



Variations climatiques et probabilité de développement des *Vibrio* dans la Méditerranée nord-occidentale

Avril – Juin 2011

Vincent Nouchi

Responsable : **Karine Béranger**
Enseignant-Chercheur
UME, ENSTA-ParisTech

Collaborateur : **Guillaume Constantin De Magny**
Chercheur IRD
UMR Maladies Infectieuses et Vecteurs, Ecologie, Génétique, Evolution et Contrôle
(MIVEGEC)
IRD Montpellier

Remerciements

Les simulations mises à disposition ont été réalisées dans le cadre des projets suivants :

- le projet SiMED en partenariat renforcé avec Mercator Ocean
- le projet MORCE-MED financé par le GIS
- la thèse de J. Beuvier financée par Météo-France

Nous remercions l’I.D.R.I.S. pour les heures allouées à la réalisation des simulations (projet 010227). Nous remercions également la mise à disposition du modèle de Louis et al. (2003) sur la probabilité de développement du *Vibrio* par G. Constantin de Magny.

Enfin, nous remercions David Antoine pour nous avoir fourni le lien vers le site internet regroupant les données GlobColour.

D’un point de vue personnel, je tiens tout d’abord à remercier Julien pour son soutien et sa disponibilité tel un grand frère depuis le début du semestre, et tout au long du stage. Je remercie également Cindy pour sa gentillesse et ses conseils, et Bahjat pour sa bonne humeur et son sourire. Un merci particulier à Romain pour la justesse de ses réponses face à mes questions, et pour son amitié. Köszönöm à Mélodie pour ses éclaircies, et de manière plus générale, je remercie chaleureusement tous les membres du laboratoire pour leur accueil, leurs enseignements, et bien sûr, tous ces bons moments. Je remercie notamment Olivier pour avoir mis à notre disposition la power ball grâce à laquelle j’ai pu martyriser mon poignet durant mon dernier mois de stage. Merci à Benjamin pour la volée qu’il a su m’infliger alors que je pensais naïvement renouer avec les plaisirs du tennis. Merci à François pour m’avoir appris la signification du terme ‘bobo parisien’ (finalement, ce sont des gens très biens). Un merci pour Yonatan et ses, désormais cultes, techniques de drague. Je remercie aussi Simon, pour m’avoir permis de résoudre *l’énigme* après une mini semaine (bon c’est vrai, une grosse semaine et demi) d’errance entre enfer et paradis, puis Michele pour m’avoir ridiculisé en trouvant la solution après dix minutes de réflexion. Merci à Romain M. pour avoir partagé avec moi deux des trois c lors des rares pauses que je me suis accordées, alors que le soleil de Palaiseau m’avait abandonné. Merci également à tous les membres de l’équipe des carottes, Alex, Zied, Romain, Bilhal, Lahcene, Nico, Bahjat, Cyril, Laurent, David et Magali pour ce mélange de fraternité et de sueur qui nous a mené en petite finale sur les terrains de l’X. . . .

Je remercie Guillaume Constantin de Magny pour son incroyable disponibilité malgré la distance qui nous sépare, et pour la justesse de ses conseils.

Enfin, un dernier merci et pas le moindre, à Karine Béranger, grâce à qui j’ai énormément appris durant ce stage. . . merci Karine pour ton soutien, ta gentillesse, et ton humour.

Table des matières

Remerciements	ii
1 Présentation	1
2 Etat de l'art	3
2.1 Le <i>Vibrio</i>	3
2.1.1 Application à la Méditerranée	4
2.1.2 Projet ClimVib	5
2.2 La circulation en Méditerranée nord-occidentale	5
2.2.1 Circulation grande échelle	5
2.2.2 Circulation méso-échelle en Méditerranée occidentale	7
2.2.3 Circulation sur le plateau du Golfe du Lion	8
3 Les outils et la méthodologie	11
3.1 Les modèles de circulation générale	11
3.1.1 Modèle océanique (MED12 et MED36)	11
3.1.2 Forçages atmosphériques	12
3.1.3 Résumé des simulations	13
3.2 Modèle prédictif de l'émergence de <i>V.cholerae</i>	13
3.3 Les données de Chlorophylle a - HERMES	14
3.4 Stratégie d'analyse	14
3.4.1 Choix des paramètres étudiés	14
3.4.2 Zone d'analyse	15
3.4.3 Outils utilisés : IDL, Matlab, Fortran	16
4 Résultats	18
4.1 La période 1989 – 2008	18
4.1.1 Evolution saisonnière et inter-annuelle des sss et sst	18
4.1.2 Probabilité de <i>V.cholerae</i>	22
4.1.3 Chlorophylle a	23
4.2 Critique et robustesse des résultats	25
4.2.1 Impact du forçage atmosphérique	25

4.2.2	Impact de la résolution du modèle océanique	27
4.2.3	Résumé	28
5	Conclusion	29
	Références	31
	Annexes	37
	Evolution de la sss et sst en Mer Adriatique	37

Chapitre 1

Présentation

L'UME est l'une des six Unités d'Enseignement et de Recherche de l'ENSTA-ParisTech ; elle est constituée de trois équipes : DFA ¹, MS ², et FGO ³, et concerne six domaines d'expertise :

- les couplages thermomécanique et multiphysique ;
- la fatigue et la durabilité des matériaux et des structures ;
- la vibroacoustique et les vibrations non linéaire de structures ;
- les écoulements séparés et la turbulence ;
- les fluides géophysiques tournants et stratifiés ;
- l'observation océanique et la modélisation de la circulation en Méditerranée.

La recherche dans ces domaines s'appuie sur une synergie entre phase d'expérimentation (ex. table tournante⁴), de modélisation théorique et numérique.

L'équipe FGO (Fluides Géophysiques et Océanographie), au sein de laquelle s'est déroulé mon stage, est constituée de deux Enseignants-Chercheurs (Karine Béranger, Laurent Mortier), et d'un chercheur CNRS à 50% : (Alexandre Stegner), de Doctorants (Romain Pennel, Julien Palmieri, Jonathan Beuvier), de Post-Doctorants (Cindy Lebeau-pin Brossier, Bahjat Alhammoud), d'un Ingénieur d'études (Thierry Pichon), ainsi qu'un Technicien de laboratoire (Nicolas Baudet). Les thématiques de recherche de l'équipe portent sur l'étude de la méso et de la subméso échelle dans les fluides géophysiques, particulièrement dans les environnements océaniques à l'échelle des bassins régionaux et de leurs marges continentales. Les objectifs généraux sont la compréhension des mécanismes dynamiques (instabilités, upwelling, convection, interactions ondes-écoulements et topographie-écoulement, génération et trajectoire des structures cohérentes) qui influencent la circulation océanique à ces échelles. L'enjeu principal, s'inscrit dans le contexte du

1. Dynamique des Fluides et Acoustique.
2. Matériaux et Structures.
3. Fluides Géophysiques et Océanographie.
4. Simulation de l'instabilité des courants côtiers.

Voir <http://www.ensta.fr/~pennel/insta.php>

changement climatique à l'échelle régionale. Afin de quantifier et de prévoir les variations du climat, les travaux de recherche réalisés dans l'équipe FGO permettent d'améliorer nos connaissances actuelles de la circulation générale des bassins océaniques, en particulier de la Méditerranée ; sa modélisation permet de mieux quantifier et prévoir ses modifications dans le cadre du changement climatique.

Chapitre 2

Etat de l'art

La problématique soulevée dans ce stage concerne : *les risques associés aux variations environnementales sur le développement des Vibrio pathogènes dans le bassin méditerranéen*. Elle se situe à la frontière entre deux disciplines : la Microbiologie et l'Océanographie. Afin d'établir des notions de base dans ces deux domaines, ce chapitre présente l'état de l'art des connaissances concernant l'écologie du *Vibrio*, et en particulier l'espèce *Vibrio cholerae*, puis celui concernant la circulation océanique en Méditerranée occidentale.

2.1 Le *Vibrio*

Le genre *Vibrio* est une bactérie émergente¹ responsable de graves maladies infectieuses chez l'homme.

V. cholerae, est l'agent pathogène du choléra². Sa forme non cholérique (non 01/non 0139) est responsable de sévères gastroentérites, tout comme l'espèce *Vibrio parahæmolyticus*, suite à la consommation de fruits de mer crus ou peu cuits³. *Vibrio vulnificus* est quant à lui responsable de graves infections cutanées après contact de blessures avec l'eau de mer, dont 50% des cas conduisent à des septicémies mortelles.

Plusieurs études (Colwell et Spira 1992 ; Huq et Colwell 1996 ; Borroto 1998) ont montrées que ces pathogènes humains sont des espèces autochtones de la flore microbienne des environnements marins côtiers, et en particulier des zones de mélange eau douce - eau salée, des estuaires, ainsi que des zones humides. Ils sont présents en abondance en période estivale (Heidelberg et al. 2002).

Essentiellement trois facteurs environnementaux ont été mis en évidence présentant une corrélation significative avec le développement saisonnier de ces bactéries : la température des eaux de surface, la salinité, ainsi que pour certains auteurs, les blooms de

1. Les cas de maladies infectieuses engendrées par les *Vibrios* ont considérablement augmenté ces trentes dernières années à travers le monde ; la propagation de ces maladies menace de s'accroître dans le futur.

2. Maladie infectieuse diarrhéique à caractère le plus souvent épidémique, se manifeste par une violente diarrhée, accompagnée de vomissements et d'une sérieuse déshydratation (jusqu'à 15 Litres d'eau/jour).

