels *Mytilus galloprovincialis*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* **394**(1-2): 123-133.
3960. Ali, M. and Taylor, A. (2010). The effect of salinity and temperature on the uptake of cadmium and zinc by the common blue mussel, *Mytilus edulis* with some notes on their survival. *Mesopotamian Journal of Marine Science* **25**(1): 11-30.
4091. LeBlanc, N., Landry, T., et al. (2010). The effect of elevated water temperature stress on the mussel *Mytilus edulis* (L.), survival and genetic characteristics. *Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences* 2900: 19.
4172. Bownes, S. J. and McQuaid, C. D. (2010). Mechanisms of habitat segregation between an invasive (*Mytilus galloprovincialis*) and an indigenous (*Perna perna*) mussel: adult growth and mortality. *Marine Biology* **157**(8): 1799-1810.
4294. Schneider, K. R., Van Thiel, L. E., et al. (2010). Interactive effects of food availability and aerial body temperature on the survival of two intertidal *Mytilus* species. *Journal of Thermal Biology* **35**(4): 161-166.
4367. Nicasro, K. R., Zardi, G. I., et al. (2010). Differential reproductive investment, attachment strength and mortality of invasive and indigenous mussels across heterogeneous environments. *Biological Invasions* **12**(7): 2165-2177.
4409. Plass-Johnson, J. G., McQuaid, C. D., et al. (2010). Top-down effects on intertidal mussel populations: assessing two predator guilds in a South African marine protected area. *Marine Ecology Progress Series* **411**: 149-159.
4490. Marcheselli, M., Rustichelli, C., et al. (2010). Novel Antifouling Agent Zinc Pyrithione: Determination, Acute Toxicity, and Bioaccumulation in Marine Mussels (*Mytilus Galloprovincialis*). *Environmental Toxicology and Chemistry* **29**(11): 2583-2592.
4680. Jones, S. J., Lima, F. P., et al. (2010). Rising environmental temperatures and biogeography: poleward range contraction of the blue mussel, *Mytilus edulis* L., in the western Atlantic. *Journal of Biogeography* **37**(12): 2243-2259.
4768. Karagiannis, D., Vatsos, I. N., et al. (2011). Effects of atrazine on the viability and the formation of byssus of the mussel *Mytilus galloprovincialis*. *Aquaculture International* **19**(1): 103-110.
5028. Moschino, V., Delaney, E., et al. (2011). Biomonitoring approach with mussel *Mytilus galloprovincialis* (Lmk) and clam *Ruditapes philippinarum* (Adams and Reeve, 1850) in the Lagoon of Venice. *Environmental Monitoring and Assessment* **177**(1-4): 649-663.
5066. Paetzold, S. C. and Davidson, J. (2011). Aquaculture fouling: Efficacy of potassium monopersulphonate triple salt based disinfectant (Virkon® Aquatic) against *Ciona intestinalis*. *Biofouling* **27**(6): 655-665.
5222. Ayad, M. A., Fdil, M. A., et al. (2011). Effects of Cypermethrin (Pyrethroid Insecticide) on the Valve Activity Behavior, Byssal Thread Formation, and Survival in Air of the Marine Mussel *Mytilus galloprovincialis*. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* **60**(3): 462-470.
5373. Danellakis, D., Ntaikou, I., et al. (2011). Olive oil mill wastewater toxicity in the marine environment: Alterations of stress indices in tissues of mussel *Mytilus galloprovincialis*. *Aquatic Toxicology* **101**(2): 358-366.
5932. Brenner, M., Broeg, K., et al. (2012). Effect of air exposure on lysosomal tissues of *Mytilus edulis* L. from natural intertidal wild beds and submerged culture ropes. *Comparative Biochemistry and Physiology a-Molecular & Integrative Physiology* **161**(3): 327-336.

6023. Christensen, H. T., Dolmer, P., *et al.* (2012). Comparative study of predatory responses in blue mussels (*Mytilus edulis* L.) produced in suspended long line cultures or collected from natural bottom mussel beds. *Helgoland Marine Research* **66**(1): 1-9.
6141. Tsarpali, V. and Dailianis, S. (2012). Investigation of landfill leachate toxic potency: An integrated approach with the use of stress indices in tissues of mussels. *Aquatic Toxicology* **124**: 58-65.
6756. Gardner, J. P. A. (2013). Bottom-up control of temperate rocky intertidal community structure: evidence from a transplant experiment. *Marine Ecology Progress Series* **491**: 137-151.
7013. Bat, L., Uestuen, F., *et al.* (2013). Effects of some heavy metals on the sizes of the mediterranean mussel *Mytilus galloprovincialis* Lamarck, 1819. *Fresenius Environmental Bulletin* **22**(7): 1933- 1938.
7240. Dowd, W. W. and Somero, G. N. (2013). Behavior and survival of *Mytilus* congeners following episodes of elevated body temperature in air and seawater. *Journal of Experimental Biology* **216**(3): 502-514.
7289. Hanna, S. K., Miller, R. J., *et al.* (2013). Impact of Engineered Zinc Oxide Nanoparticles on the Individual Performance of *Mytilus galloprovincialis*. *Plos One* **8**(4).
7454. Marquet, N., Nicastro, K. R., *et al.* (2013). Comparison of phototrophic shell-degrading endoliths in invasive and native populations of the intertidal mussel *Mytilus galloprovincialis*. *Biological Invasions* **15**(6): 1253-1272.
7718. Hiebenthal, C., Philipp, E. E. R., *et al.* (2013). Effects of seawater pCO₂ and temperature on shell growth, shell stability, condition and cellular stress of Western Baltic Sea *Mytilus edulis* (L.) and *Arctica islandica* (L.). *Marine Biology* **160**(8): 2073-2087.
7791. Gazeau, F., Alliouane, S., *et al.* (2018). Impact of ocean acidification and warming on the Mediterranean mussel (*Mytilus galloprovincialis*). *Frontiers in Marine Science* **1**(62).
7869. Romero, A., Costa, M. D., *et al.* (2014). Occurrence, seasonality and infectivity of *Vibrio* strains in natural populations of mussels *Mytilus galloprovincialis*. *Diseases of Aquatic Organisms* **108**(2): 149-163.
8146. Bressan, M., Chinellato, A., *et al.* (2014). Does seawater acidification affect survival, growth and shell integrity in bivalve juveniles? *Marine Environmental Research* **99**: 136-148.
8239. Rosioru, D. M. (2014). Ecological resilience of *Mytilus galloprovincialis* from the Romanian Black Sea coast at environmental variations. *Journal of Environmental Protection and Ecology* **15**(3): 924-932.
8621. Renault, T. (2014). BIVALIFE - Controlling infectious diseases in oysters and mussels in Europe - Periodic Report. 266157_BIVALIFE_Periodic_Report-12_20140428_192012_CET.
8841. Brousscau, D. J., Goldberg, R., *et al.* (2014). Impact of Predation by the Invasive Crab *Hemigrapsus sanguineus* on Survival of Juvenile Blue Mussels in Western Long Island Sound. *Northeastern Naturalist* **21**(1): 119-133.
9018. Tsarpali, V., Belavgeni, A., *et al.* (2015). Investigation of toxic effects of imidazolium ionic liquids, [bmim][BF₄] and [omim][BF₄], on marine mussel *Mytilus galloprovincialis* with or without the presence of conventional solvents, such as acetone. *Aquatic Toxicology* **164**: 72-80.
9276. Travers, M.-A., Morga, B., *et al.* (2015). Pathogens detected during mortality events of mussels in France in 2014. *Annual meeting of NRLs for Mollusc diseases and the technical workshop*, Saintes, France.
9283. Carella, F., Sardo, A., *et al.* (2015). Quantitative histopathology of the Mediterranean mussel (*Mytilus galloprovincialis* L.) exposed to the harmful dinoflagellate *Ostreopsis cf. ovata*. *Journal of Invertebrate Pathology* **127**: 130-140.
9560. Waser, A. M., Splinter, W., *et al.* (2015). Indirect effects of invasive species affecting the population structure of an ecosystem engineer. *Ecosphere* **6**(7).

10038. Hopkins, G. A., Prince, M., *et al.* (2016). Desiccation as a mitigation tool to manage biofouling risks: trials on temperate taxa to elucidate factors influencing mortality rates. *Biofouling* **32**(1): 1-11.
10039. Gestoso, I., Arenas, F., *et al.* (2016). Ecological interactions modulate responses of two intertidal mussel species to changes in temperature and pH. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* **474**: 116-125.
10057. Hutchison, Z. L., Hendrick, V. J., *et al.* (2016). Buried Alive: The Behavioural Response of the Mussels, *Modiolus modiolus* and *Mytilus edulis* to Sudden Burial by Sediment. *Plos One* **11**(3).
10084. Barrento, S. and Powell, A. (2016). The effect of transportation and re-watering strategies on the survival, physiology and batch weight of the blue mussel, *Mytilus edulis*. *Aquaculture* **450**: 194-198.
10112. Benabdelmouna, A. and Ledu, C. (2016). The mass mortality of blue mussels (*Mytilus* spp.) from the Atlantic coast of France is associated with heavy genomic abnormalities as evidenced by flow cytometry. *Journal of Invertebrate Pathology* **138**: 30-38.
10215. Olabarriall, C., Gestoso, I., *et al.* (2016). Response of Two Mytilids to a Heatwave: The Complex Interplay of Physiology, Behaviour and Ecological Interactions. *Plos One* **11**(10).
10226. Gammoudi, M., Ben Ahmed, R., *et al.* (2017). Predation by the polyclad flatworm *Imogine mediterranea* on the cultivated mussel *Mytilus galloprovincialis* in Bizerta Lagoon (northern Tunisia). *Aquaculture Research* **48**(4): 1608-1617.
10292. Travers, M. A., Pépin, J.-F., *et al.* (2016). Mortalités de moules bleues dans les Pertuis Charentais: description et facteurs liés – MORBLEU, R.INT.RBE/SG2M-LGPMM. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00324/43539/>.
- Pépin, J. F., Benabdelmouna, A., *et al.* (2017). Mortalités de moules bleues dans les secteurs mytilicoles charentais et vendéens : description et facteurs liés – MORBLEU. R.INT.RBE/SG2M-LGPMM. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00391/50288/>.
- Pépin, J. F., Benabdelmouna, A., *et al.* (2018). Mortalités de moules bleues dans les secteurs mytilicoles : description et facteurs liés -MORBLEU-. R.INT.RBE/SG2M-LGPMM
10565. Moschino, V., Del Negro, P., *et al.* (2016). Biomonitoring of a polluted coastal area (Bay of Muggia, Northern Adriatic Sea): A five-year study using transplanted mussels. *Ecotoxicology and Environmental Safety* **128**: 1-10.
10632. Zardi, G. I., Nicastro, K. R., *et al.* (2016). Enemies with benefits: parasitic endoliths protect mussels against heat stress. *Scientific Reports* **6**.
10713. Ben Cheikh, Y., Travers, M. A., *et al.* (2016). First evidence for a *Vibrio* strain pathogenic to *Mytilus edulis* altering hemocyte immune capacities. *Fish & Shellfish Immunology* **53**: 91-91.
10727. Cottrell, R. S., Black, K. D., *et al.* (2016). The Influence of Organic Material and Temperature on the Burial Tolerance of the Blue Mussel, *Mytilus edulis*: Considerations for the Management of Marine Aggregate Dredging. *Plos One* **11**(1).
10825. Sun, T. L., Tang, X. X., *et al.* (2016). Comparative studies on the effects of seawater acidification caused by CO₂ and HCl enrichment on physiological changes in *Mytilus edulis*. *Chemosphere* **144**: 2368-2376.
- maj63. Avelelas, F., Martins, R., *et al.* (2017). Efficacy and Ecotoxicity of Novel Anti-Fouling Nanomaterials in Target and Non-Target Marine Species. *Marine Biotechnology* **19**(2): 164-174.
- maj942. Passarelli, M. C., Riba, I., *et al.* (2018). What is the best endpoint for assessing environmental risk associated with acidification caused by CO₂ enrichment using mussels? *Marine Pollution Bulletin* **128**: 379-389.
- maj989. Li, J. J., Schiavo, S., *et al.* (2018). Early ecotoxic effects of ZnO nanoparticle chronic exposure in *Mytilus galloprovincialis* revealed by transcription of apoptosis and antioxidant-related genes. *Ecotoxicology* **27**(3): 369-384.

- maj1003. Clements, J. C., Hicks, C., *et al.* (2018). Elevated seawater temperature, not pCO₂, negatively affects post-spawning adult mussels (*Mytilus edulis*) under food limitation. *Conservation Physiology* **6**.
- maj1185. Coppola, F., Almeida, A., *et al.* (2017). Biochemical impacts of Hg in *Mytilus galloprovincialis* under present and predicted warming scenarios. *Science of the Total Environment* **601**: 1129-1138.
- maj1351. Ajjabi, L. C., Abaab, M., *et al.* (2018). The red macroalga *Gracilaria verrucosa* in co-culture with the Mediterranean mussels *Mytilus galloprovincialis*: productivity and nutrient removal performance. *Aquaculture International* **26**(1): 253-266.
- maj1428. Gvozdenovic, S., Mandic, M., *et al.* (2017). Comparison between IMTA and monoculture farming of mussels (*Mytilus galloprovincialis* L.) in the Boka Kotorska Bay. *Acta Adriatica* **58**(2): 271-284.
- maj1757. Oliveira, P., Almeida, A., *et al.* (2017). Physiological and biochemical alterations induced in the mussel *Mytilus galloprovincialis* after short and long-term exposure to carbamazepine. *Water Research* **117**: 102-114.
- maj1890. Eggermont, M., Bossier, P., *et al.* (2017). Isolation of Vibrionaceae from wild blue mussel (*Mytilus edulis*) adults and their impact on blue mussel larviculture. *Fems Microbiology Ecology* **93**(4).
- maj2462. Kovacic, I., Pavicic-Hamer, D., *et al.* (2017). Adaptation of cultured mussel *Mytilus galloprovincialis* Lamarck, 1819 from the northern Adriatic Sea to nearby aquaculture sites and translocation. *Acta Adriatica* **58**(2): 285-296.
- maj2916. Theodorou, J. A., Leech, B. S., *et al.* (2017). Summer Re-immersion handling of the mediterranean mussels. *Proceedings of the Thirteenth International MEDCOAST Congress on Coastal and MARine Sciences, Engineering, Management and Conservation - MEDCOAST 2017*, Mellieha, Malta.
- maj2926. Moschino, V., Schintu, M., *et al.* (2017). An ecotoxicological approach to evaluate the effects of tourism impacts in the Marine Protected Area of La Maddalena (Sardinia, Italy). *Marine Pollution Bulletin* **122**(1-2): 306-315.
- maj2_129. Lenz, M., Ahmed, Y., *et al.* (2018). Heat challenges can enhance population tolerance to thermal stress in mussels: a potential mechanism by which ship transport can increase species invasiveness. *Biological Invasions* **20**(11): 3107-3122.
- maj2_147. Stevens, A. M. and Gobler, C. J. (2018). Interactive effects of acidification, hypoxia, and thermal stress on growth, respiration, and survival of four North Atlantic bivalves. *Marine Ecology Progress Series* **604**: 143-161.
- maj2_152. Bertolini, C., Montgomery, W. I., *et al.* (2018). Habitat with small inter-structural spaces promotes mussel survival and reef generation. *Marine Biology* **165**(10).
- maj2_153. Peden, R., Rocher, B., *et al.* (2018). Highly polluted life history and acute heat stress, a hazardous mix for blue mussels. *Marine Pollution Bulletin* **135**: 594-606.
- maj2_155. Benabdelmouna, A., Garcia, C., *et al.* (2018). Mortality investigation of *Mytilus edulis* and *Mytilus galloprovincialis* in France: An experimental survey under laboratory conditions. *Aquaculture* **495**: 831-841.
- maj2_235. Wang, J., Ren, R. M., *et al.* (2018). Oxidative stress responses of *Mytilus galloprovincialis* to acute cold and heat during air exposure. *Journal of Molluscan Studies* **84**: 285-292.
- maj2_486. Nicastro, K. H., McQuaid, C. D., *et al.* (2018). Between a rock and a hard place: combined effect of trampling and phototrophic shell-degrading endoliths in marine intertidal mussels. *Marine Biodiversity*.