3. *Vibrio* est commensal des organismes marins, c'est-à-dire qu'il vit au dépend de ces organismes, mais qu'il ne leurs cause pas de dommage.

phyto et zoo-planctons (Singleton et al. 1982; Lipp et al. 2002) :

1. Il existe un seuil de température $T = 19^{\circ}\text{C}$ en dessous duquel la multiplication des populations de pathogènes est significativement limitée (Louis et al. 2003) ;
2. L'optimum de salinité S pour le développement des *Vibrio* est compris entre 0 et 14 *psu* (Jiang 2001 ; Louis et al. 2003) ;
3. L'utilisation de différents types de cultures (cultures sur gels, méthodes moléculaires) a permis de mettre en évidence un second stade de développement des bactéries. Lorsque l'on essaye de détecter la présence de *Vibrio* en hiver, quand les conditions de T,S ne sont pas favorables, les méthodes de cultures sur gels ne permettent pas de révéler la présence des pathogènes, alors que les méthodes moléculaires permettent de les détecter. En se basant sur ces résultats, certains auteurs ont pu démontrer l'existence d'un état viable mais non cultivable des bactéries lorsque les conditions ne sont pas favorables (Borroto 1998 ; Bryan et al. 1999). Au contraire, lorsque les conditions sont favorables, les bactéries s'attachent aux planctons pour y trouver les minéraux et ressources nutritives nécessaires à leur cycle de vie (Kaneko et Colwell 1975 ; Pfeffer et al. 2003). Durant les changements saisonniers, les blooms de certaines espèces planctoniques contribuent ainsi à la multiplication de ces pathogènes, et constituent un réservoir important durant les périodes inter-épidémiques.

La recrudescence des cas de maladies liées aux espèces de *Vibrio* ces dernières décennies dans le monde a conduit à la mise en place d'importants projets visant à disposer de modèles prédictifs de l'émergence de ces pathogènes notamment aux Etats-Unis : baie de Chesapeake, Golfe du Mexique, Puget Sound. Des modèles prédictifs de dynamique de *Vibrio cholerae* ont également été proposés dans le Golfe du Bengale (Pascual et al. 2002, Constantin De Magny et al. 2008), où *V.cholerae* est endémique. De tels projets vont se réaliser sur la zone d'Amérique du Sud. L'Europe, quant à elle, n'a pour l'instant pas lancé de programme visant à développer de tels modèles ; cependant des discussions sont actuellement en cours à ce sujet ...

2.1.1 Application à la Méditerranée

Afin de sensibiliser les pays européens au risque *Vibrio*, de récentes études ont été menées afin de détecter la présence de ces micro-organismes sur les côtes européennes (Hervio-Heath et al. 2002 ; Vezulli et al. 2009) : en Méditerranée et sur la côte Atlantique. Dans le cadre de mon stage nous avons concentré nos efforts sur le bassin méditerranéen, en se basant sur d'autres études réalisées à travers le monde. A partir d'une synthèse bibliographique, l'objectif de notre étude était d'alimenter le ou les modèles empiriques de prédiction de présence de *Vibrio* avec les conditions environnementales observées en Méditerranée et d'analyser les sorties des modèles en situations environnementales extrêmes en termes de température et de salinité principalement.

2.1.2 Projet ClimVib

Le projet ClimVib : **Climat et dynamique des *Vibrio* pathogènes humains dans les systèmes marins côtiers français**, est coordonné par Sylvie Joussaume, directrice de l'Institut National des Sciences de l'Univers (INSU - CNRS). Il a été soumis au Groupement d'Intérêt Scientifique (GIS) Climat-Environnement-Société, afin de préparer un projet interdisciplinaire de plus grande ampleur pour analyser l'impact du changement climatique sur la présence des bactéries *Vibrio* et les risques associés de maladies infectieuses en Méditerranée et sur la côte atlantique.

Les travaux préliminaires de ce projet consistent dans un premier temps à évaluer quelles sont les zones à risques concernant l'apparition et le développement des bactéries sur les côtes européennes, à travers une collaboration entre différents laboratoires. En particulier, à l'IRD de Montpellier *Guillaume Constantin De Magny*, a développé un système empirique de prédiction de la probabilité de présence de *V. cholerae* pour la Baie de Chesapeake aux Etats-Unis.

2.2 La circulation en Méditerranée nord-occidentale

Dans la partie 2.1, nous avons vu que les *Vibrio* se développent dans les environnements marins côtiers en conditions océaniques favorables. Afin de présenter les mécanismes principaux gouvernant ces conditions, la circulation en Méditerranée, et plus particulièrement la circulation de surface dans sa partie occidentale (Millot 1999 ; Millot et Taupier-Letage 2005) est présentée dans cette section.

2.2.1 Circulation grande échelle

La mer Méditerranée est une mer semi-fermée, communiquant avec l'océan Atlantique par le détroit de Gibraltar. A l'échelle du bassin, le mouvement des masses d'eau est essentiellement forcé par l'effet de Coriolis, qui dévie sur la droite (dans l'hémisphère nord) tout mouvement ayant une échelle relativement importante dans le temps et l'espace. Toutes les eaux forcées à circuler à l'échelle du bassin tendent à suivre, dans le sens anti-horaire, les isobares correspondant à leur propre niveau. Ainsi, les masses d'eaux en Méditerranée circulent principalement dans le sens anti-horaire le long des pentes continentales qui bordent le bassin. De plus, les forçages principaux agissant sur la circulation présentent en général des variations dans l'espace, ne permettant aucun branchement permanent des eaux au centre du bassin. La figure 2.1 présente un schéma de cette circulation générale, et permet d'introduire le processus de convection hivernale conduisant à la formation des masses d'eau méditerranéennes.

Les eaux atlantiques (AW, Atlantic Water) entrent en surface dans la Méditerranée (figure 2.1) pour compenser l'eau évaporée ($\sim 0.7 \text{ m/an}$) pendant que des eaux plus lourdes sortent de la Méditerranée au fond du détroit de Gibraltar (MOW, Mediterranean

Overflow Water formée de WMDW et LIW).

Masses d'eaux en Méditerranée nord-occidentale

Cinq masses d'eaux sont présentes en Méditerranée nord-occidentale :

AW Atlantic Water.

WIW Winter Intermediate Water — elles se forment au début de l'hiver, sont froides, peu salées et situées entre les AW et les LIW.

LIW Levantine Intermediate Water — elles sont formées en Méditerranée orientale et s'écoulent vers l'ouest à une profondeur intermédiaire, passent le canal de Sicile puis le canal de Sardaigne avant de longer la Sardaigne et d'arriver dans la zone du Golfe du Lion de formation de WMDW (figure 2.1).

WMDW Western Mediterranean Deep Water — elles se forment en hiver, par convection hivernale qui peut atteindre le fond de la mer dans le Golfe du Lion.

TDW Tyrrhenian Deep Water, formées par mélange des WMDW et des LIW dans la Mer Tyrrhénienne, sortent dans le bassin algérien sous les LIW.

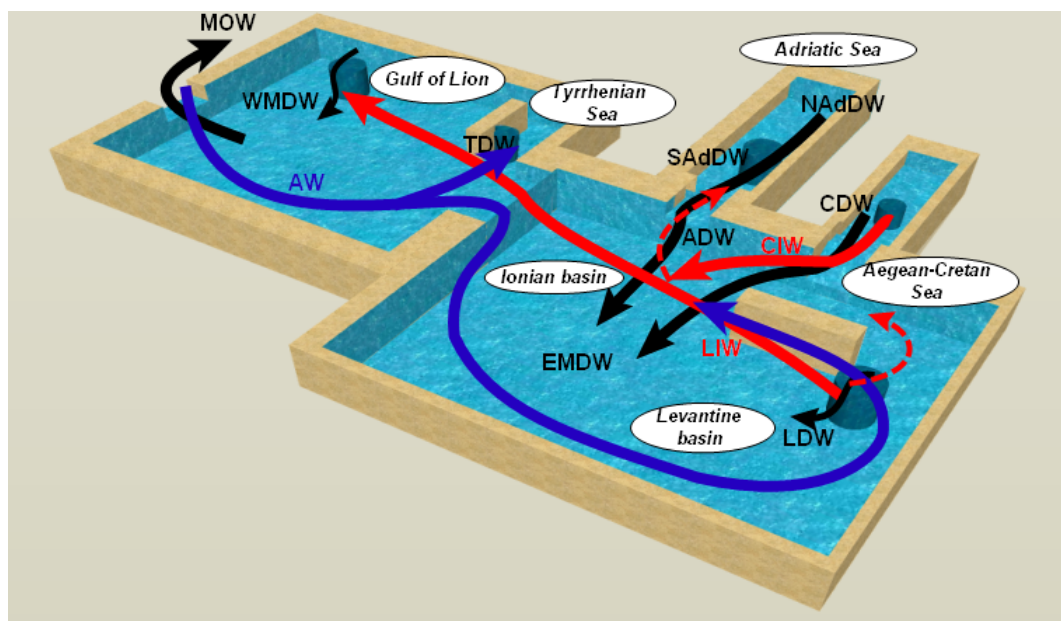


FIGURE 2.1 – Schéma de la circulation générale en Méditerranée (Béranger et al. 2010)

2.2.2 Circulation méso-échelle en Méditerranée occidentale

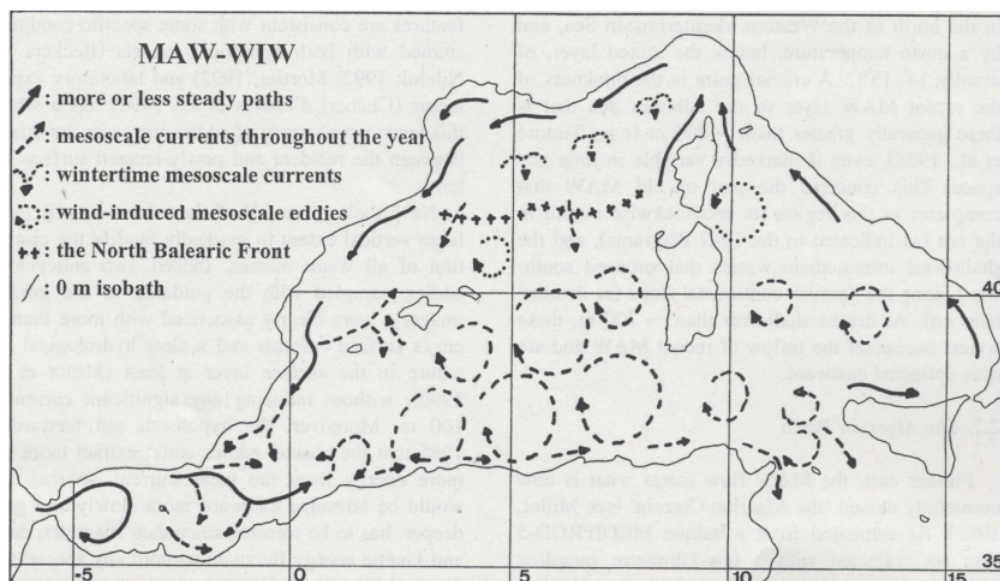


FIGURE 2.2 – Circulation de l'AW (Atlantic Water) et de la WIW (Winter Intermediate Water), (Millot, 1999).