Rapports non publiés (littérature grise) inclus dans la revue systématique de la littérature :

- LG57. Glize, P., Brouard, L., *et al.* (2017). Suivi de la mortalité de populations de moules en Pays de Loire : Programme TESCOR. SMIDAP & CRC Pays de la Loire. 25 pp.
- LG59 et LG 60. Lebourg, A., Morin, N., Glize, P. (2018). Caractérisation des performances des élevages de moules et évaluation de la qualité du milieu en Pays de la Loire, Rapport technique CAPEMOULES (2015-2017), CRC Pays de la Loire, LEAV & SMIDAP. 48pp
- LG77. CREOCEAN (2014). Etude sur l'origine des mortalités de moules sur le secteur d'élevage de Oye-Plage et Marck. Rapport technique CRC Normandie-Mer du Nord. 125 pp.
- LG79. Ruellet, T. and Meirland, A. (2010). Evaluation des pertes mytilicoles du secteur de Quend-Plage les Pins et de Saint-Quentin-en-Tourmont au cours du mois de mai 2010. Saint Valery sur Somme, GEMEL. 8 pp.
- LG81. Bernard, I. and Allain, G. (2016). Les mortalités de moules en 2014 et 2015 vues par les professionnels - Compte-rendu de la phase 1 : synthèse sur l'émergence, la propagation et l'installation des mortalités. Rapport technique CRC Bretagne Nord. 28 pp.
- LG82. Bernard, I., Charles, M., *et al.* (2018). Bilan de l'observatoire des mortalités de moules en Bretagne Nord pour la saison 2016-2017 et premiers éléments sur les organismes pathogènes présents. Rapport technique CRC Bretagne Nord. 26 pp.
- LG82. Bernard, I., Charles, M., *et al.* (2018). Recherche de pathogènes en lien avec les mortalités de moules en Bretagne Nord en 2017 et 2018 - rapport final. Rapport technique CRC Bretagne Nord. 26 pp.
- LG83. Glize, P. and Gourmelen, G. (2018). Suivi de la mortalité de populations de moules en Pays de Loire : Programme TESCOR 2. SMIDAP & CRC Pays de la Loire. 33 pp.

Références identifiées dans la bibliographie des documents inclus à la lecture du texte intégral :

- bi2. Eggermont, M., Tamanji, A., *et al.* (2014). Stimulation of heterotrophic bacteria associated with wild-caught blue mussel (*Mytilus edulis*) adults results in mass mortality. *Aquaculture* **431**: 136-138.
- bi4. Yanick, J. F., Heath, J. W., *et al.* (2003). Survival and growth of local and transplanted blue mussels (*Mytilus trossulus*, Lamark). *Aquaculture Research* **34**(10): 869-875.
- bi5. Myrand, B. and Gaudreault, J. (1995). Summer mortality of blue mussels (*Mytilus edulis* Linneaus, 1758) in the Magdalen Islands (southern Gulf of St Lawrence, Canada). *Journal of Shellfish Research* **14**(2): 395-404.
- bi6. Karayucel, S. and Karayucel, I. (2000). The effect of environmental factors, depth and position on the growth and mortality of raft-cultured blue mussels (*Mytilus edulis* L.). *Aquaculture Research* **31**(12): 893-899.
- bi7. Tsuchiya, M. (1983). Mass Mortality in a Population of the Mussel *Mytilus edulis*-L Caused by High-Temperature on Rocky Shores. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* **66**(2): 101-111.
- bi8. Stirling, H. P. and Okumus, I. (1994). Growth, Mortality and Shell Morphology of Cultivated Mussel (*Mytilus-Edulis*) Stocks Cross Planted between 2 Scottish Sea Lochs. *Marine Biology* **119**(1): 115-123.
- bi10. Petraitis, P. S. (1998). Timing of mussel mortality and predator activity in sheltered bays of the Gulf of Maine, USA. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* **231**(1): 47-62.

- bi11. Myrand, B., Guderley, H., *et al.* (2000). Reproduction and summer mortality of blue mussels *Mytilus edulis* in the Magdalen Islands, southern Gulf of St. Lawrence. *Marine Ecology Progress Series* **197**: 193-207.
- bi12. Lauzon-Guay, J. S., Dionne, M., *et al.* (2005). Effects of seed size and density on growth, tissue-to-shell ratio and survival of cultivated mussels (*Mytilus edulis*) in Prince Edward Island, Canada. *Aquaculture* **250**(3-4): 652-665.
- bi15. Mallet, A. L., Carver, C. E. A., *et al.* (1987). Mortality Variations in Natural-Populations of the Blue Mussel, *Mytilus edulis*. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **44**(9): 1589-1594.
- bi16. Incze, L. S., Lutz, R. A., *et al.* (1980). Relationships between Effects of Environmental-Temperature and Seston on Growth and Mortality of *Mytilus edulis* in a Temperate Northern Estuary. *Marine Biology* **57**(3): 147-156.
- bi18. Fuentes, J., Lopez, J. L., *et al.* (2002). Growth, mortality, pathological conditions and protein expression of *Mytilus edulis* and *M. galloprovincialis* crosses cultured in the Ria de Arousa (NW of Spain). *Aquaculture* **213**(1-4): 233-251.
- bi19. Gardner, J. P. A. and Thompson, R. J. (2001). The effects of coastal and estuarine conditions on the physiology and survivorship of the mussels *Mytilus edulis*, *M. trossulus* and their hybrids. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* **265**(2): 119-140.
- bi21. Mallet, A. L., Carver, C. E. A., *et al.* (1990). Summer Mortality of the Blue Mussel in Eastern Canada - Spatial, Temporal, Stock and Age Variation. *Marine Ecology Progress Series* **67**(1): 35-41.
- bi22. Fuentes, J., Reyero, I., *et al.* (1992). Influence of Stock and Culture Site on Growth-Rate and Mortality of Mussels (*Mytilus galloprovincialis* Lmk) in Galicia, Spain. *Aquaculture* **105**(2): 131-142.
- bi23. Kristensen, P. S. and Lassen, H. (1997). The production of relaid blue mussels (*Mytilus edulis* L.) in a Danish fjord. *Ices Journal of Marine Science* **54**(5): 854-865.
- bi24. Tremblay, R., Myrand, B., *et al.* (1998). Bioenergetic and genetic parameters in relation to susceptibility of blue mussels, *Mytilus edulis* (L.) to summer mortality. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* **221**(1): 27-58.
- bi25. Fuentes, J., Reyero, I., *et al.* (1994). Production Traits of the Mussel *Mytilus galloprovincialis* Cultured in Galicia (Nw of Spain) - Relative Effects of Source of Seed and Growing Environment. *Aquaculture* **122**(1): 19-31.
- bi26. Oden, E., Burioli, E. A. V., *et al.* (2016). Multilocus sequence analysis of *Vibrio splendidus* related-strains isolated from blue mussel *Mytilus* sp during mortality events. *Aquaculture* **464**: 420-427.

ANNEXES



Annexe 1 : Lettre de mission du Coordinateur national



MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, DE L'AGROALIMENTAIRE ET LA FORÊT



LE MINISTRE,
PORTE-PAROLE DU GOUVERNEMENT

Nos réf : TR505295

Paris, le 20 JAN. 2016

Monsieur le Vice-Président
du Conseil Général de l'Alimentation,
de l'Agriculture et des Espaces Ruraux
251, rue de Vaugirard
75732 PARIS CEDEX 15

Objet : nomination d'un coordinateur national de la stratégie sanitaire et zoonositaire en conchyliculture

En septembre 2015, Monsieur Philippe VANNIER, ancien Directeur de la Santé Animale de l'Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'Alimentation, de l'Environnement et du Travail (ANSES), a présenté un rapport portant sur l'amélioration de la situation zoonositaire en conchyliculture, dont l'objectif était d'identifier les difficultés à faire progresser la connaissance relative aux différents épisodes de mortalités massives conchylocoles (huîtres, moules...) et de retranscrire les attentes de la profession vis-à-vis des instances de recherche et de surveillance ainsi que des services de l'Etat.

Une des recommandations du rapport est la nomination d'un coordinateur national pour les questions sanitaires et zoonositaires en filière conchylocole, pour une période de 5 ans. Cette recommandation s'inspire de ce qui a été fait en apiculture et est pertinente afin d'appréhender les surmortalités des coquillages, ainsi que la sécurité sanitaire des produits de la conchyliculture, dans leur globalité.

Le Comité National de la Conchyliculture (CNC) s'est également déclaré favorable au principe de la nomination d'un coordinateur national chargé d'élaborer un plan d'actions opérationnelles, en association avec un référent technique national nommé par le CNC.

Les représentants professionnels nationaux et régionaux, Ifremer, et l'Administration (Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt et Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie) se sont accordés sur les termes de référence du coordinateur national. Le document issu de ces concertations est joint à ce courrier.

.../...

78 rue de Varenne – 75 349 PARIS 07 SP – Tél. : 01 49 55 49 55

Il est attendu du coordinateur national qu'il élabore, dans un premier temps, un plan stratégique ambitieux qui réponde aux attentes de la profession et de l'Etat, en matière sanitaire et zoosanitaire.

De premiers axes ont été identifiés en concertation avec la profession pour l'élaboration de ce plan stratégique :

- un programme de recherche, élaboré en concertation, sur la compréhension des phénomènes de mortalités des coquillages, complexes et multifactoriels, combinant à la fois agents pathogènes, facteurs environnementaux et événements climatiques ;
- une réflexion sur l'évolution de la surveillance dans le contexte actuel ;
- un appui sur la mise en œuvre des agréments zoosanitaires ;
- une réflexion autour d'un centre technique national ;
- un volet sur la gouvernance sanitaire.

L'élaboration du plan se fera dans la plus grande concertation avec les différentes branches professionnelles et leurs instances représentatives, les représentants de centres techniques conchylicoles, la communauté scientifique, et naturellement, les services de l'Etat, d'administration centrale et déconcentrés.

Le coordinateur contribuera aux réflexions sur l'évolution de l'organisation et des modalités de surveillance sanitaire des zones de production des coquillages.

Les volets sanitaire et zoosanitaire ne pouvant être appréhendés sans que l'on ne s'intéresse aux questions de structuration de filière, de qualité des eaux, ou encore de phénomènes climatiques, le coordinateur se devra de prendre l'attache des Ministères compétents dans ces domaines pour mener à bien son projet. Les ressources humaines et financières nécessaires pour la mise en œuvre des différentes actions au niveau de chacune des parties prenantes doivent également être étudiées.

Dans ce contexte, il serait opportun que le Conseil Général de l'Alimentation, de l'Agriculture et des Espaces Ruraux désigne un coordinateur national chargé de l'élaboration du plan stratégique sanitaire et zoosanitaire en conchyliculture, ainsi que de son pilotage.

Je souhaite donc que vous puissiez me faire part rapidement du nom de la personne que vous aurez désignée et que le plan puisse être élaboré en concertation avec les différents acteurs au cours du 1^{er} semestre 2016.



Stéphane LE FOLL

Annexe 2 : Aspects pratiques

Durée et déroulement du projet

Cette première étape du programme de recherche en santé des coquillages EEC s'est étendue sur environ 2 ans, de novembre 2016 à décembre 2018.

Le CST s'est réuni à six reprises pendant cette période pour faire un point sur les avancées et prendre des décisions collectives, ce qui correspond à 71 personnes-jours.

Les membres du CST ont contribué à l'inventaire des études préexistantes non publiées et renseigné la grille d'inventaire.

Chaque membre a reçu 47 emails à traiter durant cette période pour des relectures de compte-rendu de réunion, points de discussion ponctuels,

Le CST a consacré 37 heures à la tâche de vérification de la sélection des études, réalisée en première intention par la Coordinatrice. La première étape d'examen des titres et résumés des documents a comptabilisé au total 14h45, soit en moyenne 1h13 par personne, avec un minimum de 30 minutes et un maximum de 3h30 (N=13). La seconde étape de lecture du texte intégral et de vérification des caractéristiques clés extraites des documents a pris environ 20h20.

Plusieurs échanges ont eu lieu avec les commanditaires. La DGAL et l'équipe de coordination nationale (Coordinateur national et représentants du CNC et du CNPMM) ont participé à toutes les réunions du CST (N=5). Le CST a présenté ses travaux à quatre reprises devant le COPEEC. Cela a permis de réorienter régulièrement le projet en fonction des attentes prioritaires (ex : ciblage sur les moules).

Retour d'expérience et enseignements pour d'éventuelles autres revues systématiques

Le CST a réalisé un retour sur cette expérience en identifiant les points positifs et les moins positifs et ainsi en tirer des enseignements pour d'éventuelles autres revues systématiques.

Lors de la seconde étape de vérification de la sélection des études, l'extraction des caractéristiques clés des études a été vérifiée par le CST. Chaque membre a étudié deux documents complets, choisis en fonction de ses compétences, pour vérifier les informations extraites du texte intégral et reportées dans la grille d'extraction des caractéristiques clés des études par la Coordinatrice scientifique. Cette vérification n'a pas été réalisée en double aveugle afin d'optimiser le temps nécessaire, *i.e.* les membres du CST n'ont pas extrait les informations dans la grille mais vérifié les informations déjà extraites. La complexité de la grille d'extraction des caractéristiques clés des études, déclinée en une version pour les études d'observation et une autre version pour les études expérimentales, a été un frein pour certains membres du CST. Plusieurs approches ont été adoptées : certains membres ont d'abord lu la publication puis vérifié les informations contenues dans la grille, alors que d'autres ont lu la publication tout en vérifiant les informations contenues dans la grille en même temps. Une clarification des consignes sera à prévoir pour permettre une approche harmonisée, lors de la déclinaison éventuelle de cet exercice sur les autres espèces de coquillages.

Diffusion de l'information

En plus des présentations des avancées des travaux du CST aux réunions du COPEEC, des communications orales ont eu lieu :

- une présentation lors de la journée des laboratoires du LNR à Nantes le 16 mars 2017 ;
- une présentation lors de la Commission Sanitaire du CNPMM le 28 septembre 2017 ;
- une présentation lors du Conseil de filière conchylicole à Nantes le 14 novembre 2017 ;
- une présentation lors de la Commission Sanitaire du CNPMM le 02 octobre 2018.

Annexe 3 : Equations de recherche

Code requête	Champ	Requête (titre, résumé, mots clés)
1.	Espèces : huître creuse moule bleue coque palourde telline huître plate moule <i>galloprovincialis</i> <i>Mytilus</i>	oyster* OR "Crassostrea gigas" OR "C* gigas" OR "Pacific oyster*" OR mussel* OR "Mytilus edulis" OR "M* edulis" OR "blue mussel*" OR cockle* OR Cerastoderma* OR clam OR clams OR "R* philippinarum" OR "R* decussatus" OR "V* philippinarum" OR "V* decussatus" OR "Donax trunculus" OR "wedge clam" OR "Ostrea edulis" OR "O* edulis" OR "Mytilus galloprovincialis" OR "M* galloprovincialis "
2.	Mortalité Maladie Immunité	mortalit* OR "summer mortalit*" OR survival OR diseas* OR infection* OR illness OR epizoot* OR "health effect" OR immun* OR immunit* OR "immun* system"
3.		1 AND 2
4.	Facteurs de risque <i>Pratiques d'élevage</i> <i>Caractéristiques des animaux</i> <i>Caractéristiques de l'eau de mer</i> <i>Contaminants des milieux terrestre et maritime</i> <i>Caractéristiques de la zone étudiée</i> <i>Organismes pathogènes</i> <i>Recrutement larvaire</i>	"risk* factor*" OR stress OR factor* OR multifactor* OR husbandry OR management OR farming OR rearing OR "farm* practice*" OR "rear* practice*" OR aquaculture OR cultivation OR "shellfish* culture*" OR genetics* OR ploidy OR triploid* OR diploid* OR energetic OR physiol* OR age OR grow* OR weight OR length OR size OR environmental OR environment OR "environ* interact*" OR temperature OR salinity OR pH OR acidification OR pollut* OR *chemical* OR contaminant* OR "*water* qualit*" OR plan?ton OR sediment OR hydrodynamic* OR spatial OR temporal OR "marine current" OR "*water current" OR pathogen* OR virus OR parasite* OR bacteri* OR OsHV* OR "ostreid herpesvirus" OR herpes OR vibrio OR "v* aestuarianus" OR "v* splendidus" OR perkinsus OR Marteilia OR bonamia OR "v* tapetis" OR mi?rocytos OR recruitment OR settlement OR "larval abundance"
5.		3 AND 4
6.		norovirus OR "vibrio parahaemolyticus" OR "vibrio vulnificus" OR "vibrio cholerae"
7.		5 NOT 6
8.		2006-2017
9.	Scenario 8b	7 AND 9

Annexe 4 : Grille d'inventaire

Consignes :

Dans le cadre du programme de recherche en santé des coquillages, il est prévu d'établir un état des lieux des études et données pré-existantes visant à identifier les facteurs de risque de mortalité des coquillages, ainsi que leurs interactions.

Nous souhaitons identifier :

- les données collectées, organisées par grands thèmes (1ere colonne de chaque groupe coloré)
- le type de saisie des données et l'organisation de la base de données
- l'état d'avancement du traitement des données

Le renseignement de ces critères nous permettra d'évaluer au mieux la quantité et le temps de travail à fournir pour la synthèse et la méta-analyse de ces études.

Nous vous sollicitons pour renseigner la grille située dans l'onglet n°2.

Une ligne correspond à une étude ou base de données française existante. Nous vous remercions de bien vouloir renseigner chaque colonne (quand cela est pertinent). Des exemples sont disponibles dans les commentaires qui s'affichent en positionnant le pointeur de la souris sur l'en-tête des colonnes, signalés par un triangle rouge en haut à droite.

Merci pour votre aide !

Onglet n°2 :

Acronyme de l'étude	Auteurs	Période	Zone géographique	Esperance de coquillage(s) étudié(s)	Objectif(s)	Résultats principaux	Mortalité	Méthode d'estimation	Unité d'observation	Nombre d'unités étudié	Caractéristiques des animaux	Précisez	Pratiques d'élevage	Précisez	Caractéristiques de l'eau de mer	Précisez	Contaminants des milieux terrestres ou aquatiques	Précisez	Caractéristiques de la zone étudiée	Précisez	Conditions climatiques	Précisez	Recensement d'organismes pathogènes	Précisez	Matrice	Les données sont-elles saisies ?	Format de la base de données	Nombre de fichiers de saisie différents	Traitement des données	d'aller plus loin dans le traitement	Rapport disponible	Commentaires

Annexe 5 : Liste de contrôle de la stratégie de recherche

Clegg, T.A., Morrissey, T., Geoghegan, F., Martin, S.W., Lyons, K., Ashe, S., More, S.J., 2014. Risk factors associated with increased mortality of farmed Pacific oysters in Ireland during 2011. *Preventive veterinary medicine* 113, 257-267.

de Kantzow, M., Hick, P., Becker, J.A., Whittington, R.J., 2016. Effect of water temperature on mortality of Pacific oysters *Crassostrea gigas* associated with microvariant ostreid herpesvirus 1 (OsHV-1 mu Var). *Aquacult Env Interac* 8, 419-428.

de Kantzow, M.C., Hick, P.M., Dhand, N.K., Whittington, R.J., 2017. Risk factors for mortality during the first occurrence of Pacific Oyster Mortality Syndrome due to Ostreid herpesvirus - 1 in Tasmania, 2016. *Aquaculture* 468, 328-336.

Normand, J., Blin, J.L., Jouaux, A., 2014. Rearing practices identified as risk factors for ostreid herpesvirus 1 (OsHV-1) infection in Pacific oyster *Crassostrea gigas* spat. *Dis Aquat Organ* 110, 201-211.

Paul-Pont, I., Dhand, N.K., Whittington, R.J., 2013. Influence of husbandry practices on OsHV-1 associated mortality of Pacific oysters *Crassostrea gigas*. *Aquaculture* 412, 202-214.

Paul-Pont, I., Dhand, N.K., Whittington, R.J., 2013. Spatial distribution of mortality in Pacific oysters *Crassostrea gigas*: reflection on mechanisms of OsHV-1 transmission. *Dis Aquat Organ* 105, 127-138.

Paul-Pont, I., Evans, O., Dhand, N.K., Rubio, A., Coad, P., Whittington, R.J., 2014. Descriptive epidemiology of mass mortality due to Ostreid herpesvirus-1 (OsHV-1) in commercially farmed Pacific oysters (*Crassostrea gigas*) in the Hawkesbury River estuary, Australia. *Aquaculture* 422, 146-159.

Peeler, E.J., Reese, R.A., Cheslett, D.L., Geoghegan, F., Power, A., Thrush, M.A., 2012. Investigation of mortality in Pacific oysters associated with Ostreid herpesvirus-1 mu Var in the Republic of Ireland in 2009. *Preventive veterinary medicine* 105, 136-143.

Pernet, F., Barret, J., Le Gall, P., Corporeau, C., Degremont, L., Lagarde, F., Pepin, J.F., Keck, N., 2012. Mass mortalities of Pacific oysters *Crassostrea gigas* reflect infectious diseases and vary with farming practices in the Mediterranean Thau lagoon, France. *Aquacult Env Interac* 2, 215-237.

Pernet, F., Lagarde, F., Jeanne, N., Daigle, G., Barret, J., Le Gall, P., Quere, C., D'orbcastel, E.R., 2014. Spatial and Temporal Dynamics of Mass Mortalities in Oysters Is Influenced by Energetic Reserves and Food Quality. *PloS one* 9.

Pernet, F., Lagarde, F., Le Gall, P., D'Orbcastel, E.R., 2014. Associations between farming practices and disease mortality of Pacific oyster *Crassostrea gigas* in a Mediterranean lagoon. *Aquacult Env Interac* 5, 99-106.

Pernet, F., Tamayo, D., Petton, B., 2015. Influence of low temperatures on the survival of the Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) infected with ostreid herpes virus type 1. *Aquaculture* 445, 57-62.

Petton, B., Pernet, F., Robert, R., Boudry, P., 2013. Temperature influence on pathogen transmission and subsequent mortalities in juvenile Pacific oysters *Crassostrea gigas*. *Aquacult Env Interac* 3, 257-273.

Petton, B., Boudry, P., Alunno-Bruscia, M., Pernet, F., 2015. Factors influencing disease-induced mortality of Pacific oysters *Crassostrea gigas*. *Aquacult Env Interac* 6, 205-222.

Samain, J.F., Ropert, M., Bedier, E., Soletchnik, P., Mazurie, J., Le Coz, F., Blin, J.L., Mille, D., Pajot, R., Haffray, P., Bacher, C., Grangere, K., Pouvreau, S., Bourles, Y., Gohin, F., Woerther, P.,

Boudry, P., 2006. Possibilities to prevent *Crassostrea gigas* oyster summer mortality in France. In, World Aquaculture Society, Aquaculture, <https://archimer.ifremer.fr/doc/00000/3476/>

Samain, J.F., Ropert, M., Bedier, E., Soletchnik, P., Mazurie, J., Le Coz, F., Blin, J.L., Mille, D., Pajot, R., Haffray, P., Bacher, C., Grangere, K., Pouvreau, S., Bourles, Y., Gohin, F., Woerther, P., Boudry, P., 2006. Possibilities to prevent *Crassostrea gigas* oyster summer mortality in France. In, World Aquaculture Society, Aquaculture, <https://archimer.ifremer.fr/doc/00000/3476/>

Samain, J.F., Mc Combie, H., 2008. Summer Mortality of Pacific Oyster *Crassostrea Gigas*. The Morest Project. 379 pp.

Whittington, R.J., Dhand, N.K., Evans, O., Paul-Pont, I., 2015. Further observations on the influence of husbandry practices on OsHV-1 mu Var mortality in Pacific oysters *Crassostrea gigas*: Age, cultivation structures and growing height. Aquaculture 438, 82-97.

Annexe 6 : Tableau des motifs d'exclusion des références à la lecture du texte intégral

Code	Référence	Motif d'exclusion
17	Bulleri, F., Airoidi, L., <i>et al.</i> (2006). Positive effects of the introduced green alga, <i>Codium fragile</i> ssp <i>tomentosoides</i> , on recruitment and survival of mussels. <i>Marine Biology</i> 148 (6): 1213-1220.	La mortalité des moules n'est pas la variable d'intérêt du document Réponse « Non » à la Question 2
201	Meneghetti, F., Moschino, V., <i>et al.</i> (2006). Interaction between mussels (<i>Mytilus galloprovincialis</i> Lmk) and habitat in an experimental area of the North Adriatic Sea: evaluation of biological responses. <i>Biologia marina mediterranea</i> : 703-706.	Texte intégral non retrouvé
245	Sundt, R. C., Pampanin, D. M., <i>et al.</i> (2006). The BEEP Stavanger Workshop: Mesocosm exposures. <i>Aquatic Toxicology</i> 78 : S5-S12.	- La mortalité des moules n'est pas la variable d'intérêt du document Réponse « Non » à la Question 2 - Le document ne recherche pas de facteurs associés aux mortalités de moules Réponse « Non » à la Question 3
374	LeBlanc, N., Davidson, J., <i>et al.</i> (2006). The effects of anti-fouling treatments for <i>Styela clava</i> on long-line cultured <i>Mytilus edulis</i> in Prince Edward Island, Canada. <i>Journal of Shellfish Research</i> 25 (2): 748.	La mortalité des moules n'est pas la variable d'intérêt du document Réponse « Non » à la Question 2
546	O'Connor, N. E., Crowe, T. P., <i>et al.</i> (2006). Effects of epibiotic algae on the survival, biomass and recruitment of mussels, <i>Mytilus</i> L. (Bivalvia : Mollusca). <i>Journal of Experimental Marine Biology and Ecology</i> 328 (2): 265-276.	La mortalité des moules n'est pas la variable d'intérêt du document Réponse « Non » à la Question 2
732	LeBlanc, N. (2006). Mussel genetics in relation to selection methods for high quality seed and treatment for tunicates. <i>Dissertation Abstracts International</i> 68 : 169.	Texte intégral non retrouvé
738	Marin, M. G., Boscolo, R., <i>et al.</i> (2006). Field validation of autometallographical black silver deposit (BSD) extent in three bivalve species from the Lagoon of Venice, Italy (<i>Mytilus galloprovincialis</i> , <i>Tapes philippinarum</i> , <i>Scapharca inaequivalvis</i>) for metal bioavailability assessment. <i>Sci Total Environ</i> 371 (1-3): 156-167.	- La mortalité des moules n'est pas la variable d'intérêt du document Réponse « Non » à la Question 2 - Le document ne recherche pas de facteurs associés aux mortalités de moules Réponse « Non » à la Question 3
903	Rius, M. and McQuaid, C. D. (2006). Wave action and competitive interaction between the invasive mussel <i>Mytilus galloprovincialis</i> and the indigenous <i>Perna perna</i> in South Africa. <i>Marine Biology</i> 150 (1): 69-78.	Le document ne recherche pas de facteurs associés aux mortalités de moules Réponse « Non » à la Question 3
937	Galinou-Mitsoudi, S., Savvidis, Y., <i>et al.</i> (2006). Interaction between mussel culture and hydrodynamics: a preliminary study in the gulfs of Thessaloniki and Thermaikos, Greece. <i>Journal of Biological Research-Thessaloniki</i> 6 : 139-145.	Le document ne recherche pas de facteurs associés aux mortalités de moules Réponse « Non » à la Question 3
1334	Coray, C. (2007). Assessing the health of Halifax Harbour's intertidal ecosystem: Impacts of marine pollution on community structure, reproductive health of key predator populations (<i>Nucella lapillus</i>), and immunomodulation in blue mussels (<i>Mytilus edulis</i> and <i>Mytilus trossulus</i>). <i>Masters Abstracts International</i> . Vol. 45, no. 05: 143.	Texte intégral non retrouvé
1373	Khalaman, V. V. and Komendantov, A. Y. (2007). Mutual effects of several fouling organisms of the white sea (<i>Mytilus edulis</i> , <i>Styela rustica</i> , and <i>Hiatella arctica</i>) on their growth rate and survival. <i>Russian Journal of Marine Biology</i> 33 (3): 139-144.	Le document ne recherche pas de facteurs associés aux mortalités de moules Réponse « Non » à la Question 3
1375	Petes, L. E., Menge, B. A., <i>et al.</i> (2007). Environmental stress decreases survival, growth, and reproduction in New Zealand mussels. <i>Journal of Experimental Marine Biology and Ecology</i> 351 (1-2): 83-91.	- La mortalité des moules n'est pas la variable d'intérêt du document Réponse « Non » à la Question 2 - Le document ne recherche pas de facteurs associés aux mortalités de moules Réponse « Non » à la Question 3