La circulation en Méditerranée occidentale est donc cyclonique à l'échelle du bassin. Cependant à mésoéchelle d'importants tourbillons anticycloniques, notamment dans le bassin algérien (entre les îles Baléares et le canal de Sardaigne), induisent une importante variabilité de la circulation des masses d'eaux, comme le présente la figure 2.2 ci-dessus.

Les courants principaux sont structurés comme des veines instables, qui méandrent, plutôt que comme de larges courants continus. Ils suivent généralement la côte, ou plutôt le talus continental. On pense actuellement que ces structures méso-échelles observées, par exemple dans le bassin algérien, résultent principalement de l'instabilité des courants côtiers; et qu'elles pourraient avoir une grande importance sur la circulation de toutes les masses d'eaux de la Méditerranée occidentale. Des recherches à ce sujet sont en cours à l'ENSTA. Romain Pennel, doctorant, y étudie le rôle du talus sur les instabilités des courants côtiers.

En passant le détroit de Gibraltar, l'eau atlantique (AW) entre en Mer d'Alboran, et décrit un gyre anticyclonique quasi permanent à l'ouest. Puis une partie de ces eaux poussées par de forts vents d'Ouest est déviée en direction des côtes algériennes alimentant le courant appelé le jet Almeria-Oran. L'AW forme une couche de 100 à 200 mètres d'épaisseur, et est caractérisée par une salinité croissante, due à l'évaporation, au mélange turbulent et à la diffusion (de 36.5 *psu* à Gibraltar jusqu'à 38.6 *psu* au nord de la Méditerranée occidentale). Sa température moyenne, sous la couche de mélange, est égale à 14–15 °C en règle générale, mais variable dans le temps et l'espace.

Plus à l'est, le flux d'AW forme le Courant Algérien (Algerian Current), relativement étroit (30 – 50 km), d'une épaisseur variant de 200 à 400 mètres vers $0^{\circ}E$. Le caractère instable de ce courant mène à la formation de méandres de quelques dizaines de kilomètres de longueur d'onde, puis à la formation de tourbillons côtiers de 50 à 100 km de diamètre qui participent au mélange des eaux méditerranéennes. La majeure partie du Courant Algérien continue sa "route" vers l'Est en direction du canal de Sardaigne. On peut noter ici la présence de tourbillons dans la partie centrale du bassin ("open sea eddies"), qui en interagissant avec le Courant Algérien déplace une partie de ces eaux vers les îles Baléares. Au niveau du canal de Sardaigne, le Courant Algérien entre en grande partie en Mer Tyrrhénienne où l'eau circule également de manière cyclonique. une partie passe le Déroit de Corse et rejoint par une branche secondaire le Courant Ouest-Corse pour former le Courant Liguro-Provençal. Ce dernier s'écoule le long de la pente continentale au moins jusqu'au canal d'Ibiza, et une partie réfléchit au nord.

En hiver, l'eau de surface dans le Golfe du Lion est déplacée vers le sud par les vents de Nord-Ouest, ce qui entraîne le front Nord des Baléares le long des îles du même nom. Ce déplacement limite la propagation des récentes AW vers le Nord. Une partie du Courant Liguro-Provençal continue vers le Sud au travers du canal d'Ibiza avec de moins en moins d'énergie et de plus en plus de variabilité méso échelle.

2.2.3 Circulation sur le plateau du Golfe du Lion

La zone du Golfe d'Aigues-Mortes est située au nord du Golfe du Lion (fig 2.3, cercle vert) qui est un plateau continental semi-circulaire, sur lequel d'intenses forçages s'exercent :

1. Tout d'abord, les vents sont forts dans cette région à cause de l'orographie particulière. Comme le montre la figure 2.3, il existe deux vents dominants :

Le Mistral un vent de Nord accéléré et canalisé par la vallée du Rhône

La Tramontane vent de Nord-Ouest influencé par les Pyrénées, conduit quant à lui par le passage de Naurouze

Ils ont des effets différents sur la circulation du golfe tout au long de l'année, comme par exemple la formation de structures tourbillonnaires variables (Estournel et al. 2003 ; Lebeaupin Brossier et al. 2011b).

2. Le Courant Liguro-Provençal (figure 2.3), représentant la branche nord de la circulation cyclonique du bassin méditerranéen occidental. Ce courant s'étend sur quelques centaines de mètres de profondeur, et est composé principalement d'AW.
3. L'eau douce, apporté par le Rhône, dont les plumes s'étendent sur une centaine de km de diamètre ; réduisant ainsi la densité et la salinité des eaux proches de la côte.

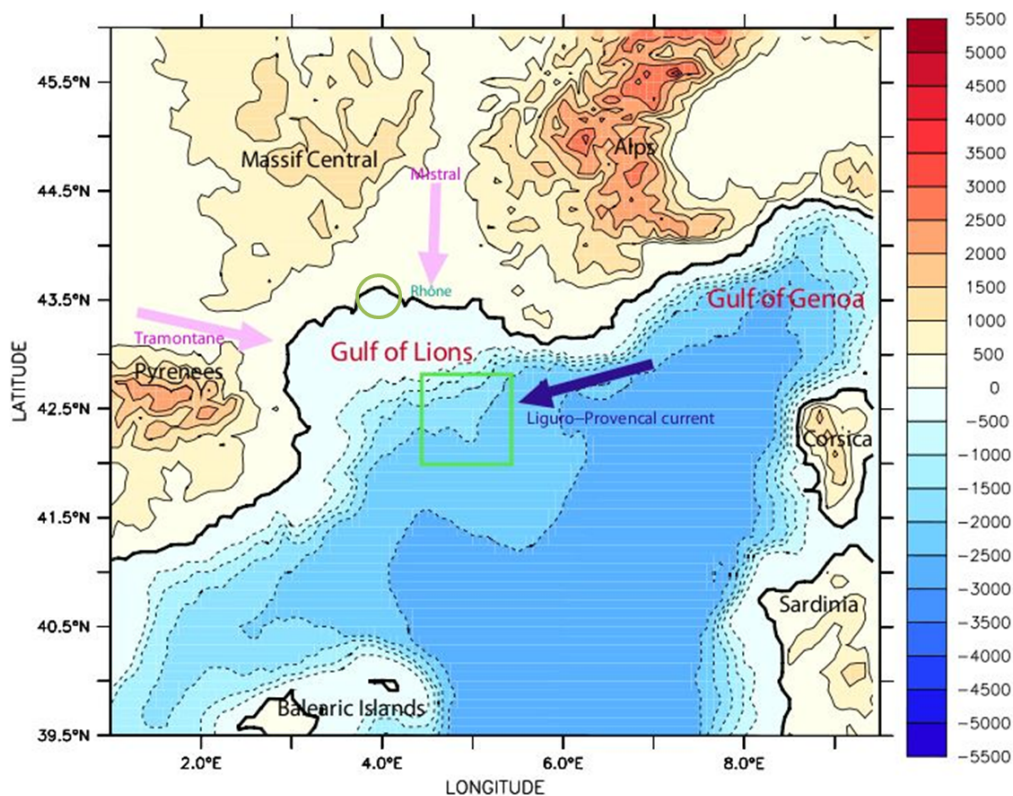


FIGURE 2.3 – Partie Nord-Ouest du bassin méditerranéen illustré par la topographie en mètres (contours tous les 500m). Le carré vert correspond au centre du Golfe du Lion. Le cercle vert entoure le Golfe d'Aigues-Mortes. Les vents dominants sont indiqués par les flèches roses. Le courant principal à la frontière sud du golfe est indiqué par la flèche bleu foncé (Lebeau-pin Brossier et al. 2011).

L'effet de ces trois forçages conduit à une importante variabilité saisonnière sur le plateau affectant également la zone du Golfe d'Aigues-Mortes, que nous résumerons dans cette étude à deux effets principaux :

Hiver

La circulation cyclonique est intensifiée en hiver dans la partie nord du bassin, et ainsi des eaux sont piégées dans le gyre du Golfe du Lion. Ces eaux sont ensuite refroidies par les vents (60 % de pertes par chaleur latente). Ainsi, les eaux de surface sont plus denses que les eaux sous-jacentes et la convection hivernale commence. En bordure du plateau ($42.5^{\circ}N - 3^{\circ}E$), les eaux subissent un effet de cascade dû à la pente abrupte (figure 2.3) et à la présence de canyons (Canals et al. 2006). Plus éloigné de la côte, vers $42^{\circ}N$ et $5^{\circ}E$, la convection profonde et l'étalement des eaux participent également à la formation d'eaux denses profondes (Millot 1999).

Été

Par compensation et pompage d'Ekman, les forts vents de Nord-Ouest advectent l'eau chaude de surface ($\sim 20^{\circ}C$) vers le large, et l'eau plus froide de fond remonte à la surface le long du plateau continental (Milot 1999 ; Lebeau-pin Brossier et al. 2011b). Ce phénomène d'upwelling durant l'été permet un brassage de la matière organique vers la surface, et est souvent associé aux efflorescences alguales.

Chapitre 3

Les outils et la méthodologie

Nous allons maintenant présenter la stratégie et la méthodologie utilisée afin de répondre à la problématique présentée au chapitre 2. Dans une première partie, je décris les simulations à disposition qui ont été utilisées. Puis j'explique le modèle empirique permettant de déterminer une probabilité de présence de *V. cholerae*. Enfin, j'expose la stratégie d'analyse des données et ma contribution personnelle.

3.1 Les modèles de circulation générale

3.1.1 Modèle océanique (MED12 et MED36)

Le modèle numérique NEMO¹ est utilisé dans deux configurations régionales MED12 et MED36. La grille MED12 (MED36) est issue de la grille standard ORCA de NEMO, dont la résolution horizontale est de $1/12^\circ$ ($1/36^\circ$) s'étalant en latitude. Pour MED12, cela est équivalent à une résolution de 6 km à 46°N et 8 km à 30°N (Lebeaupin Brossier et al. 2011) alors que pour MED36 la résolution est d'environ 2km. La bathymétrie provient du dernier produit compilé au LEGOS (F. Lyard, pers. com.). Les conditions initiales sont des champs 3D de température potentielle T et salinité S, l'océan étant au repos. Les échanges avec l'océan Atlantique sont gérés par une zone de relaxation à une climatologie de T,S. Les conditions aux limites en surface consistent en un forçage atmosphérique composé du flux net de chaleur (flux solaire, infrarouge, sensible et latent), du flux d'eau douce corrigé (pour éviter toute dérive) égal au bilan d'eau douce (Évaporation - Précipitations - débit des fleuves et Ruissellement), et, du vent. Pour les fleuves, une climatologie mensuelle basée sur des observations est utilisée pour toutes les simulations (Beuvier et al. 2010). La résolution du modèle MED12 permet de reproduire les multiples langues froides d'upwelling dans le Golfe du Lion, ainsi que des petits tourbillons anticycloniques sur le plateau de l'ordre de 40 km (soit de taille égale à 8 mailles de la grille dans cette zone) (Lebeaupin Brossier et al. 2011b). Cependant, les structures dont le rayon de déformation est inférieur à 10 km

1. NEMO (Nucleus for European Modelling of the Ocean, Madec 2008) est un des très bons modèles pour la simulation générale de la circulation océanique. Il est constitué de trois compartiments principaux : dynamique océanique, modèle de glace, modèles de biogéochimie marine.

ne peuvent être représentées dans MED12 voire même dans MED36. Dans ces conditions, le panache du Rhône par exemple ne sera pas le plus réaliste possible.

3.1.2 Forçages atmosphériques

Le modèle MED12 a été forcé par trois forçages atmosphériques différents : ARPERA, WRF et ECMWF. Le modèle MED36 a été forcé par ECMWF.

- Forçage ARPERA : issu de la descente en échelle dynamique (*dynamical downscaling*) des sorties des modèles du centre européen de prévisions météorologiques à moyens termes (ECMWF) par le modèle ARPEGE-Climat (résolution de 50 km sur la zone Europe-Méditerranée). Pour la période 1949-2001, les sorties ECMWF sont les réanalyses ERA40 (100km de résolution) et pour la période 2002-2008 les sorties ECMWF sont les analyses (dégradées à la résolution d'ERA40). Donc la période couverte est 1949-2008. La figure 3.1 représente la grille du modèle ARPEGE-Climat qui est la version recherche du modèle ARPEGE de prévisions météorologiques.
- Forçage WRF (Weather Research Forecasting) : issu de la descente en échelle dynamique des sorties de la réanalyse ERA-Interim du ECMWF par le modèle non-hydrostatique WRF (résolution de 20km sur la zone Europe-Méditerranée) pour la période 1989-2008. Ce modèle numérique méso-échelle est également utilisé pour la prévision numérique de la météo.
- Forçage ECMWF : sorties du modèle de prévision météorologique semi-spectral du ECMWF pour la période 1998-2008 sur le globe. Les paramétrisations de ce modèle ne sont pas constantes dans le temps, de même que la grille qui a évolué d'une résolution de 50 km en 1998 à 20 km en 2006.

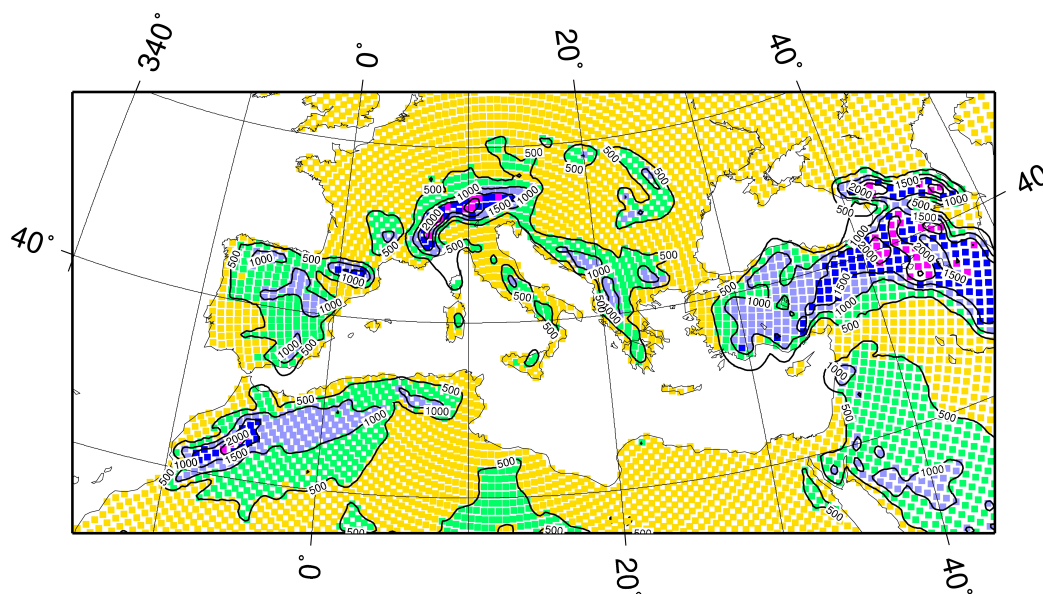


FIGURE 3.1 – Grille horizontale et relief d'ARPERA (Herrmann & Somot 2008)

3.1.3 Résumé des simulations

TABLE 3.1 – Résumé des simulations

Simulations	Période	C.I.	Atmosphère
MED12-WRF	1989-2008	MODB4 climatologie	WRF 20km
MED12-ARPERA	1949-2008	MEDATLAS-1949 climatologie	ARPERA 50km
MED12-ECMWF	1998-2008	MEDATLAS-1998 climatologie	ECMWF 50-20km
MED36-ECMWF	08/2003-10/2007	MED12-ECMWF août 2003	ECMWF 50-20km

3.2 Modèle prédictif de l'émergence de *V.cholerae*

Afin d'évaluer la probabilité d'émergence de *V.cholerae*, notée P , nous avons appliqué aux données de température et de salinité, issues des modèles océaniques, un modèle prédictif d'émergence basé sur le modèle 5 (tableau 7) de Louis et al. (2003) :

$$\log V = a + b_1 \times T + b_2 \times T \times S + b_3 \times S$$

$$P = 1 / (1 + \exp(-\log V))$$

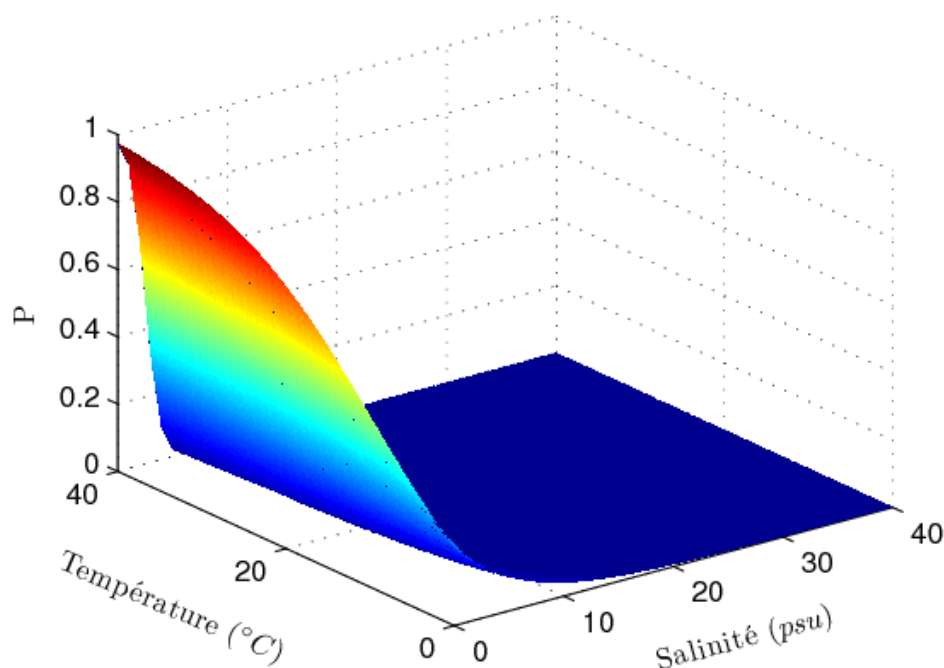


FIGURE 3.2 – Représentation 3D de la probabilité empirique P issu du modèle 5 tiré de l'article de Louis et al. (2003).

Où T correspond à la température de surface, S à la salinité de surface, a est la constante de régression, b_1 , b_2 , et b_3 des coefficients empiriques. La figure 3.2 représente les conditions optimales de température et salinité obtenues pour le développement des bactéries, suivant le modèle de Louis et al. (2003). Les différents coefficients de ce modèle ont été déterminés à partir des mesures réalisées en utilisant la méthode de détection de Fluorescence Directe par Anticorps 01 (Direct Fluorescent antibody 01, DFA 01) pour *V. cholerae* dans la Baie de Chesapeake. On peut ici noter que lorsque la salinité de l'eau dépasse 15 psu, ou que la température de l'eau en surface est inférieure à 10°C , la probabilité d'émergence de *V.cholerae* est quasiment nulle. Nous verrons dans la partie 4.1.1 les conditions correspondantes dans des zones particulières de la Méditerranée.

3.3 Les données de Chlorophylle a - HERMES

Pour notre étude, nous avons extrait les valeurs de la concentration en chlorophylle a du site internet <http://hermes.acri.fr>. Ce site regroupe les données du projet GlobColour de l'ESA. Ce projet dispose de trois satellites qui fournissent des informations relatives à la couleur des océans recouvrant le globe : SeaWiFS (NASA), MODIS (NASA), MERIS (ESA). Les données correspondent aux valeurs journalières relevées depuis l'année 1997, pour lesquelles la résolution horizontale peut atteindre au minimum 4.6 km, mais dépendant fortement de la couverture nuageuse.