1480	Drapeau, A., Comeau, L. A., <i>et al.</i> (2007). The effect of sock spacing on the productivity of mussel on a longline system. <i>Canadian technical report of fisheries and aquatic sciences</i> . 2685 : 22.	La mortalité des moules n'est pas la variable d'intérêt du document Réponse « Non » à la Question 2 La mesure de la mortalité est indirecte (densité de moules par support d'élevage)
1755	Fafandel, M. and Bihari, N. (2007). PAH content and toxicity of sediment, seawater and mussel tissue in Gulf of Rijeka. <i>CIESM Congress Proceedings, Rapp. Comm. int. Mer Médit.</i>	La mortalité des moules n'est pas la variable d'intérêt du document Réponse « Non » à la Question 2
1817	LeBlanc, N., Davidson, J., <i>et al.</i> (2007). The effect of anti-fouling treatments for the clubbed tunicate on the blue mussel, <i>Mytilus edulis</i> . <i>Aquaculture</i> 264 (1-4): 205-213.	La mortalité des moules n'est pas la variable d'intérêt du document Réponse « Non » à la Question 2
1840	Babarro, J. M. F., Labarta, U., <i>et al.</i> (2007). Energy metabolism and performance of <i>Mytilus galloprovincialis</i> under anaerobiosis. <i>Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom</i> 87 (4): 941-946.	Le document ne recherche pas de facteurs associés aux mortalités de moules Réponse « Non » à la Question 3
1849	Petes, L. E. (2007). Effects of environmental stress on intertidal mussel reproduction. <i>Dissertation Abstracts International</i> 68 (no. 06, suppl. B): 196.	Doublon avec 1375
1922	Nesto, N., Romano, S., <i>et al.</i> (2007). Bioaccumulation and biomarker responses of trace metals and micro-organic pollutants in mussels and fish from the Lagoon of Venice, Italy. <i>Marine Pollution Bulletin</i> 55 (10-12): 469-484.	- La mortalité des moules n'est pas la variable d'intérêt du document Réponse « Non » à la Question 2 Test de la survie hors de l'eau - Le document ne recherche pas de facteurs associés aux mortalités de moules Réponse « Non » à la Question 3
2288	Nikiforov, S. M. and Zvyagintsev, A. Y. (2008). Allozyme diversity among local populations of the pacific mussel <i>Mytilus trossulus</i> (Bivalvia : Mytilidae) from polluted areas of Peter the Great Bay (Sea of Japan). <i>Russian Journal of Marine Biology</i> 34 (1): 45-50.	La mortalité des moules n'est pas la variable d'intérêt du document Réponse « Non » à la Question 2 La variable d'intérêt est l'abondance de l'espèce
2492	Wepener, V., Bervoets, L., <i>et al.</i> (2008). Metal exposure and biological responses in resident and transplanted blue mussels (<i>Mytilus edulis</i>) from the Scheldt estuary. <i>Marine Pollution Bulletin</i> 57 (6-12): 624-631.	Le document ne recherche pas de facteurs associés aux mortalités de moules Réponse « Non » à la Question 3
2771	Peperzak, L. and Poelman, M. (2008). Mass mussel mortality in The Netherlands after a bloom of <i>Phaeocystis globosa</i> (prymnesiophyceae). <i>Journal of Sea Research</i> 60 (3): 220-222.	Le document ne recherche pas de facteurs associés aux mortalités de moules Réponse « Non » à la Question 3 Il s'agit d'une étude de cas
3249	Bownes, S. J. and McQuaid, C. D. (2009). Mechanisms of habitat segregation between an invasive and an indigenous mussel: settlement, post-settlement mortality and recruitment. <i>Marine Biology</i> 156 (5): 991-1006.	Le document ne recherche pas de facteurs associés aux mortalités de moules Réponse « Non » à la Question 3
3670	Gulshad, M. (2003). Algal bloom and mass mortality of fishes and mussels along Kozhikode coast. <i>Marine Fisheries Information Service, Technical and extension series</i> . Cochin, India, Central Marine Fisheries Research Institute, Indian Council of Agricultural Research. 175 .	Date de publication antérieure à 2006 (erreur dans la base de données)
4131	Maar, M., Timmermann, K., <i>et al.</i> (2010). A model study of the regulation of blue mussels by nutrient loadings and water column stability in a shallow estuary, the Limfjorden. <i>Journal of Sea Research</i> 64 (3): 322-333.	- La mortalité des moules n'est pas la variable d'intérêt du document Réponse « Non » à la Question 2 La variable d'intérêt est la biomasse de moules, mesure trop indirecte de la mortalité - Le document ne recherche pas de facteurs associés aux mortalités de moules Réponse « Non » à la Question 3
4184	Kock, M., Farre, M., <i>et al.</i> (2010). Integrated ecotoxicological and chemical approach for the assessment of pesticide pollution in the Ebro River delta (Spain). <i>Journal of Hydrology</i> 383 (1-2): 73-82.	- La mortalité des moules n'est pas la variable d'intérêt du document Réponse « Non » à la Question 2

		- Le document ne recherche pas de facteurs associés aux mortalités de moules Réponse « Non » à la Question 3
4400	Jones, S. J. and Wethey, D. S. (2010). Mussels, models, and mortality: exploring the respective roles of air and seawater temperatures in the southern range limit contraction of <i>Mytilus edulis</i> . <i>Integrative and Comparative Biology</i> 50 : E85-E85.	Doublon avec 4680
4755	Wethey, D. S., Woodin, S. A., et al. (2011). Response of intertidal populations to climate: Effects of extreme events versus long term change. <i>Journal of Experimental Marine Biology and Ecology</i> 400 (1-2): 132-144.	La mortalité des moules n'est pas la variable d'intérêt du document Réponse « Non » à la Question 2 La variable d'intérêt est l'abondance de l'espèce
5365	Gombac, I., Fonda, I., et al. (2011). Prevalent diseases and pathogens of Slovene cultured mediterranean mussels (<i>Mytilus galloprovincialis</i>). <i>Slovenian Veterinary Research Volume</i> 48 (SUPPL.13): 98-100.	Article en slovène
7404	Garner, Y. L. and Litvaitis, M. K. (2013). Effects of wave exposure, temperature and epibiont fouling on byssal thread production and growth in the blue mussel, <i>Mytilus edulis</i> , in the Gulf of Maine. <i>Journal of Experimental Marine Biology and Ecology</i> 446 : 52-56.	- La mortalité des moules n'est pas la variable d'intérêt du document Réponse « Non » à la Question 2 - Le document ne recherche pas de facteurs associés aux mortalités de moules Réponse « Non » à la Question 3
7749	Wu, H. F., Ji, C. L., et al. (2013). Proteomic and metabolomic responses in hepatopancreas of <i>Mytilus galloprovincialis</i> challenged by <i>Micrococcus luteus</i> and <i>Vibrio anguillarum</i> . <i>Journal of Proteomics</i> 94 : 54-67.	La mortalité des moules n'est pas la variable d'intérêt du document Réponse « Non » à la Question 2
7841	Capelle, J. J., Wijsman, J. W. M., et al. (2014). Spatial organisation and biomass development after relaying of mussel seed. <i>Journal of Sea Research</i> 85 : 395-403.	La mortalité des moules n'est pas la variable d'intérêt du document Réponse « Non » à la Question 2 La mesure de la mortalité est trop indirecte (densité)
7844	Calderwood, J., O'Connor, N. E., et al. (2014). Determining optimal duration of seed translocation periods for benthic mussel (<i>Mytilus edulis</i>) cultivation using physiological and behavioural measures of stress. <i>Aquaculture</i> 434 : 288-295.	La mortalité des moules n'est pas la variable d'intérêt du document Réponse « Non » à la Question 2
7984	Serracca, L., Prearo, M., et al. (2014). Four-Year Surveillance of <i>Marteilia refringens</i> in Shellfish Farms in the Gulf of La Spezia (Liguria, Italy). <i>Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences</i> 14 (4): 893-896.	La mortalité des moules n'est pas la variable d'intérêt du document Réponse « Non » à la Question 2
8325	Michaelidis, B., Portner, H. O., et al. (2014). Advances in predicting the impacts of global warming on the mussels <i>Mytilus galloprovincialis</i> in the mediterranean sea. <i>The Mediterranean Sea: Its history and present challenges</i> . S. Goffredo and Z. Dubinsky (eds.), Springer Science+Business Media Dordrecht: 319-339.	Le document décrit une revue d'études et pas une étude originale Réponse « Non » à la Question 1
8518	Muller, E. B., Hanna, S. K., et al. (2014). Impact of engineered zinc oxide nanoparticles on the energy budgets of <i>Mytilus galloprovincialis</i> . <i>Journal of Sea Research</i> 94 : 29-36.	La mortalité des moules n'est pas la variable d'intérêt du document Réponse « Non » à la Question 2
8592	Domeneghetti, S., Varotto, L., et al. (2014). Mortality occurrence and pathogen detection in <i>Crassostrea gigas</i> and <i>Mytilus galloprovincialis</i> close-growing in shallow waters (Goro lagoon, Italy). <i>Fish & Shellfish Immunology</i> 41 (1): 37-44.	Le document dn recherche pas de facteurs associés aux mortalités de moules Réponse « Non » à la Question 3 Il s'agit d'une étude descriptive
8776	Rowley, A. F., Cross, M. E., et al. (2014). The potential impact of climate change on the infectious diseases of commercially important shellfish populations in the Irish Sea-a review. <i>Ices Journal of Marine Science</i> 71 (4): 741-759.	- Le document décrit une revue d'études et pas une étude originale Réponse « Non » à la Question 1 - La mortalité des moules n'est pas la variable d'intérêt du document Réponse « Non » à la Question 2
9251	Mesas, A. and Tarifeno, E. (2015). Upper lethal temperatures for the mussel <i>Mytilus galloprovincialis</i> (Lamarck, 1819), in central coast of Chile. <i>Latin American Journal of Aquatic Research</i> 43 (3): 473-483.	Article en espagnol

9821	Karayucel, S., Celik, M. Y., <i>et al.</i> (2015). Effects of stocking density on survival, growth and biochemical composition of cultured mussels (<i>Mytilus galloprovincialis</i> , Lamarck 1819) from an offshore submerged longline system. <i>Aquaculture Research</i> 46 (6): 1369-1383.	La mortalité des moules n'est pas la variable d'intérêt du document Réponse « Non » à la Question 2
9951	Christensen, H. T., Dolmer, P., <i>et al.</i> (2015). Aggregation and attachment responses of blue mussels, <i>Mytilus edulis</i> -impact of substrate composition, time scale and source of mussel seed. <i>Aquaculture</i> 435 : 245-251.	La mortalité des moules n'est pas la variable d'intérêt du document Réponse « Non » à la Question 2
10268	Soletchnik, P. and Robert, S. (2016). Eléments de connaissance sur la mortalité et la reproduction de la moule bleue (<i>Mytilus edulis</i>) sur la façade atlantique, RST/ ODE / LER / LERPC – juillet 2016. https://archimer.ifremer.fr/doc/00345/45634/ .	Le document ne recherche pas de facteurs associés aux mortalités de moules Réponse « Non » à la Question 3
10273	Capelle, J. J., Wijsman, J. W. M., <i>et al.</i> (2016). Effect of seeding density on biomass production in mussel bottom culture. <i>Journal of Sea Research</i> 110 : 8-15.	La mortalité des moules n'est pas la variable d'intérêt du document Réponse « Non » à la Question 2 La mesure de la mortalité est trop indirecte (densité)
10339	Garcia, C., Osta Amigo, A., <i>et al.</i> (2016). Mortality of mussels in France. <i>Annual Meeting of the National Reference Laboratories for Mollusc Diseases</i> , Nantes, France.	Le document ne recherche pas de facteurs associés aux mortalités de moules Réponse « Non » à la Question 3
10426	de los Rios, A., Perez, L., <i>et al.</i> (2016). Measuring biological responses at different levels of organisation to assess the effects of diffuse contamination derived from harbour and industrial activities in estuarine areas. <i>Marine Pollution Bulletin</i> 103 (1-2): 301-312.	- La mortalité des moules n'est pas la variable d'intérêt du document Réponse « Non » à la Question 2 - Le document ne recherche pas de facteurs associés aux mortalités de moules Réponse « Non » à la Question 3
10687	Sandee, S. D., Van Hamme, J. D., <i>et al.</i> (2016). Testing microbial pathogens as a cause of early juvenile mortality in wild populations of benthic invertebrates. <i>Marine Ecology Progress Series</i> 562 : 53-63.	Le stade étudié est trop jeune (larves)
11100	Lupo, C. and Prou, J. (2016). Enhanced surveillance of shellfish mortality to improve early detection and investigation of outbreaks of exotic or emerging infectious diseases: An example of a mass mortality outbreak of mussels, France 2014. <i>Preventive Veterinary Medicine</i> 132 : 57-66.	Le document ne recherche pas de facteurs associés aux mortalités de moules Réponse « Non » à la Question 3
11171	Arzul, I., Chollet, B., <i>et al.</i> (2017). Suspicion of infection with <i>Marteilia refringens</i> in mussels from Norway. <i>Institute of Marine Research, Po Box 1870, NORDES 517 Bergen, Norway, Ref. Ifremer LGPMM/PAT/EURL/DS/BC/IA 17-032, 6p., 2p.</i>	Texte intégral non retrouvé
11176	Marigomez, I., Mugica, M., <i>et al.</i> (2017). Chronic environmental stress enhances tolerance to seasonal gradual warming in marine mussels. <i>Plos One</i> 12 (3).	- La mortalité des moules n'est pas la variable d'intérêt du document Réponse « Non » à la Question 2 - Le document ne recherche pas de facteurs associés aux mortalités de moules Réponse « Non » à la Question 3
11239	Polsenaere, P., Soletchnik, P., <i>et al.</i> (2017). Potential environmental drivers of a regional blue mussel mass mortality event (winter of 2014, Breton Sound, France). <i>Journal of Sea Research</i> 123 : 39-50.	Le document ne recherche pas de facteurs associés aux mortalités de moules Réponse « Non » à la Question 3
11245	Garcia, C., Ropert, M., <i>et al.</i> (2017). Atypical <i>Marteilia refringens</i> infection in mussels in Normandy, France. <i>Annual Meeting & Technical Workshop of NRLs for Mollusc diseases</i> , Oranmore, Ireland.	Le document ne recherche pas de facteurs associés aux mortalités de moules Réponse « Non » à la Question 3
maj2_285	Morello, S. L. and Etter, R. J. (2018). Transition probabilities help identify putative drivers of community change in complex systems. <i>Ecology</i> 99 (6): 1357-1369.	- La mortalité des moules n'est pas la variable d'intérêt du document Réponse « Non » à la Question 2 - Le document ne recherche pas de facteurs associés aux mortalités de moules