3.4 Stratégie d'analyse

Afin de répondre à la problématique soulevée par notre étude, nous avons établi la stratégie suivante :

- Recherche de zones à risque (fleuves, zones de hautes températures et basses salinités) ;
- Comparaison aux données fournies par les études précédentes menées en Asie, aux États-Unis, et en Afrique ;
- Extraction des données océaniques (sst, sss) fournies par les simulations (tableau 3.1) ;
- Application du modèle prédictif sur l'émergence des bactéries ;
- Analyse de la variabilité interannuelle (événements extrêmes) ;
- Extraction des données de chlorophylle a d'après le site HERMES ;

3.4.1 Choix des paramètres étudiés

Comme on l'a vu dans la partie 2.1, ce sont la température des eaux en surface, la salinité de ces eaux, ainsi que la présence de phyto et zooplanctons qui constituent les

variables environnementales les plus significatives pour expliquer la dynamique des populations bactériennes. D'après l'étude menée par *Vezulli et al.* (2009), 53% de la variance concernant la population de *Vibrio* est expliquée par la température, et la salinité ; c'est pourquoi nous nous sommes, dans un premier temps, focalisé sur ces deux paramètres. Nous avons également recherché les valeurs de concentration en chlorophylle a, afin d'évaluer la concentration en phytoplancton dans la partie nord-occidentale de la Méditerranée.

3.4.2 Zone d'analyse

La figure 3.3 présente les différentes zones étudiées. Ces zones ont été sélectionnées en tenant compte des capacités des différents modèles océaniques utilisés qui ne peuvent résoudre les zones littorales (marécages, estuaires) où la salinité doit être faible. De plus le modèle probabiliste utilisé (présenté à la section 3.2) ne donne des probabilités $P \neq 0$ qu'aux embouchures des fleuves, c'est à dire là où la sss est faible.

Golfe d'Aigues-Mortes (GAM)

Nous avons vu dans la partie 2.2.3 que le GAM était soumis à d'importants forçages environnementaux très variables inter et intra-annuellement. En effet, la répartition des plumes du Rhône sur le plateau varie en fonction du forçage atmosphérique, conduisant à une variabilité de la salinité sur le golfe. Les apports brutaux d'eau douce, et d'éléments particuliers minéraux et organiques lors d'évènements extrêmes (forte précipitation, orages, crues) en font donc une zone potentiellement à risques concernant les modifications de la dynamique des populations bactériennes de *Vibrio* suite à des variations brusques de salinité. Le GAM est indiqué en 1 dans la figure 3.3 (a).

Rhône

Afin de contourner les limites des modèles océaniques à notre disposition qui ne permettent pas une bonne représentation des processus d'étalement des eaux du Rhône sur le plateau, nous avons choisi d'élargir notre analyse des conditions océaniques en étudiant le point de la grille situé à l'embouchure du Rhône (point 2 figure 3.3).

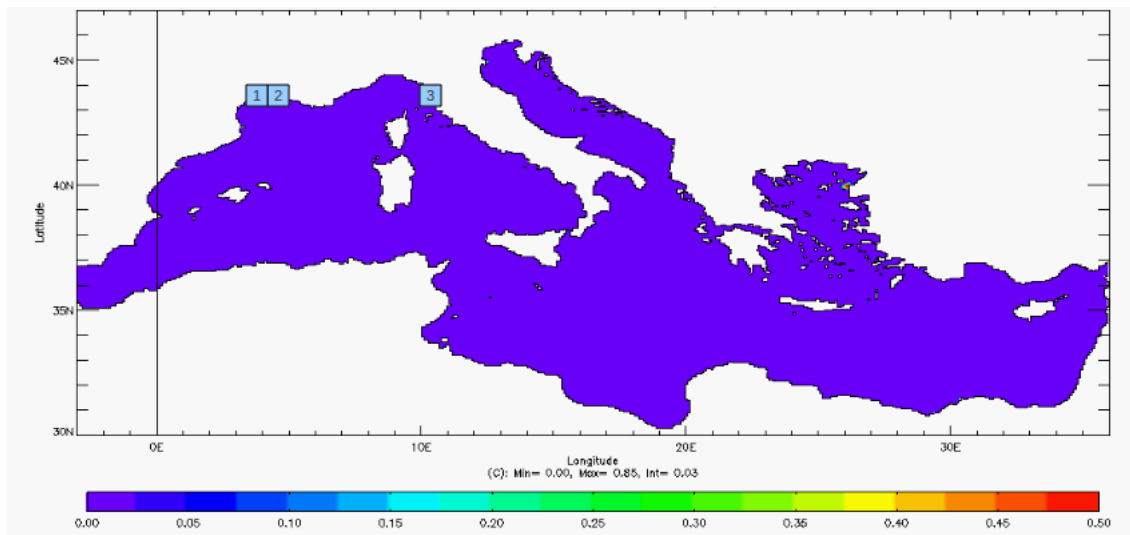
Golfe de La Spezia (GLS)

Une étude précédente menée au niveau du GLS en Mer Ligure (*Vezulli et al.* 2009), dans laquelle des mesures de la biologie ont été réalisées, nous a motivé pour analyser les conditions océaniques également en ce point (point 3 figure 3.3).

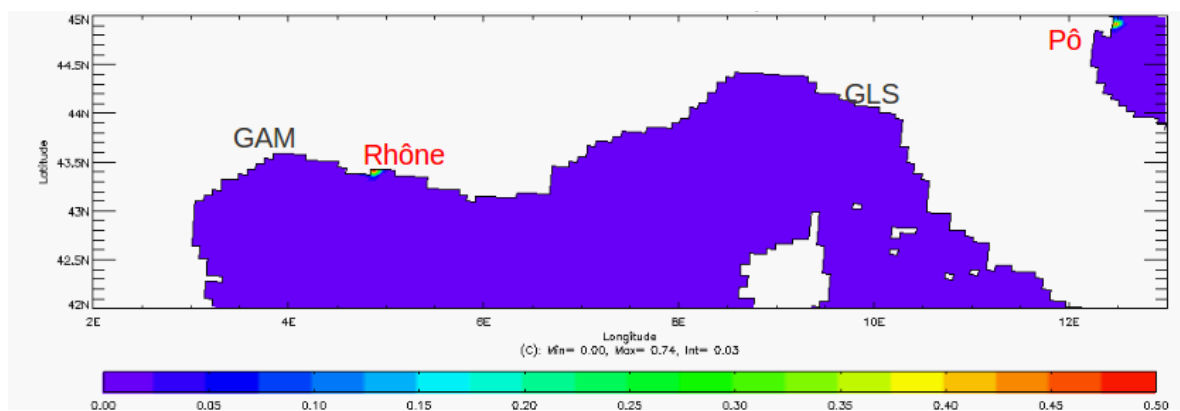
3.4.3 Outils utilisés : IDL, Matlab, Fortran

Pour chacun des trois points j'ai extrait, à partir des sorties des simulations océaniques, la température (sst) et la salinité (sss) de surface de la mer, journalières, pour une période de vingt ans, depuis l'année 1989. Pour le point Golfe d'Aigues-Mortes, j'ai réalisé les moyennes de sst et sss sur une boîte englobant le golfe, mais les conditions se sont révélées quasi similaires au seul point GAM de la grille et ne figurent pas dans le rapport. Les données de chlorophylle a ont été moyennées sur deux boîtes qui correspondent au Golfe du Lion, et au GLS.

Les sorties des modèles océaniques et les données du site internet HERMES, sont regroupées en fichier *netcdf*; IDL, Matlab, et FORTRAN ont donc été utilisés afin d'extraire les données relatives à la circulation. Ces outils informatiques m'ont également permis de construire les cartes présentées dans ce rapport. Le modèle prédictif de *V.cholerae* a été appliqué en utilisant Matlab, pour lequel le format des données a été modifié en *.mat* pour permettre leur manipulation. Ce logiciel a également permis la réalisation des séries temporelles du chapitre 4.



(a)



(b)

FIGURE 3.3 – Probabilité d'émergence de *V. cholerae* pour l'année 2003, d'après le modèle 5 de Louis, et calculé grâce aux conditions sst et sss du modèle MED12-WRF fournis par Cindy Lebeaupin-Brossier.

(a) Zones d'analyse : 1. Golfe d'Aigues-Mortes (GAM) ; 2. Embouchure du Rhône (Rhône) ; 3. Golfe de La Spezia (GLS).

(b) Zoom sur la partie nord-occidentale de la Méditerranée ; les fleuves sont écrits en rouge.

Chapitre 4

Résultats

Dans un premier temps, des séries temporelles concernant les conditions océaniques sur les différentes zones d'étude ont été réalisées en se basant sur les données du modèle MED12-WRF. Ces données permettent l'analyse de la variabilité inter-annuelle en ces zones. Dans un second temps, à ces séries ont été appliqué le modèle prédictif de l'émergence de *V.cholerae* afin de mettre en lumière les évènements présentant un risque potentiel d'apparition du pathogène. Ce modèle a également été soumis à l'ensemble de la Méditerranée (figure 3.3) pour identifier des zones "types" favorables pour *V.cholerae*. Ensuite, des séries temporelles ont également été réalisées sur deux années particulières (2003 et 2005) pour le point Rhône (voir partie 3.4.2 pour choix du point), en utilisant les quatre simulations du tableau 3.1, afin d'identifier les différences entre les modèles ainsi que leurs limites. Enfin, des cartes de circulation en surface ont été analysées afin d'étudier l'impact de la circulation de plateau sur les variations de sss et sst dans la zone GAM.

4.1 La période 1989 – 2008

4.1.1 Evolution saisonnière et inter-annuelle des sss et sst

La figure 4.1 représente les séries temporelles de température et salinité issues du modèle MED12-WRF correspondant aux points GAM, Rhône, et GLS respectivement.

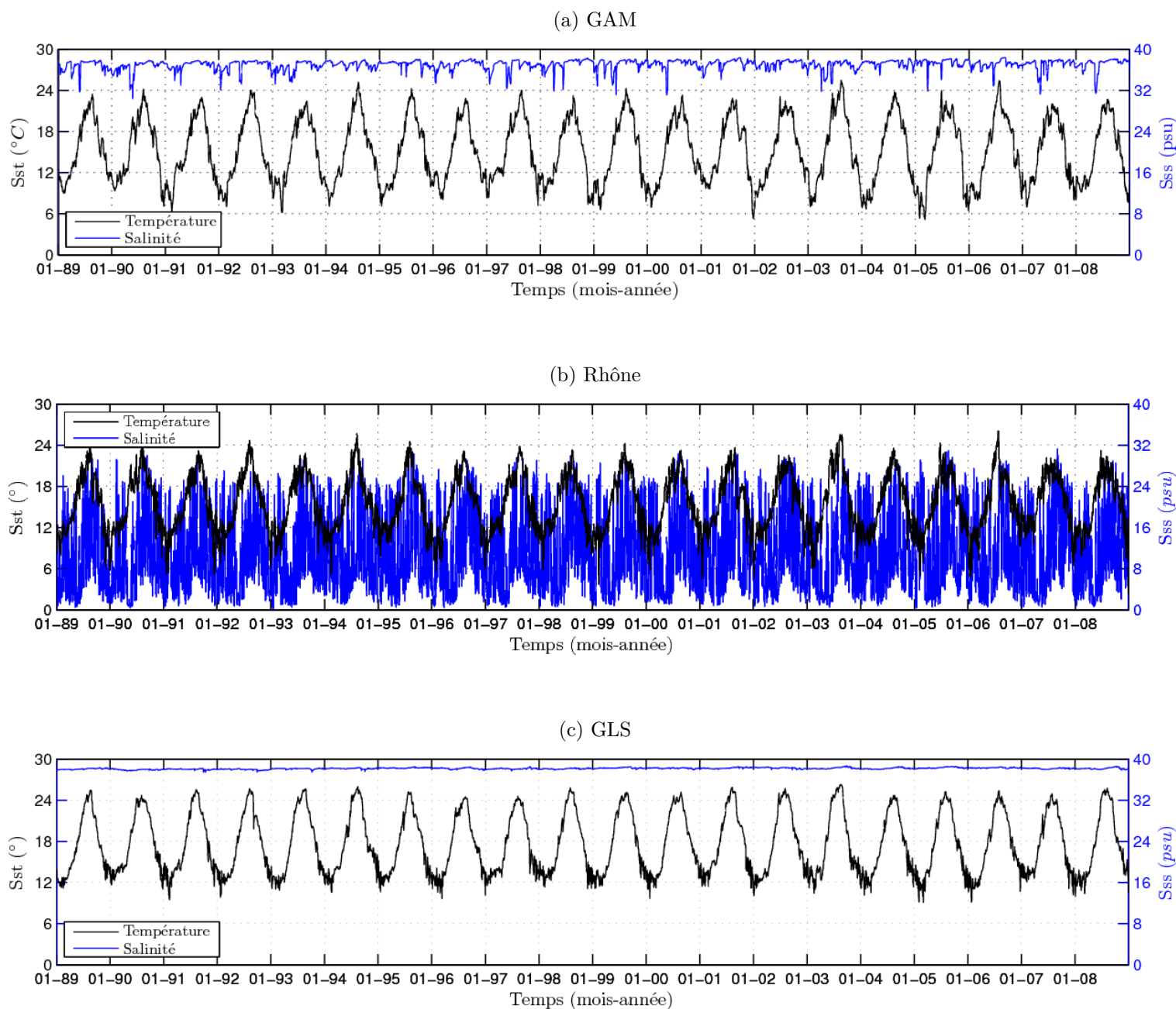


FIGURE 4.1 – Sss et sst journalières pour la période 1989 - 2008, d’après la simulation MED12-WRF. (a) point GAM, (b) point Rhône, (c) point GLS.

Evolution de la sst

D’après la simulation MED12-WRF on observe un cycle saisonnier très marqué en température avec un maximum en été et un minimum en hiver sur la période 1989 – 2008 (figure 4.1). Les valeurs maximum de l’été peuvent atteindre $25.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ dans le GAM, $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ au point Rhône et $26.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ dans le GLS — en hiver elles peuvent atteindre $5.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, $2.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, et $9\text{ }^{\circ}\text{C}$ respectivement (Table 4.1). Si l’on regarde les sst moyennes sur les trois zones d’études, en hiver, au printemps, et en été, on constate que les faibles valeurs de l’hiver (< 13

$^{\circ}C$) sont très éloignées du seuil de température optimum nécessaire au développement des bactéries ($19^{\circ}C$, Louis et al. 2003). Les conditions au printemps semblent plus favorables, les valeurs de sst moyennes s’approchent en effet du seuil de température ($15^{\circ}C$, GAM) ($15.3^{\circ}C$, Rhône) ($16.8^{\circ}C$, GLS), avec des écarts types de 4.7, 3.7, et 4.4 respectivement. En été, les conditions se situent toujours au dessus de $20.5^{\circ}C$, avec le minimum au point Rhône, et jusqu’à $23.7^{\circ}C$ de moyenne au GLS, où l’on observe les températures les plus élevées tout au long de l’année.

Température de surface – sst ($^{\circ}C$)						
	Simu.	Min.	Max.	Moy. hiver	Moy. printemps	Moy. été
GAM	WRF	5.2	25.5	9.7	15	21
	Période	03/2005	08/2006	21 déc. → 19 mars	20 mars → 20 juin	21 juin → 23 sept.
	ARPERA	6.6	25.8	11	15.7	20.5
	Période	02/2005	08/2003	21 déc. → 19 mars	20 mars → 20 juin	21 juin → 23 sept.
Rhône	WRF	2.3	26	10.8	15.3	20.5
	Période	12/2008	07/2006	21 déc. → 19 mars	20 mars → 20 juin	21 juin → 23 sept.
	ARPERA	5.1	25.2	11.4	15.6	19.5
	Période	01/2005	08/2003	21 déc. → 19 mars	20 mars → 20 juin	21 juin → 23 sept.
GLS	WRF	9	26.3	12.7	16.8	23.7
	Période	03/2005	08/2003	21 déc. → 19 mars	20 mars → 20 juin	21 juin → 23 sept.
	ARPERA	10.1	27.4	13	17.8	23.9
	Période	02/1991	08/2003	21 déc. → 19 mars	20 mars → 20 juin	21 juin → 23 sept.

TABLE 4.1 – Caractéristiques des séries temporelles de température issues des modèles MED12-WRF et MED12-ARPERA, pour la période 1989 – 2008.

Dans la table 4.1, sont également indiqués les résultats de la simulation MED12-ARPERA. Les températures varient de $\pm 1^{\circ}C$ en moyenne, avec MED12-WRF qui est légèrement plus froide en hiver, et au printemps. Les données d’automne ne sont pas présentées ici car les conditions durant cette période fournissent des $P \approx 0$ (Tab. 4.3).

Evolution de la sss

Toujours d’après MED12-WRF, on note un cycle saisonnier à l’embouchure du Rhône avec un maximum de débit à la fin du printemps (figure 4.1 (b)). Aucun cycle saisonnier n’est visible pour les deux autres zones d’étude.

		Salinité de surface – sss (<i>psu</i>)					
		Simu.	Min.	Max.	Moy. hiver	Moy. printemps	Moy. été
GAM	WRF		30.4	38.4	36.7	36.5	37.6
	Période		05/1990	08/2006	21 déc. → 19 mars	20 mars → 20 juin	21 juin → 23 sept.
	ARPERA		27.5	38.1	36.4	36.5	37.5
	Période		05/2000	09/2007	21 déc. → 19 mars	20 mars → 20 juin	21 juin → 23 sept.
Rhône	WRF		0.3	31.3	10.1	7.3	14.5
	Période		01/1993	09/2007	21 déc. → 19 mars	20 mars → 20 juin	21 juin → 23 sept.
	ARPERA		0.2	29.2	7.9	6.2	13
	Période		01/1993	08/1989	21 déc. → 19 mars	20 mars → 20 juin	21 juin → 23 sept.
GLS	WRF		37.4	38.7	38.2	38.1	37.7
	Période		10/1991	09/2003	21 déc. → 19 mars	20 mars → 20 juin	21 juin → 23 sept.
	ARPERA		36.4	38.3	37.8	37.7	37.7
	Période		07/2002	07/2006	21 déc. → 19 mars	20 mars → 20 juin	21 juin → 23 sept.

TABLE 4.2 – Caractéristiques des séries temporelles de salinité issues des modèles MED12-WRF et MED12-ARPERA, pour la période 1989 – 2008.

Les gammes de valeurs (Tab. 4.2) pour la sss dans les simulations ne sont pas favorables dans les zones GAM (sss > 30.4 *psu*) et GLS (sss > 37.4 *psu*), de plus ces valeurs sont très peu variables au point GAM ($s^1 = 1.03$) et quasi constantes au niveau du GLS ($s = 0.15$). Les conditions de sss en ces zones ne remplissent donc pas les conditions nécessaires au développement de *V. cholerae* selon le modèle de *Louis et al.*. La probabilité d'émergence est donc nulle dans ces deux zones dans nos simulations, ce qui est en accord avec les résultats obtenus par *Vezulli et al.* (2009), et *Hervio-Heath et al.* (2001), qui ne détectent que très peu *V. cholerae* dans la colonne d'eau en Méditerranée nord-occidentale. Par contre, pour le point Rhône, la gamme de sss est plus favorable, bien que très variable ($0.3 < sss < 31.3$ *psu*, $s = 7$), et la probabilité peut être calculée. D'après la Table 4.2, c'est au printemps que les conditions semblent les plus favorables (7.3 *psu* en moyenne). En hiver et en été, les valeurs sont plus proches de la borne supérieure à 14 *psu* des conditions optimales (10.1 *psu* et 14.5 *psu*, respectivement), avec une forte amplitude de variation comme le montre la forte valeur de l'écart type. Comme pour la sst, on note un bon accord avec la simulation. MED12-ARPERA donne des résultats très légèrement inférieurs à MED12-WRF en terme de sss (bien que le débit du Rhône soit identique dans les deux simulations).

1. s (de l'anglais *standard deviation*) : écart type. Permet de préciser l'éloignement moyen des données par rapport à la tendance centrale de la série

4.1.2 Probabilité de *V.cholerae*

Nous avons donc, pour nos trois zones, appliqué le modèle de *Louis et al.* (2003) sur différentes périodes d'étude. La figure 4.2 correspond aux résultats obtenus sur l'embouchure du Rhône. Au niveau du GAM, et du GLS, la probabilité d'émergence de *V.cholerae* est quasiment nulle car la salinité de surface est trop élevée (voir section précédente). Dans la simulations MED12-WRF, la probabilité la plus forte est au printemps (fig. 4.2, $0.5 < P < 0.74$), et est en moyenne égale à $P = 0.17$ sur la période 1989 – 2008 (Tab. 4.3). Les résultats sont quasi similaires entre MED12-WRF et MED12-ARPERA.