		Réponse « Non » à la Question 3
maj2_297	Steeves, L. E., Filgueira, R. n., <i>et al.</i> (2018). Past, Present, and Future: Performance of Two Bivalve Species Under Changing Environmental Conditions. <i>Frontiers in Marine Science</i> 5 (184).	La mortalité des moules n'est pas la variable d'intérêt du document Réponse « Non » à la Question 2
maj2_484	Nikolova, G., Karamalakova, Y., <i>et al.</i> (2018). Comparative analysis of real-time oxidative stress biomarkers measured in mussels (<i>Mytilus galloprovincialis</i>) and veined rapa whelks (<i>Rapana venosa</i>) in relation to two seasons - An electron paramagnetic resonance study. <i>Bulgarian Chemical Communications</i> 50 (Special Issue C): 58-63.	La mortalité des moules n'est pas la variable d'intérêt du document Réponse « Non » à la Question 2
maj2_540	Motta, C. M., Tizzano, M., <i>et al.</i> (2018). Biocide triclosan impairs byssus formation in marine mussels <i>Mytilus galloprovincialis</i> . <i>Environmental Pollution</i> 241 : 388-396.	La mortalité des moules n'est pas la variable d'intérêt du document Réponse « Non » à la Question 2
maj2_557	Benabdelmouna, A., Saunier, A., <i>et al.</i> (2018). Genomic abnormalities affecting mussels (<i>Mytilus edulis-galloprovincialis</i>) in France are related to ongoing neoplastic processes, evidenced by dual flow cytometry and cell monolayer analyses. <i>Journal of Invertebrate Pathology</i> 157 : 45-52.	La mortalité des moules n'est pas la variable d'intérêt du document Réponse « Non » à la Question 2
maj2_742	Goedknegt, M. A., Bedolfe, S., <i>et al.</i> (2018). Impact of the invasive parasitic copepod <i>Mytilicola orientalis</i> on native blue mussels <i>Mytilus edulis</i> in the western European Wadden Sea. <i>Marine Biology Research</i> 14 (5): 497-507.	La mortalité des moules n'est pas la variable d'intérêt du document Réponse « Non » à la Question 2
maj2_624	Binzer, S. B., Lundgreen, R. B. C., <i>et al.</i> (2018). The blue mussel <i>Mytilus edulis</i> is vulnerable to the toxic dinoflagellate <i>Karlodinium armiger</i> -Adult filtration is inhibited and several life stages killed. <i>Plos One</i> 13 (6).	La mortalité des moules n'est pas la variable d'intérêt du document Réponse « Non » à la Question 2
maj1040	Hernroth, B. E. and Baden, S. P. (2018). Alteration of host-pathogen interactions in the wake of climate change - Increasing risk for shellfish associated infections? <i>Environ Res</i> 161 : 425-438.	Le document décrit une revue d'études et pas une étude originale Réponse « Non » à la Question 1
maj1169	Banni, M., Sforzini, S., <i>et al.</i> (2017). Assessing the impact of Benzo[a]pyrene on Marine Mussels: Application of a novel targeted low density microarray complementing classical biomarker responses. <i>Plos One</i> 12 (6).	La mortalité des moules n'est pas la variable d'intérêt du document Réponse « Non » à la Question 2
maj1267	Deruytter, D., Vandegheuchte, M. B., <i>et al.</i> (2017). Salinity, Dissolved Organic Carbon, and Interpopulation Variability Hardly Influence the Accumulation and Effect of Copper in <i>Mytilus edulis</i> . <i>Environmental Toxicology and Chemistry</i> 36 (8): 2074-2082.	La mortalité des moules n'est pas la variable d'intérêt du document Réponse « Non » à la Question 2
maj1281	Faria, M., Soares, A. M. V. M., <i>et al.</i> (2018). Effects of Camellia sinensis crude saponin on survival and biochemical markers of oxidative stress and multixenobiotic resistance of the Mediterranean mussel, <i>Mytilus galloprovincialis</i> . <i>Science of the Total Environment</i> 625 : 1467-1475.	Texte intégral non retrouvé
maj1346	Matozzo, V., Fabrello, J., <i>et al.</i> (2018). Ecotoxicological risk assessment for the herbicide glyphosate to non-target aquatic species: A case study with the mussel <i>Mytilus galloprovincialis</i> . <i>Environmental Pollution</i> 233 : 623-632.	La mortalité des moules n'est pas la variable d'intérêt du document Réponse « Non » à la Question 2
maj1574	Morello, S. L. and Etter, R. J. (2017). Estimating the impact of consumers in ecological communities: Manual removals identify the complex role of individual consumers in the Gulf of Maine. <i>Journal of Experimental Marine Biology and Ecology</i> 495 : 89-102.	La mortalité des moules n'est pas la variable d'intérêt du document Réponse « Non » à la Question 2 L'étude s'intéresse à la composition de la zone étudiée via l'abondance relative de plusieurs espèces, dont la moule
maj2106	Capelle, J. J., van Stralen, M. R., <i>et al.</i> (2017). Population dynamics of subtidal blue mussels <i>Mytilus edulis</i> and the impact of cultivation. <i>Aquaculture Environment Interactions</i> 9 : 155-168.	La mortalité des moules n'est pas la variable d'intérêt du document Réponse « Non » à la Question 2 La mesure de la mortalité est trop indirecte (densité)
maj2298	Sforzini, S., Oliveri, C., <i>et al.</i> (2018). Application of a new targeted low density microarray and conventional biomarkers to evaluate the health status of marine mussels: A field study in Sardinian coast, Italy. <i>Science of the Total Environment</i> 628-629 : 319-328.	La mortalité des moules n'est pas la variable d'intérêt du document Réponse « Non » à la Question 2
maj2307	Mezzelani, M., Gorbi, S., <i>et al.</i> (2018). Long-term exposure of <i>Mytilus galloprovincialis</i> to diclofenac, Ibuprofen and Ketoprofen:	La mortalité des moules n'est pas la variable d'intérêt du document

	Insights into bioavailability, biomarkers and transcriptomic changes. <i>Chemosphere</i> 198 : 238-248.	Réponse « Non » à la Question 2
maj2317	Moreira, R., Balseiro, P., <i>et al.</i> (2018). Bivalve transcriptomics reveal pathogen sequences and a powerful immune response of the Mediterranean mussel (<i>Mytilus galloprovincialis</i>). <i>Marine Biology</i> 165 (4).	La mortalité des moules n'est pas la variable d'intérêt du document Réponse « Non » à la Question 2
maj2405	Matozzo, V., Ercolini, C., <i>et al.</i> (2018). Assessing the health status of farmed mussels (<i>Mytilus galloprovincialis</i>) through histological, microbiological and biomarker analyses. <i>Journal of Invertebrate Pathology</i> 153 : 165-179.	La mortalité des moules n'est pas la variable d'intérêt du document Réponse « Non » à la Question 2
maj2419	Bodkin, J. L., Coletti, H. A., <i>et al.</i> (2018). Variation in abundance of Pacific Blue Mussel (<i>Mytilus trossulus</i>) in the Northern Gulf of Alaska, 2006-2015. <i>Deep-Sea Research Part II-Topical Studies in Oceanography</i> 147 : 87-97.	La mortalité des moules n'est pas la variable d'intérêt du document Réponse « Non » à la Question 2 La mesure de la mortalité est trop indirecte (densité)
maj2636	Burgos-Aceves, M. A. and Faggio, C. (2017). An approach to the study of the immunity functions of bivalve haemocytes: Physiology and molecular aspects. <i>Fish & Shellfish Immunology</i> 67 : 513-517.	- Le document décrit une revue d'études et pas une étude originale Réponse « Non » à la Question 1 - La mortalité des moules n'est pas la variable d'intérêt du document Réponse « Non » à la Question 2
C1	Mortensen, S. (2018). Marteilia case in Scandinavia. <i>Annual Meeting of the National Reference Laboratories for Mollusc Diseases</i> . La Rochelle, France.	La mortalité des moules n'est pas la variable d'intérêt du document Réponse « Non » à la Question 2
C2	Lupo, C. and Prou, J. (2016). Enhanced surveillance of mussel mortality to improve early detection and investigation of outbreaks of infectious diseases. <i>Annual Meeting of the National Reference Laboratories for Mollusc Diseases</i> , Nantes, France.	Doublon avec 11100
C3	Garcia, C., Osta Amigo, A., <i>et al.</i> (2016). Mortality of mussels in France. <i>Annual Meeting of the National Reference Laboratories for Mollusc Diseases</i> , Nantes, France.	Doublon avec 10339
C4	Travers, M.-A., Morga, B., <i>et al.</i> (2015). Pathogens detected during mortality events of mussels in France in 2014. <i>Annual meeting of NRLs for Mollusc diseases and the technical workshop</i> , Saintes, France.	Doublon avec 9276
C5	Renault, T. (2011). BIVALIFE, a FP7 project focusing on the management of infectious diseases affecting oysters and mussels. <i>Annual Meeting of the National Reference Laboratories for Mollusc Diseases</i> , La Rochelle, France.	Doublon avec 8621
C6	Gombac, M. and Jencic, V. (2010). Protozoan infestation dynamics and occurrence of neoplasias in digestive gland of Mediterranean mussels (<i>Mytilus galloprovincialis</i>) in the Slovene sea in correlation with sea temperature, salinity and oxygenation. <i>Annual Meeting of the National Reference Laboratories for Mollusc Diseases</i> , Nantes, France.	La mortalité des moules n'est pas la variable d'intérêt du document Réponse « Non » à la Question 2
C7	Quaglio, F., Quagliari, E., <i>et al.</i> (2017). Histological and microbiological investigations in farmed mussels (<i>Mytilus galloprovincialis</i>) of La Spezia Gulf, Italy to evaluate health status. <i>18th International Conference on Diseases of Fish and Shellfish</i> , Belfast, United-Kingdom.	La mortalité des moules n'est pas la variable d'intérêt du document Réponse « Non » à la Question 2
C8	Bullard, S., Whithlatch, R., <i>et al.</i> (2006). Impacts of the colonial ascidian <i>didemnum</i> sp. on mussels, oysters and scallops. <i>98th Annual meeting of the National Shellfisheries Association</i> , Monterey, California USA.	Pas suffisamment d'information pour répondre à la Question 3 (Recherche de facteurs associés aux mortalités de moules)
C9	Leblanc, N., Davidson, J., <i>et al.</i> (2006). The effects of anti-fouling treatments for <i>Styela clava</i> on long-line cultured <i>Mytilus edulis</i> in Prince Edwards Island, Canada. <i>98th Annual meeting of the National Shellfisheries Association</i> . Monterey, California, USA.	Doublon avec 374
C10	Capelle, J., Wisjman, J., <i>et al.</i> (2012). The effect of spatial heterogeneity in mussel density on the productivity of a commercial mussel bed. <i>104th Annual meeting of the National Shellfisheries Association</i> , Seattle, Whashington, USA.	Doublon avec 7841
C11	Bernard, I. and Charles, M. (2017). Investigation on blue mussel high mortality in France: a phenomenon with high spatio-temporal	Doublon avec LG82

	variability but no conclusive cause. <i>2nd International Symposium on the Advances in Marine Mussel Research</i> , Sète, France.	
C12	Burioli, E. A. V. (2017). First description of disseminated neoplasia in <i>Mytilus edulis</i> in Northern Brittany (France) and development of a rapid diagnostic tool. <i>2nd International Symposium on the Advances in Marine Mussel Research</i> , Sète, France.	Le document ne recherche pas de facteurs associés aux mortalités de moules Réponse « Non » à la Question 3
C13	Guesdon, S., Travers, M. A., et al. (2017). Microbial balance, and triggering of recent mussel mortality events in France: is there a link? <i>2nd International Symposium on the Advances in Marine Mussel Research</i> , Sète, France.	Doublon avec 10292
C14	Eggermont, M., Tamanji, A., et al. (2014). Isolation of blue mussel <i>Mytilus edulis</i> pathogenic Vibrios from wildcaught adults. <i>European Aquaculture Society conference</i> , Donostia-San Sebastian, Spain.	Doublon avec bi2
C15	Theodorou, J. A., Tzovenis, I., et al. (2015). Risk analysis of the Mediterranean mussel farming in Greece. <i>European Aquaculture Society Conference</i> , Rotterdam, The Netherlands.	Texte intégral non retrouvé
C16	Basti, L., Endo, M., et al. (2010). Histopathological effects of the toxic dinoflagellate <i>Heterocapsa circularisquama</i> on short-neck clam <i>Ruditapes philippinarum</i> and blue mussel <i>Mytilus galloprovincialis</i> . <i>Aquaculture</i> , San Diego, California, USA.	Le document ne recherche pas de facteurs associés aux mortalités de moules Réponse « Non » à la Question 3
C17	Basti, L., Endo, M., et al. (2013). Sequencing of organ damage in the Mediterranean mussel <i>Mytilus galloprovincialis</i> following exposure to the harmful alga <i>Heterocapsa circularisquama</i> . <i>Aquaculture</i> , Nashville, Tennessee, USA.	La mortalité des moules n'est pas la variable d'intérêt du document Réponse « Non » à la Question 2
C18	Scro, A. K., Materna, C., et al. (2016). The occurrence and severity of disease in populations of blue mussels, <i>Mytilus edulis</i> , in Rhode Island coastal waters. <i>Aquaculture</i> , Las Vegas, Nevada, USA.	Absence de résultat dans le résumé
LG15	SMEL-LABEO (2016). Programme CACHEMYRE. CRC Normandie-Mer du Nord.	La mortalité des moules n'est pas la variable d'intérêt du document Réponse « Non » à la Question 2
LG18	Ifremer-LERN (2017-2019). Programmation du Centre de Référence de l'Huître - Moules 2017.	Texte intégral non retrouvé : projet non abouti
LG44	Charles, M. (en cours : 2016-2019). Surmortalités des moules (<i>Mytilus edulis</i> et <i>Mytilus galloprovincialis</i>). Etude des pathogènes et des composés chimiques qui peuvent influencer l'état physiologique des moules.	Texte intégral non retrouvé : thèse universitaire en cours
LG45	Glize, P., Tetard, X., et al. (2010). Elevage conchylicole au large en Baie de Bourgneuf : Approche zootechnique et cartographique. SMIDAP. 122 pp.	La mortalité des moules n'est pas la variable d'intérêt du document Réponse « Non » à la Question 2
LG56	SMIDAP (2017). Programme CAPEMOULES 2 Bis. SMIDAP & CRC Pays de la Loire.	Doublon avec LG60 (poursuite du programme)

Annexe 7 : Grille d'extraction des caractéristiques clés des études d'observation

Une étude d'observation se caractérise par l'absence de contrôle du facteur étudié, de la part du chercheur.