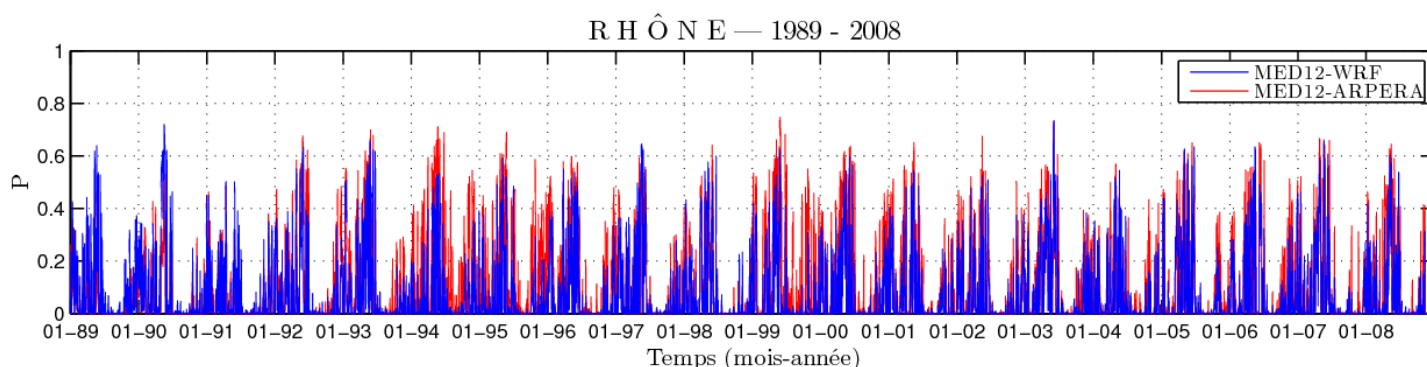


FIGURE 4.2 – Probabilité P d'émergence de *V. cholerae* au niveau du point Rhône d'après le modèle de Louis et al. pour les conditions océaniques issues des modèles MED12-WRF (courbe bleu) et MED12-ARPERA (courbe rouge).

		Probabilité d'émergence de <i>V. cholerae</i>					
	Simu.	Min.	Max.	Moy. hiver	Moy. printemps	Moy. été	Moy. automne
Rhône	WRF	~ 0	0.74	0.08	0.17	0.02	0.04
	Période	08/1995	06/2003	21 déc. → 19 mars	20 mars → 20 juin	21 juin → 22 sept.	23 sept. → 20 déc.
	ARP.	~ 0	0.75	0.11	0.19	0.03	0.07
	Période	09/1991	05/1999	21 déc. → 19 mars	20 mars → 20 juin	21 juin → 22 sept.	23 sept. → 20 déc.

TABLE 4.3 – Caractéristique des séries temporelles de probabilité P d'émergence de *V. cholerae* au point Rhône issues des modèles MED12-WRF et MED12-ARPERA, pour la période 1989 – 2008.

On remarque une probabilité moyenne P relativement faible en hiver ($P = 0.08$), ce qui confirme le caractère saisonnier de ce micro-organisme peu identifié durant la saison froide (Bouma et Pascual 2001 ; Alam et al. 2006). En été, la faible probabilité peut être attribuée aux fortes concentrations de salinité, probablement liées aux apports réduits d'eau douce par le Rhône durant cette période (fig. 4.4). Les valeurs minimales sont observées en automne ($P = 0.06$).

En résumé, les conditions favorables au développement du *Vibrio* sont principalement conditionnées par les apports d'eau douce par le Rhône pour les saisons suffisamment chaudes. Bien que la température soit plus forte en été, c'est le critère en salinité qui semble l'emporter.

Comme l'illustre les figures 4.3 et 4.4 les apports du Rhône sont maximum au printemps, son panache s'étend jusqu'à la zone GAM à la fin du mois de mars et reste important jusqu'au mois de mai, par intrusion du Courant Liguro-Provençal sur le plateau. Lorsque le Mistral s'intensifie, la salinité augmente considérablement car les effluents du Rhône sont poussés vers le large.

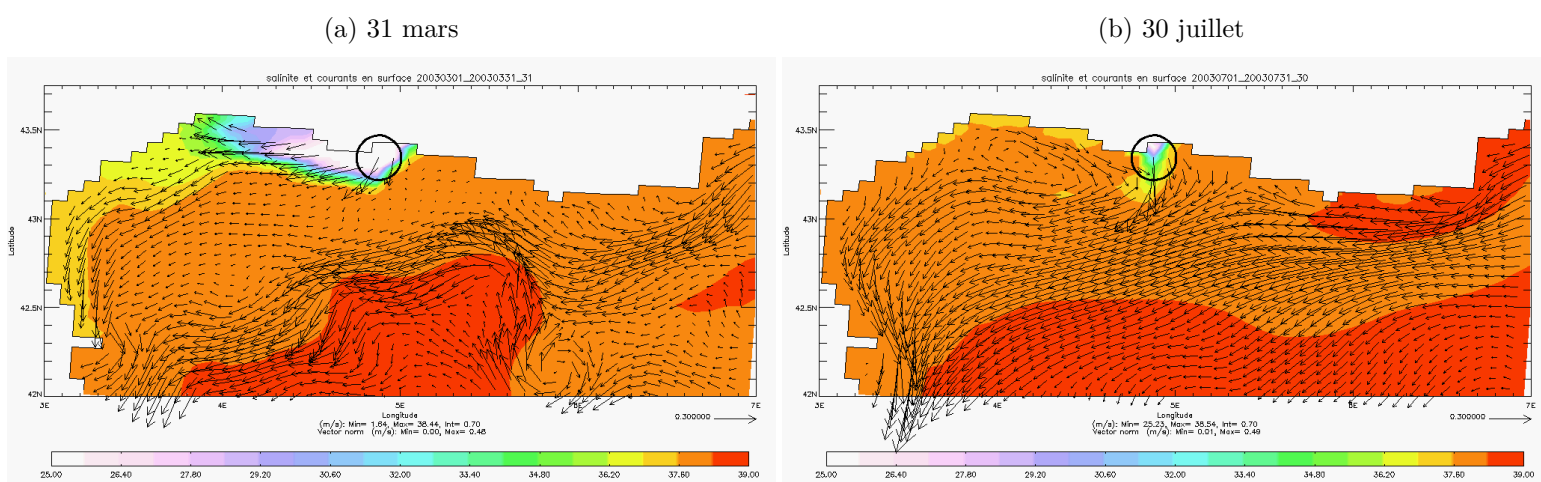


FIGURE 4.3 – Sss et courants de surface en 2003, d'après la simulation MED12-WRF. (a) 31 mars, (b) 30 juillet.

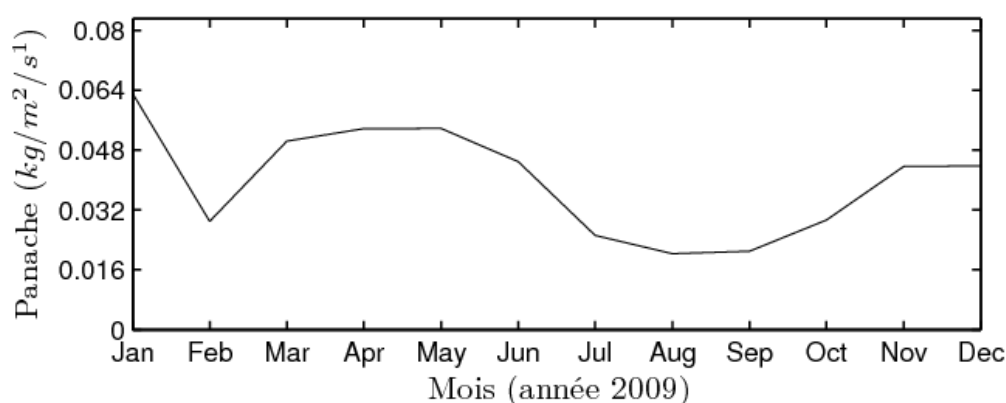


FIGURE 4.4 – Apport d'eau douce par le Rhône sur l'année 2009.

4.1.3 Chlorophylle a

Les valeurs journalières de la concentration en chlorophylle a estimées par SeaWiFS (mesurées en mg/m^3) pour l'année 2003, sont présentées ici. Compte tenu du manque

de définition près des côtes, j'ai calculé une valeur journalière moyenne sur deux boîtes présentées sur la figure 4.5, correspondant au Golfe du Lion et au Golfe de La Spezia (la majorité des valeurs de chlorophylle a n'apparaissent qu'aux extrémités de ces boîtes, soit 50 km au large).