Code couleur : **Surligné bleu** : variables permettant d'évaluer les possibilités d'une méta-analyse, i.e. si les données des études pourront être agrégées ou pas
Surligné gris : variables renseignées dans un second temps, i.e. si une méta-analyse est envisageable car plusieurs études ont étudié les mêmes facteurs

Nom de la variable	Description	Modalités	Commentaires ou définitions
Caractéristiques générales de l'étude			
ID_reference	Numéro d'identifiant de la référence	Nombre	Permet de faire le lien avec les auteurs, le journal, le résumé (dans une autre base de données)
ID_etude	Numéro d'identifiant de l'étude	Nombre	Une référence peut contenir plusieurs études
An_publi	Année de publication	Année	
Typ_publi	Type de publication	-article de journal international -article de journal national -acte de conférences -rapport d'étude ou de contrat -thèse -livre ou chapitre de livre	
Lang	Langue	-anglais -français -espagnol	
Schema	Schéma d'étude	-étude descriptive de cas ou de séries de cas -étude analytique transversale -étude analytique cas/témoins -étude analytique exposés/non exposés -étude chalut -étude prospective de coquillages sentinelles -étude de modélisation -autre, préciser	<p>étude descriptive de cas : étude dont l'objet est de décrire les caractéristiques d'un phénomène de santé dans une population, son évolution dans le temps, sa répartition et son évolution dans l'espace.</p> <p>étude analytique transversale : étude permettant d'évaluer l'intensité de l'association entre la mortalité et un facteur de risque potentiel dans une population en un temps très court.</p> <p>étude analytique cas/témoins : étude permettant de comparer un groupe de coquillages affecté par les mortalités (cas) et un groupe de coquillage non affecté par les mortalités (témoins), grâce à la récupération d'informations sur l'exposition antérieure à un/des facteur(s) de risque.</p> <p>étude analytique exposés/non exposés : étude permettant de comparer des groupes de coquillages non affectés par les mortalités au début de l'étude et diversement exposés à un/des facteur(s) de risque.</p> <p>étude chalut : analyse réalisée <i>a posteriori</i> sur des données collectées sur un grand</p>

			<p>nombre de variables, sans que les hypothèses correspondantes aient présidé à l'élaboration du protocole, et entreprise afin de révéler des différences significatives.</p> <p>étude prospective de coquillages sentinelles : étude permettant de comparer des groupes de coquillages non affectés par les mortalités au début de l'étude et diversement exposés à un/des facteur(s) de risque, sans que le choix des expositions soit délibéré.</p> <p>étude de modélisation : étude permettant de représenter de façon simplifiée une situation réelle complexe en vue de sa simulation pour étudier les processus influençant les mortalités de moules ou évaluer des actions de maîtrise de ces mortalités.</p>
Schema_temps	Type temporel de l'étude	-transversale -longitudinale -prospective -rétrospective	<p>Choix multiple possible</p> <p>transversale : étude permettant de décrire les mortalités dans une population de coquillage en un temps très court.</p> <p>longitudinale : étude permettant de suivre pendant une longue période la survenue de mortalité dans un ou plusieurs groupes de coquillages par des observations périodiques.</p> <p>prospective : étude permettant de suivre au cours du temps un groupe de coquillages afin de récolter des observations sur les mortalités qui les affecteront.</p> <p>rétrospective : étude de phénomènes de mortalité ayant déjà eu lieu.</p>
An_etud	Année de l'étude	Année	
Duree_etud	Durée de l'étude	Nombre de mois	
Pays	Pays de l'étude	Pays + région si France	Quel niveau de précision pour la France : région <i>ex : France, Normandie</i>
Population(s) étudiée(s)			
Pop_esp	Espèce de moule	- <i>Mytilus edulis</i> - <i>Mytilus galloprovincialis</i> - <i>Mytilus trossulus</i>	Choix multiple possible
Pop_age	Classe d'âge	Texte	Dans un premier temps, laisser libre car ce critère est peu standardisé, puis faire des catégories <i>a posteriori</i>
Pop_tail	Taille des animaux	Texte	Dans un premier temps, laisser libre car ce critère est peu standardisé, puis faire des catégories <i>a posteriori</i>
Pop_typ	Type de population	-élevage -gisement -écloserie	Choix multiple possible
Pop_unit	Unité épidémiologique	-individu -groupe -élevage (entreprise)	Permet d'avoir une idée si les données des études pourront être agrégées pour une méta-analyse ou pas
Pop_unit_taille	Si unité = groupe, préciser la taille du	Nombre	

	groupe (nombre d'individus)		
Pop_selec	Mode de sélection de l'échantillon (des unités épidémiologiques)	-tirage au sort -convenance	
Nb_unit	Nombre d'unités épidémiologiques étudiées	Nombre	Pour les études descriptives de cas ou de séries de cas, les études analytiques transversales, les études chaluts ou les études prospectives de coquillages sentinelles : renseigner le nombre d'unités <u>réellement étudiées</u> (perdus de vue décomptés)
Nb_group1	Nombre initial d'unités cas ou exposées	Nombre	Pour les études analytiques cas/témoins et les études analytiques exposés/non exposés : renseigner le nombre d'unités cas (i.e. où la mortalité est observée) ou unités exposées au facteur étudié, <u>réellement étudiées</u> (perdus de vue décomptés)
Nb_group2	Nombre initial d'unités témoins ou non exposées	Nombre	Pour les études analytiques cas/témoins et les études analytiques de cohortes exposées/non exposées : renseigner le nombre d'unités témoins (i.e. où la mortalité n'est pas observée) ou unités non exposées au facteur étudié (perdus de vue décomptés), <u>réellement étudiées</u> (perdus de vue décomptés)
Mortalité			
Mort_mesu	Méthode de mesure de la mortalité	-comptage -déclaration des éleveurs/pêcheurs -méthode indirecte, préciser (ex : pesée et comparaison avec le poids attendu)	
Mort_freq	Fréquence de mesure de la mortalité dans chaque unité	Texte	Dans un premier temps, laisser libre car ce critère est peu standardisé, puis faire des catégories <i>a posteriori</i>
Mort_form	Format d'expression de la mortalité	-prévalence finale -prévalence cumulée au cours du suivi -prévalence instantanée -incidence -classes ordonnées (variable ordinale) -présence/absence (ex : déclaration)	Permet d'avoir une idée si les données des études pourront être agrégées pour une méta-analyse ou pas
Facteur(s) étudié(s)			
Fact_nb	Nombre de facteurs étudiés	Nombre	Permet d'identifier les études multifactorielles
Fact_cat_general	Facteurs étudiés dans l'étude	-caractéristiques des moules -pratiques d'élevage/de culture/de pêche -caractéristiques de l'eau de mer -apports des milieux terrestres et aquatiques	Choix multiple possible caractéristiques des moules : exemples : âge, taille, ploïdie, origine, statut physiologique, etc. pratiques d'élevage/de culture/de pêche : bouchots, filières, etc.

		-caractéristiques du site étudié -conditions climatiques -organismes pathogènes	caractéristiques de l'eau de mer : température, salinité, pH, turbidité, couleur, tec. apports des milieux terrestres et aquatiques : indicateurs de la qualité microbiologique de l'eau (<i>E. coli</i> ...), pesticides, métaux lourds, micropolluants organiques tels que les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HABs) ou produits médicamenteux, etc. caractéristiques du site étudié : vitesse des courants marins, nature du sol, tec. conditions climatiques : pluviométrie, indice NAO, etc. organismes pathogènes : <i>Vibrio splendidus</i> , <i>Marteilia refringens</i> , etc.
Fact_cat_specific	Facteurs étudiés dans l'étude : détail	<i>Ex : température, nanoparticules d'oxyde de zinc,...</i>	Dans un premier temps, laisser libre car ce critère est peu standardisé, puis faire des catégories <i>a posteriori</i>
Appo_matrice	Si apports des milieux terrestres et aquatiques étudiés, matrice utilisée pour la recherche	-eau de mer -animal -sédiment -autre, préciser	Choix multiple possible
Appo_method	Si apports des milieux terrestres et aquatiques étudiés, méthode de détection	Texte	Dans un premier temps, laisser libre car les méthodes possibles sont très nombreuses, faire des catégories <i>a posteriori</i> si cela s'avère nécessaire
Appo_detail	Si apports des milieux terrestres et aquatiques étudiés, détails de la méthode de détection	Copier-coller les détails	Permet d'avoir une idée si les données des études pourront être agrégées pour une méta-analyse ou pas
Appo_dosef	Si apports des milieux terrestres et aquatiques étudiés, effet dose observé ?	-oui -non	L'observation d'un effet-dose augmente la confiance dans les résultats de l'étude
Op_matrice	Si organismes pathogènes étudiés, matrice utilisée pour la recherche	-eau de mer -animal entier -animal organes, préciser	Choix multiple possible
Op_method	Si organismes pathogènes étudiés, méthode de diagnostic/dépistage	-PCR -mise en culture et identification (bactéries) -histologie -autre, préciser	Choix multiple possible
Op_detail	Si organismes pathogènes étudiés, détails de la méthode de diagnostic/dépistage	Copier-coller les détails (milieu, temps d'incubation, température, amorces...)	Cela permettra de vérifier que les résultats sont comparables, si les méthodes le sont (car peu de méthodes de référence) Permet d'avoir une idée si les données des études pourront être agrégées pour une méta-analyse ou pas

Op_dosef	Si organismes pathogènes étudiés, effet dose observé ?	-oui -non	L'observation d'un effet-dose augmente la confiance dans les résultats de l'étude
Mesures d'association			
Asso_type	Type de la mesure d'association	-OR (odds ratio) -RR (risque relatif) -différence de moyennes -autre, préciser	Type de la mesure d'association entre le facteur étudié et la mortalité
Asso_mesu	Valeur de la mesure d'association (ex : OR ou RR)	Nombre	Répliquer cette variable pour chaque facteur étudié dans la cellule
Asso_IC_inf	Borne inférieure de l'intervalle de confiance à 95%	Nombre	Répliquer cette variable pour chaque facteur étudié dans la cellule
Asso_IC_sup	Borne supérieure de l'intervalle de confiance à 95%	Nombre	Répliquer cette variable pour chaque facteur étudié dans la cellule
Asso_p	Valeur de p	Nombre	Reporter la valeur exacte, pas « p<0.05 » Répliquer cette variable pour chaque facteur étudié dans la cellule
Asso_ajust	Ajustement de la mesure sur d'autres facteurs ?	-oui -non	Répliquer cette variable pour chaque facteur étudié dans la cellule
Conclusions			
Revue	Inclusion de l'étude dans la revue systématique des facteurs de risque de mortalité de moules	-oui -non	
Meta	Intérêt de l'étude pour une potentielle méta-analyse (i.e. analyse agrégée des données brutes de plusieurs études)	-oui -non	Une étude peut ne pas être intégrée dans la revue systématique car ses résultats ne concluent pas sur l'identification de facteurs de risque de mortalité mais elle peut être incluse dans la méta-analyse si elle comporte des données qui ont été recueillies mais non analysées sous l'angle de recherche de facteurs de risque. <i>Par exemple, de nombreuses études collectent des données sur les caractéristiques de l'eau de mer (température, salinité) qui ne sont utilisées que pour contextualiser l'étude, et pas croisées avec la survenue des mortalités de moules.</i>
Commentaires		Texte	Pour commenter les 2 variables précédentes (Revue et Meta)

Annexe 8 : Grille d'extraction des caractéristiques clés des études expérimentales

Une étude expérimentale est une étude de cohortes dans laquelle le facteur à évaluer (ou l'attribution de l'exposition) est fixé par l'expérimentateur.

Code couleur : **Surligné bleu** : variables permettant d'évaluer les possibilités d'une méta-analyse, i.e. si les données des études pourront être agrégées ou pas
Surligné gris : variables renseignées dans un second temps, i.e. si une méta-analyse est envisageable car plusieurs études ont étudié les mêmes facteurs

Nom de la variable	Description	Modalités	Commentaires ou définitions
Caractéristiques générales de l'étude			
ID_reference	Numéro d'identifiant de la référence	Nombre	Permet de faire le lien avec les auteurs, le journal, le résumé (dans une autre base de données)
ID_etude	Numéro d'identifiant de l'étude	Nombre	Une référence peut contenir plusieurs études
An_publi	Année de publication	Année	
Typ_publi	Type de publication	-article de journal international -article de journal national -acte de conférences -rapport d'étude ou de contrat -thèse -livre ou chapitre de livre	
Lang	Langue	-anglais -français -espagnol	
An_etud	Année de l'étude	Année	
Pays	Pays de l'étude	Pays	Quel niveau de précision pour la France : région ? secteur de production ? ex : France, Normandie, Baie des Veys
Population(s) étudiée(s)			
Pop_esp	Espèce de moule	- <i>Mytilus edulis</i> - <i>Mytilus galloprovincialis</i> - <i>Mytilus trossulus</i>	Choix multiple possible
Pop_age	Classe d'âge	Texte	Dans un premier temps, laisser libre car ce critère est peu standardisé, puis faire des catégories <i>a posteriori</i>
Pop_tail	Taille des animaux	Texte	Dans un premier temps, laisser libre car ce critère est peu standardisé, puis faire des catégories <i>a posteriori</i>
Pop_typ	Type de population	-élevage -gisement -écloserie	
Pop_unit	Unité épidémiologique	-individu -groupe	Permet d'avoir une idée si les données des études pourront être agrégées pour une méta-analyse ou pas
Pop_unit_taille	Si unité = groupe, préciser la taille du groupe (nombre d'individus)	Nombre	

Nb_group_exp	Nombre d'unités exposées au facteur étudié	Nombre	Si l'unité est le groupe, il s'agit de noter le nombre de groupes exposés.
Nb_group_tem	Nombre d'unités témoins (non exposées au facteur étudié)	Nombre	Si l'unité est le groupe, il s'agit de noter le nombre de groupes exposés.
Protocole			
Nb_replic	Nombre de répliques	Nombre	
Duree	Durée du suivi en jours	Nombre	
Acclim	Période d'acclimatation avant le début de l'expérimentation	-oui -non	Variable décrivant le contexte dans lequel les expérimentations ont été menées. Ne pas renseigner si l'acclimatation est le facteur étudié
Acclim_nb	Durée de l'acclimatation des moules (en jours)	Nombre	Variable décrivant le contexte dans lequel les expérimentations ont été menées.
Aera_eau	Aération de l'eau des aquariums expérimentaux	-oui -non -non précisé	Variable décrivant le contexte dans lequel les expérimentations ont été menées. Ne pas renseigner si la température de l'eau est le facteur étudié
Temp_eau	Température de l'eau (en °C)	Nombre	Variable décrivant le contexte dans lequel les expérimentations ont été menées. Ne pas renseigner si la température de l'eau est le facteur étudié
Sali_eau	Salinité de l'eau (en ppm)	Nombre	Variable décrivant le contexte dans lequel les expérimentations ont été menées. Ne pas renseigner si la température de l'eau est le facteur étudié
Temp_air	Température de l'air (en °C)	Nombre	Variable décrivant le contexte dans lequel les expérimentations ont été menées. Ne pas renseigner si la température de l'air est le facteur étudié
Hygro_air	Humidité de l'air (en %)	Nombre	Variable décrivant le contexte dans lequel les expérimentations ont été menées. Ne pas renseigner si l'hygrométrie est le facteur étudié
Nourri	Les moules sont-elles nourries pendant l'expérimentation ?	-oui -non -non précisé	Variable décrivant le contexte dans lequel les expérimentations ont été menées. Ne pas renseigner si l'apport ou la privation de nourriture est le facteur étudié
Sedim	Présence de sédiment dans les aquariums	-oui -non	Variable décrivant le contexte dans lequel les expérimentations ont été menées. Ne pas renseigner si la présence de sédiment est le facteur étudié
Volu	Volume des aquariums expérimentaux (en litres)	Nombre	Variable décrivant le contexte dans lequel les expérimentations ont été menées
Mortalité			
Mort_def	Définition d'une moule morte	- absence de fermeture des valves à une stimulation tactile, même si léger mouvement - valves ouvertes immobiles	Permet de préciser l'intégration ou non des moules moribondes, dont les valves bougent encore mais qui ne se referment pas complètement
Mort_freq	Fréquence de mesure de la mortalité dans chaque unité	Texte	Dans un premier temps, laisser libre car ce critère est peu standardisé, puis faire des catégories <i>a posteriori</i>
Facteur(s) étudié(s)			
Fact_nb	Nombre de facteurs étudiés	Nombre	Permet d'identifier les études multifactorielles



Fact_cat_general	Facteurs étudiés dans l'étude	-caractéristiques des moules -pratiques d'élevage/de culture/de pêche -caractéristiques de l'eau de mer -apports des milieux terrestres et aquatiques -caractéristiques du site étudié -conditions climatiques -organismes pathogènes	Choix multiple possible caractéristiques des moules : exemples : âge, taille, ploïdie, origine, statut physiologique, etc. pratiques d'élevage/de culture/de pêche : bouchots, filières, etc. caractéristiques de l'eau de mer : température, salinité, pH, turbidité, couleur, etc. apports des milieux terrestres et aquatiques : indicateurs de la qualité microbiologique de l'eau (<i>E. coli</i> ...), pesticides, métaux lourds, micropolluants organiques tels que les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HABs) ou produits médicamenteux, etc. caractéristiques du site étudié : vitesse des courants marins, nature du sol, etc. conditions climatiques : pluviométrie, indice NAO, etc. organismes pathogènes : <i>Vibrio splendidus</i> , <i>Marteilia refringens</i> , etc.
Fact_cat_specific	Facteurs étudiés dans l'étude : détail	<i>Ex : atrazine nanoparticules d'oxyde de zinc, ...</i>	Dans un premier temps, laisser libre car ce critère est peu standardisé, puis faire des catégories <i>a posteriori</i>
Voie_expo	Voie d'exposition	-injection -cohabitation -baignade -air	
Cond_nb	Nombre de conditions étudiées	Nombre	
Cond_detail	Description des conditions étudiées	Texte	<i>Ex : les différentes doses auxquelles les moules sont exposées, etc.</i>
Appo_matrice	Si apports des milieux terrestres et aquatiques étudiés, matrice utilisée pour la recherche	-eau de mer -animal -sédiment -autre, préciser	Choix multiple possible
Appo_method	Si apports des milieux terrestres et aquatiques étudiés, méthode de détection et quantification	Texte	Dans un premier temps, laisser libre car les méthodes possibles sont très nombreuses, faire des catégories <i>a posteriori</i> si cela s'avère nécessaire
Appo_detail	Si apports des milieux terrestres et aquatiques étudiés, détails de la méthode de détection	Copier-coller les détails	Permet d'avoir une idée si les données des études pourront être agrégées pour une méta-analyse ou pas
Op_matrice	Si organismes pathogènes étudiés, matrice utilisée pour la recherche	-eau de mer -animal entier -animal organes, préciser	Choix multiple possible

Op_method	Si organismes pathogènes étudiés, méthode de diagnostic/dépistage	-PCR -mise en culture et identification (bactéries) -histologie -autre, préciser	Choix multiple possible
Op_detail	Si organismes pathogènes étudiés, détails de la méthode de diagnostic/dépistage	Copier-coller les détails (milieu, temps d'incubation, température, amorces...)	Cela permettra de vérifier que les résultats sont comparables, si les méthodes le sont (car peu de méthodes de référence) Permet d'avoir une idée si les données des études pourront être agrégées pour une méta-analyse ou pas
Mesure d'association entre la mortalité et le facteur étudié			
Asso_type	Type de la mesure d'association	-concentration entraînant 50% de mortalité/CL50 -temps d'exposition à l'air entraînant 50% de mortalité/TL50 -comparaison des moyennes ou des % finales/finaux de survie/mortalité -comparaison des cinétiques de survie/mortalité	Choix multiple possible Type de la mesure d'association entre le facteur étudié et la mortalité
Asso_mesu	Valeur de la mesure d'association	Nombre	Répliquer cette variable pour chaque facteur étudié dans la cellule
Asso_p	Valeur de p	Nombre	Reporter la valeur exacte, pas « p<0.05 » Répliquer cette variable pour chaque facteur étudié dans la cellule
Effet_dose	Effet dose observé ?	-oui -non	L'observation d'un effet-dose augmente la confiance dans les résultats de l'étude
Conclusions			
Conclu	Résultats principaux de l'étude	Texte	Résumé des résultats de l'étude
Revue	Inclusion de l'étude dans la revue systématique des facteurs de risque de mortalité de moules	-oui -non	
Meta	Intérêt de l'étude pour une potentielle méta-analyse (i.e. analyse agrégée des données brutes de plusieurs études)	-oui -non	Une étude peut ne pas être intégrée dans la revue systématique car ses résultats ne concluent pas sur l'identification de facteurs de risque de mortalité mais elle peut être incluse dans la méta-analyse si elle comporte des données qui ont été recueillies mais non analysées sous l'angle de recherche de facteurs de risque. <i>Par exemple, de nombreuses études collectent des données sur les caractéristiques de l'eau de mer (température, salinité) qui ne sont utilisées que pour contextualiser l'étude, et pas croisées avec la survenue des mortalités de moules.</i>
Commentaires		Texte	Pour commenter les 2 variables précédentes (Revue et Meta)

Annexe 9 : Valeurs de références utilisées pour évaluer la pertinence environnementale des études expérimentales sur les polluants

Tableau 21. Comparaison des concentrations d'exposition aux substances chimiques utilisées dans les études expérimentales aux PNEC

Substances	Compartiment Eau marine		Compartiment Sédiments		Compartiment Moules			Conclusions quant à la transposition au contexte français
	PNEC chronique ¹³²	Concentrations utilisées dans les études (référence de l'étude)	PNEC sédiments (Qsed) ¹³² en mg/kg (poids sec)	Concentrations utilisées dans les études (référence de l'étude)	Valeurs usuelles du RNO (200-2004) – Manche-Atlantique en mg/kg médiane [min-max]	Valeurs usuelles du RNO (200-2004) – Méditerranée en mg/kg médiane [min-max]	Concentrations mesurées dans les études (référence de l'étude)	
Al ¹³³	-		-		-	-		
As	0,00137 mg/L		-	7,14-16,1 mg/kg (maj942)	-	-		maj942: non
Cd	0,00021 mg/L	1,7 mg/L (1406) 2 ppm (3960) = 2 mg/L	2,3	0,12-0,29 mg/kg (maj942)	0,60 [0,17-3,03]	0,72 [0,20-10,0]		1406 : non 3960 : non maj942 : oui
Cr	-		-	20,3-33,2 mg/kg (maj942)	1,17 [0,32-9,21]	0,83 [0,12-3,77]		
Cu	0,0008 mg/L	0,35 mg/L (1406) 1,18 à 1,67 mg/L (7013)	0,8	18-42,1 mg/kg (maj942)	6,7 [4,0-23]	6,8 [3,8-67]		1406, 7013 : non maj942 : oui
Fe	-	>6 mg/L (1406)		15,2-35,8 mg/kg (maj942)	-	-		
Hg	10 ⁻⁵ mg/L	0,25 mg/L (maj1185)			0,12 [0,03-0,56]	0,12 [0,04-0,68]		Maj1185 : non

¹³² Source : Portail Substances Chimiques de l'INERIS (<https://substances.ineris.fr/fr/>)

¹³³ Il n'existe pas de données d'écotoxicité chronique disponibles sur les organismes marins.

Ni	8,6 µg/L (NQE eau)			14-34,7 mg/kg (maj942)	1,55 [0,45-6,00]	1,48 [0,47-8,41]		
Pb	1,3 µg/L (NQE eau)	4,5 mg/L (1406) 39-59 mg/L (7013)	53,4	22,3-62,6 mg/kg (maj942)	1,4 [0,4-9,6]	1,8 [0,1-27,7]		1406 et 7013 : non Maj942 : oui
V	0,02 mg/L (NOEC/CE10 invertébré marin)				1,62 [0,49-5,29]	1,4 [0,43-15,4]		
Zn	0,0078 mg/L	18-38 mg/L (7013) 2 ppm (3960) = 2 mg/L	37	49-156 mg/kg (maj942)	85 [36-409]	152 [43-357]		7013 : non Maj942 : oui 3960 : non
Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAPs) Exemple du fluoranthène	0,00012 mg/L (fluoranthène)	<305 ng/L (1154) = 0,00305 mg/L	0,129 (fluoranthène)	213-695 µg/kg (1154) = 0,213 à 0,695 mg/kg	21,4 [4,0-245]	13,2 [2,19-243]		1154 : non
Polychlorobiphényles (PCBs) Exemple du congénère CB153 en µg/kg	-		-		19,4 [0,16-495]	18,7 [1,57-596]		
Atrazine	0,0006 mg/L	6,33 ppm (4768_1) = 6,33 mg/kg 1 ppm (4768_2) = 1 mg/kg	0,00112		-	-		4768_1 : non 4768_2 : non
Cyperméthrine	0,0041 µg/L (NOEC/CE10 invertébré marin)	< 800 µg/L (5222)	-		-	-		5222 : non
Carbamazépine ¹	-	6 µg/L (maj1757)	-		-	-		Maj1757 : oui (d'après les auteurs)
Phtalates								
Alkylphénols								
Pyrithione de zinc (ZnPT, biocide antifouling)	-	2,65 µg/mL (4490_1) 0,48 µg/mL (4490_2)	-		-	-		4490_1 : non (d'après les auteurs) 4490_2 : non (d'après les auteurs)

		100-1000 µg/L (maj63) = 0,1- 1 µg/mL						Maj63 : non (par comparaison avec 4490_2)
Nanoparticules d'oxyde de zinc ¹ (ZnO)	-	0,78-2,62 mg/L (maj989) 2 mg/L (7289)	-		-	-		maj989 : pas conclusif 7289 : non (d'après les auteurs)
2,4,6-trinitrotoluène (TNT, composé explosif)	-		-		-	-		
Hexahydro-1,3,5,- triazine (RDX, composé explosif)	-		-		-			
Octahydro-1,3,5,7- tetranitro-1,3,5,7- tetrazocine (HMX, composé explosif) ¹	-		-		-	-		
Liquides ioniques d'imidazolium (1- butyl-3- méthylimidazolium tetrafluoroborate + 1- méthyl-3- octylimidazolium tetrafluoroborate)	-		-		-	-		



Annexe 10 : Bilan de la recherche bibliographique

Nombre de références publiées dans les bases de données, identifiées pour toutes les espèces de coquillages ciblées :

Base de données	03/05/2017	05/04/2018	13/11/2018
Archimer	2240	126	45
Aquatic Sciences and Fisheries Abstracts - CAB Abstracts - environmental sciences pollution management (Proquest)	6300	934	105
Google Scholar	640	0	0
HAL	132	23	9
Horizon IRD	0	0	0
Pascal et Francis	1869	0	0
Pubmed	2853	346	283
Scopus ¹³⁴	5067	732	538
Web of Science	6019	866	616
TOTAL	25120	3027	1596
Après dédoublonnage	11421	1948	770
Références concernant les moules	3242	208	217

¹³⁴ Inclut Pubmed/MEDLINE et les bases de données éditeurs ex : Science Direct, Wiley Online, SpringerLink...

Annexe 11 : Bilan de la vérification collective de la sélection des références

La sélection des références a été vérifiée collectivement par le CST selon une méthode en deux étapes, avant la première mise à jour de la recherche en avril 2018.

• Première étape :

Pour ce premier niveau de vérification, 17 membres du CST ont été sollicités. Trente ou 31 références ont été attribuées par membre du CST, pour un total de 518 références vérifiées, soit 16% de la base de données relative aux moules. L'échantillon vérifié n'était pas représentatif de la base de données initiale. En effet, il comportait toutes les références incluses par la Coordinatrice (N = 141) ainsi que des documents exclus pour diverses raisons (N = 377). Par conséquent, environ 8 documents inclus et 22 documents exclus ont été envoyés pour vérification à chacun des membres du CST.

Sur 17 membres du CST sollicités, 13 réponses ont été reçues, correspondant à la vérification de 366 références. Le **tableau 22** présente la répartition initiale des documents par les membres du CST et par la Coordinatrice, en fonction de leur statut.

Tableau 22. Répartition initiale des documents inclus ou exclus à l'examen des titre et résumé

CST	Coordinatrice			Total
	Exclus	Inclus	A clarifier	
Exclus	216	30	0	246
Inclus	26	60	0	89
A clarifier	20	14	0	34
Total	262	104	0	366

Le pourcentage de concordance global de la sélection était de 75,4%, le pourcentage de discordance global était de 15,3%. L'accord entre l'ensemble des membres du CST et la Coordinatrice était modéré (coefficient Kappa = 0,46, IC95% [0,39-0,55]).

La Coordinatrice a relu les documents discordants afin de réviser leur statut (N = 56). Parmi ces 56 documents, 19 documents ont changé de statut : 14 inclus sont devenus exclus et 5 exclus sont devenus inclus. Sur les 37 documents restants, 7 exclus et 8 inclus ont changé de statut en « à clarifier ». Après cette seconde relecture par la Coordinatrice, 29 documents avaient toujours un statut discordant. Ces documents ont finalement été inclus pour être évalués à l'étape de sélection ultérieure, selon une approche conservatrice.

Par ailleurs, les documents identifiés comme « à clarifier » par le CST (N = 34) ont été relus par la Coordinatrice à la lumière des commentaires laissés par le CST, et reclassés le cas échéant. Un document classé inclus par la Coordinatrice est devenu exclus, 17 exclus sont restés exclus, enfin 3 inclus et 3 exclus sont devenus « à clarifier ».

À l'issue de cette relecture par la Coordinatrice, les documents toujours identifiés comme « à clarifier » par le CST ou par la Coordinatrice ou par les deux (N = 43) ont été finalement inclus pour être évalués à l'étape de sélection ultérieure, selon une approche conservatrice.

Le **tableau 23** présente la répartition conservatrice des documents après une seconde lecture par la Coordinatrice.

Tableau 23. Répartition des documents inclus et exclus à l'examen des titre et résumé, version conservative (« à clarifier » assimilé à « inclus »)

CST	Coordinatrice		Total
	Exclus	Inclus	
Exclus	229	17	246
Inclus	35	85	120
Total	262	104	366

Au final, la première étape relative à l'examen des titres et résumés a permis de vérifier 11% des documents identifiés (366/3 242). Le pourcentage de concordance global de la sélection était de 85,8%, le pourcentage de discordance global était de 14,2%. L'accord entre le CST et la coordinatrice était fort (coefficient Kappa = 0,66, IC95% [0,58-0,75]).

• Seconde étape

Pour ce second niveau de vérification, 17 membres du CST ont été sollicités. Deux textes intégraux ont été attribués à chaque membre du CST, pour un total de 34 documents vérifiés, soit 28% des 119 documents sélectionnés à l'examen des titres et résumés. L'échantillon vérifié n'était pas représentatif de la base de données initiale. En effet, l'intégralité des documents complets inclus par la Coordinatrice à cette étape ont été vérifiés par le CST. Des documents exclus par la Coordinatrice ont complété l'échantillon.

Lors de cette seconde étape, l'extraction des caractéristiques clés des études a été vérifiée par le CST. Chaque membre a étudié deux documents complets, choisis en fonction de ses compétences, pour vérifier les informations extraites du texte intégral et reportées dans la grille d'extraction des caractéristiques clés des études par la Coordinatrice scientifique. Cette vérification n'a pas été réalisée en double aveugle afin d'optimiser le temps nécessaire, i.e. les membres du CST n'ont pas extrait les informations dans la grille mais vérifié les informations déjà extraites.

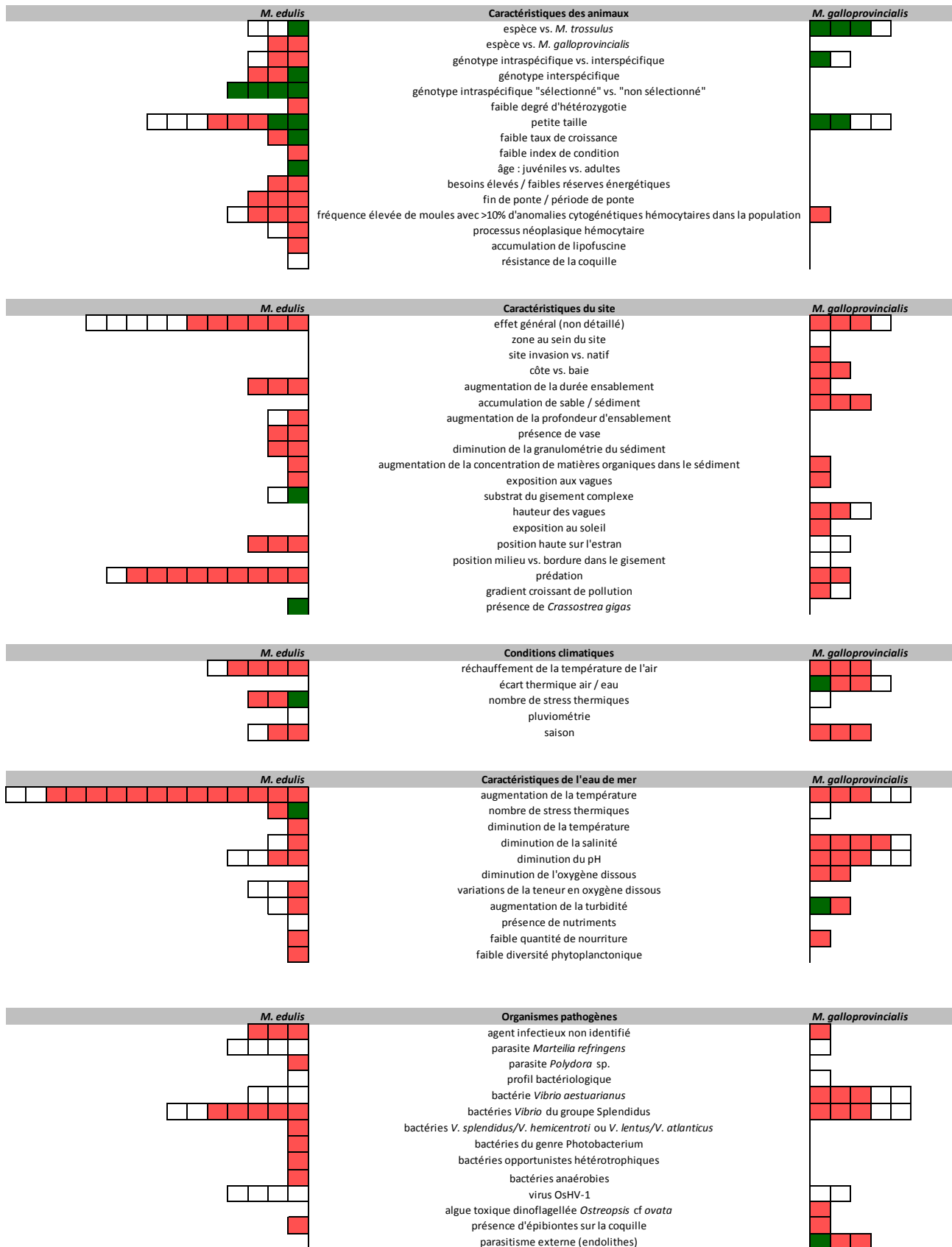
Sur 17 membres du CST sollicités, 11 réponses ont été reçues, correspondant à la vérification de 27 références. Le **tableau 24** présente la répartition des documents par les membres du CST et par la Coordinatrice, en fonction de leur statut.

Tableau 24. Répartition des documents inclus et exclus à l'examen du texte intégral

CST	Coordinatrice		Total
	Exclus	Inclus	
Exclus	15	0	15
Inclus	1	11	12
Total	16	11	27

Au final, la seconde étape relative à l'examen du texte intégral a permis de vérifier 23% des documents sélectionnés à l'examen des titres et résumés (27/119). L'accord entre le CST et la coordinatrice était presque parfait (coefficient Kappa = 0,92, IC95% [0,78-1]).

Annexe 12 : Représentation graphique de l'effet des facteurs étudiés sur le risque de mortalité des moules, par thématique



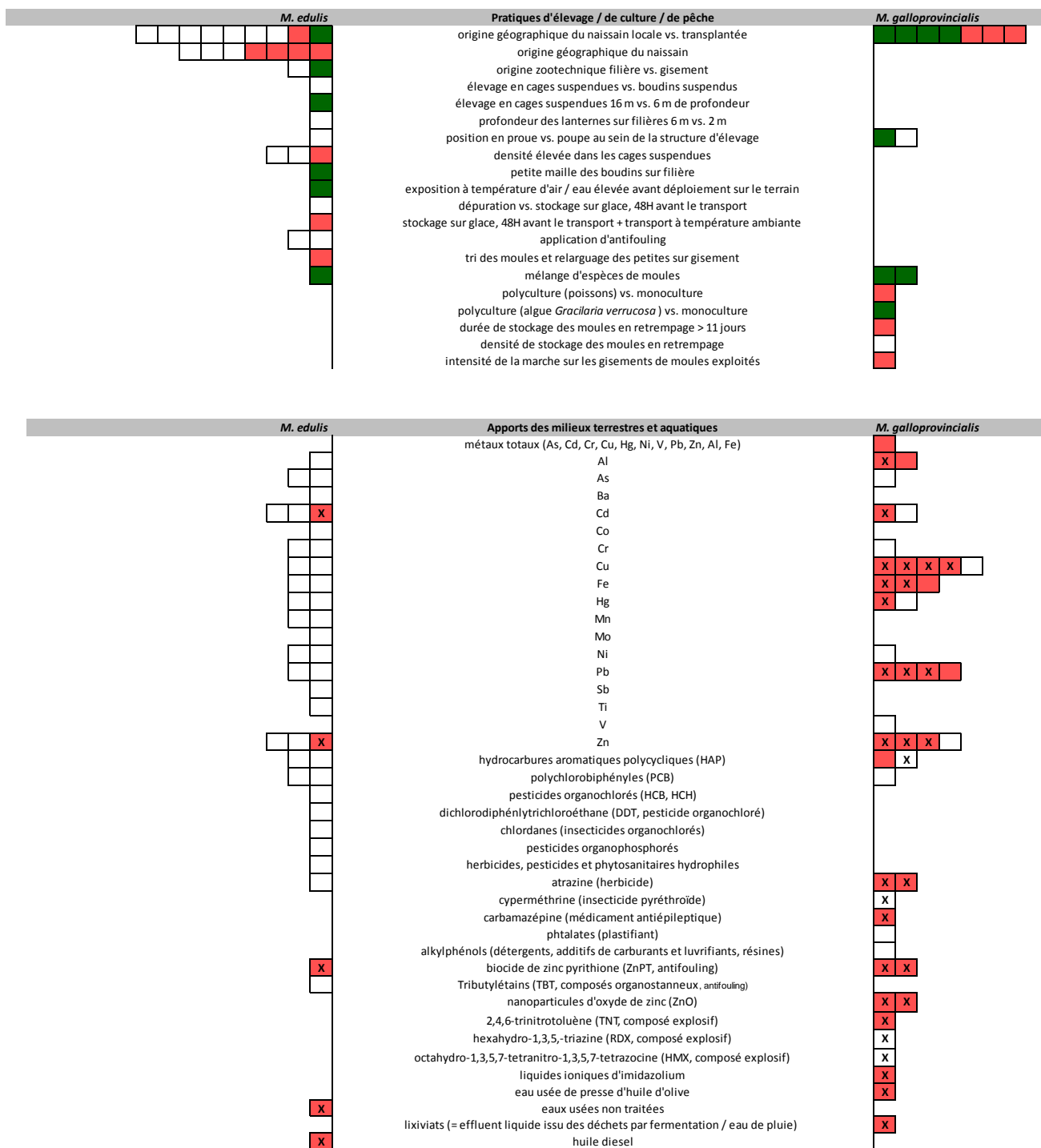


Figure 10. Effet des facteurs étudiés sur le risque de mortalité des moules, par grande thématique de facteurs

(Un carré représente une étude, ainsi le nombre de carrés représente le nombre d'études s'étant intéressées à un facteur donné ;

pour chaque carré/étude : la couleur rouge indique une augmentation du risque de mortalité associé à la présence du facteur étudié ; la couleur verte indique une diminution du risque de mortalité associé à la présence du facteur étudié ; la couleur blanche représente une absence d'effet du facteur étudié sur le risque de mortalité ;

pour la thématique des *Apports des milieux terrestres et aquatiques* : les études en conditions expérimentales sont indiquées par une croix, les études d'observation sur le terrain sont identifiées par les carrés vides)

Annexe 13 : Liste des outils développés pour la réalisation de la revue systématique de la littérature

Outil n°1 : Critères d'inclusion et d'exclusion

Outil n°2 : Equations de recherche

Outil n°3 : Grille d'inventaire

Outil n°4 : Base de données

Outil n°5 : Jeu de trois questions

Outil n°6 : Tableau des motifs d'exclusion

Outil n°7 : Grille d'extraction des caractéristiques clés des études sélectionnées

Outil n°8 : Critères d'évaluation de la pertinence méthodologique des études pour identifier un facteur de risque et des possibilités de leur transposition au contexte français