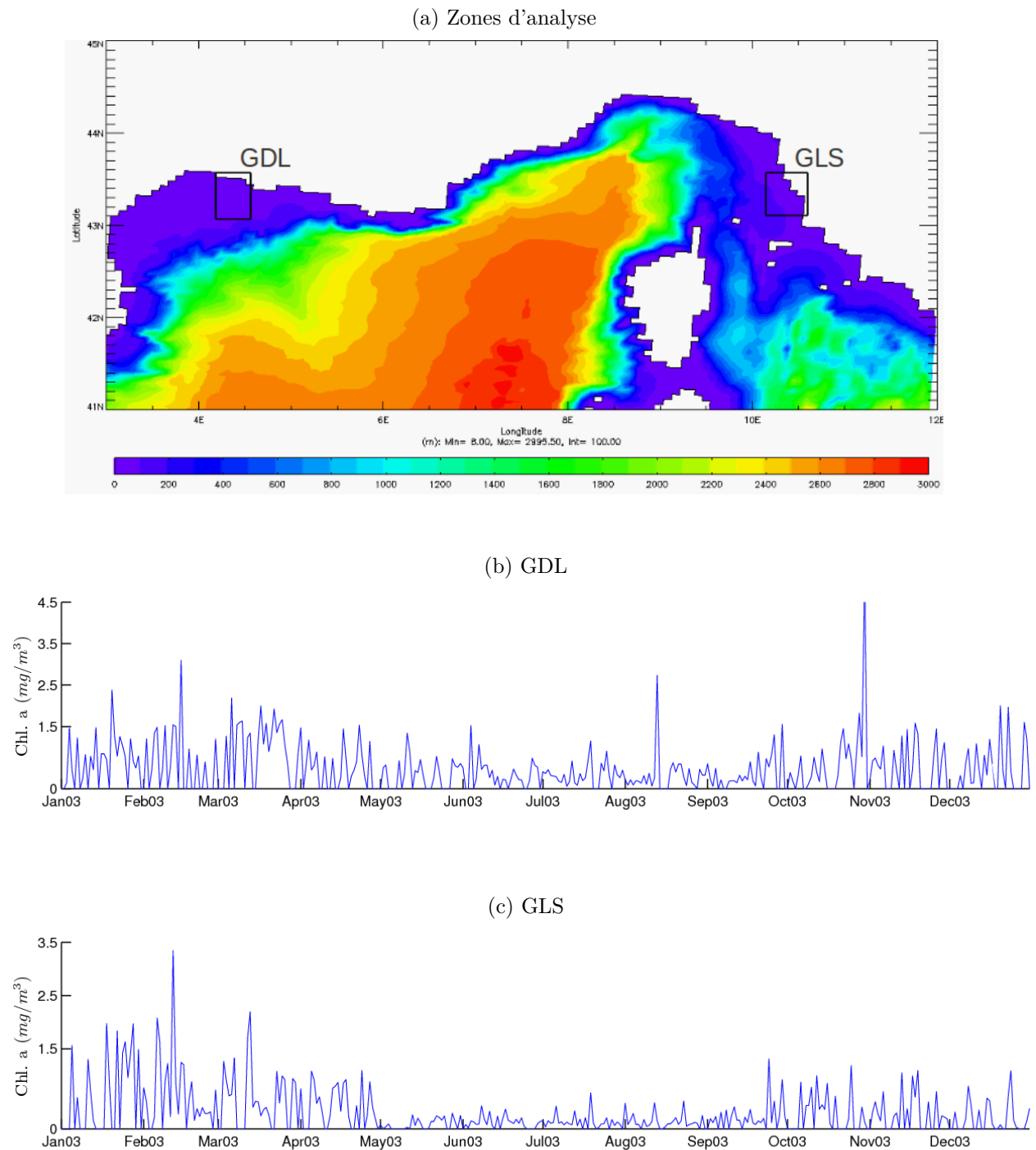


FIGURE 4.5 – Représentation des concentrations journalières moyennes de chlorophylle a dans le Golfe du Lion (GDL) (b) et le GLS (c) pour l'année 2003. En (a) sont présentées les boîtes sur lesquelles les moyennes ont été calculées.

En plus de l'année 2003, des séries identiques ont été réalisées pour l'année 1998, 1999, et 2000. Cependant, la variabilité intra-annuelle erratique entre ces différentes années m'a conduit à n'en présenter qu'une seule afin d'illustrer l'ordre de grandeur du taux de chlorophylle *a* dans le Golfe du Lion, et le Golfe de La Spezia. Les valeurs rencontrées en ces zones sont comparables à celles renseignées au large du Mozambique (Constantin de Magny et al., 2005), en Afrique du Sud (KwaZulu-Natal, Mendelsohn, 2005), et sur la côte Pacifique des Etats-Unis (Jiang, 2001b) ; elles oscillent entre 0 et 4.5 mg/m^3 .

4.2 Critique et robustesse des résultats

Afin de connaître les conditions extrêmes en termes de température et de salinité, nous nous sommes particulièrement intéressés à l'année de la canicule (2003), et à une année ayant connu un hiver très froid (2005). Pour chacune de ces années, j'ai extrait les données de sst et de sss à partir de toutes les simulations. J'ai ensuite appliqué le modèle probabiliste pour chacune des séries obtenues.

4.2.1 Impact du forçage atmosphérique

Les incertitudes sur les valeurs du forçage atmosphérique sont une source d'erreur sur l'estimation du contenu de chaleur et de sel de l'océan. En particulier, ces forçages atmosphériques diffèrent ici par la résolution horizontale de la grille des modèles, la physique des modèles, les forçages aux frontières, etc.

Pour avoir des conclusions plus robustes, nous avons comparé plusieurs simulations MED12, forcées par différents champs atmosphériques (WRF, ECMWF, ARPERA) sur l'année 2003. Attention ici aux valeurs issues du modèle MED36-ECMWF qui présentent une inertie pour les premiers mois simulés en raison des conditions initiales appliquées et dues au temps de mise en marche du modèle. Les résultats au point Rhône montrent par exemple des différences de sst ($3 \text{ }^\circ\text{C}$) et de sss ($4 - 8 \text{ psu}$) entre les trois simulations MED12 (figure 4.6). En se basant sur les résultats précédents (table 4.1 et 4.2), on observe que MED12-WRF donne les plus fortes valeurs en terme de salinité, alors que le modèle MED12-ARPERA fournit les valeurs les plus fortes de température.

Les trois simulations MED12 montrent une variabilité saisonnière très semblable. Elles montrent aussi une élévation importante de la température en août cohérente avec les conditions atmosphérique de canicules.

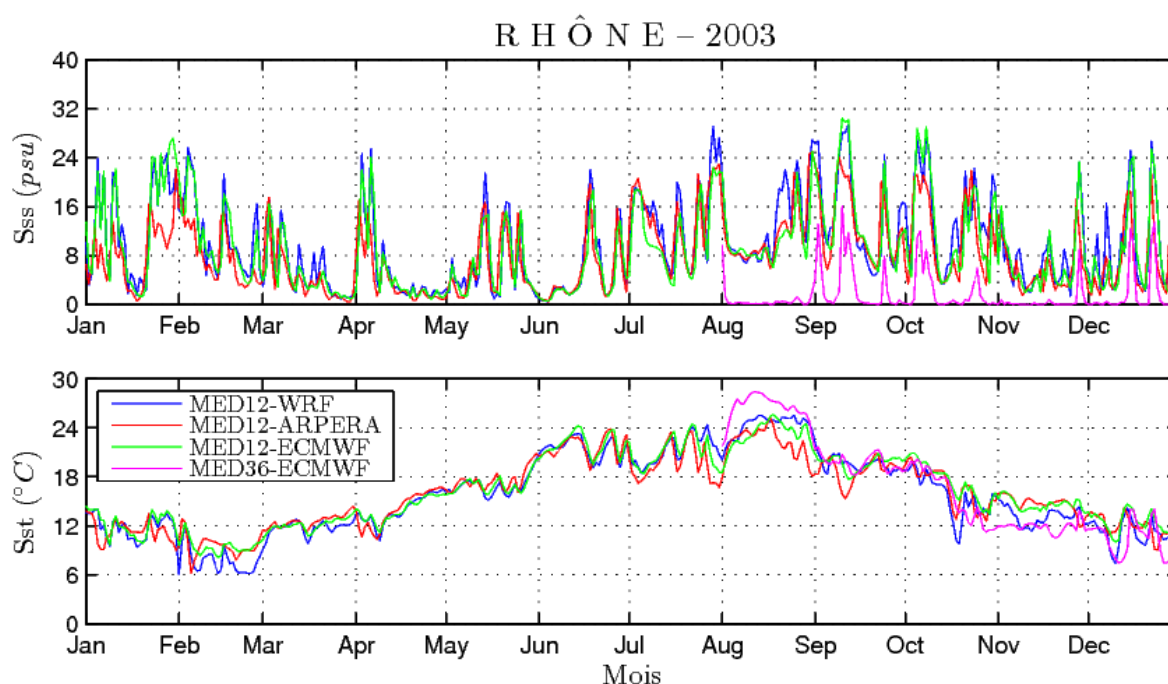


FIGURE 4.6 – Sss et sst journalières au point Rhône d’après les simulations MED12-WRF (courbe bleu), MED12-ARPERA (courbe rouge), MED12-ECMWF (courbe verte), et MED36-ECMWF (courbe magenta), pour l’année 2003.

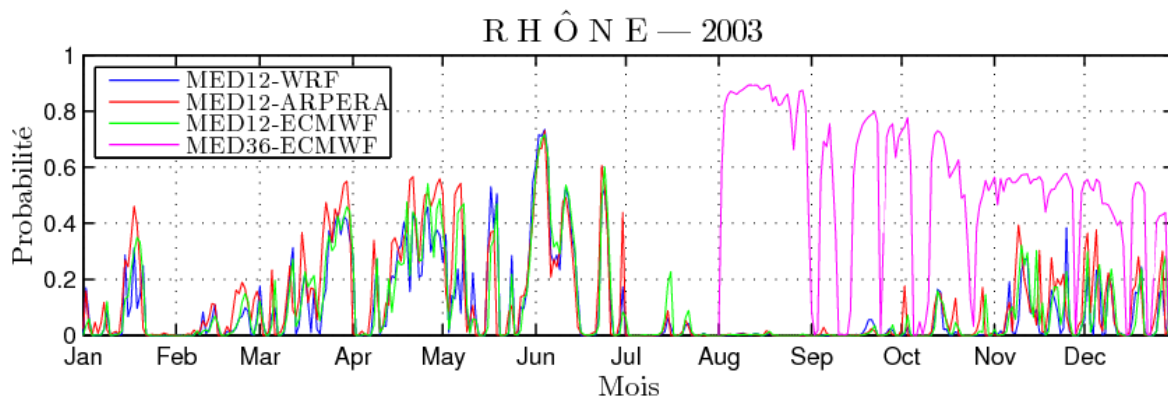


FIGURE 4.7 – Probabilité d’émergence de *V. cholerae* pour l’année 2003, calculé à partir des quatre simulations.

La figure 4.7 illustre les probabilités d’émergence de *V. cholerae* obtenues avec les trois simulations MED12 (Tab. 3.1) pour l’année 2003. Les fortes valeurs de P ont lieu au printemps, ou au début de l’été, mais sont nulles de juillet à octobre. La probabilité maximale est atteinte début juin en 2003 ($P = 0.7$), pour $sst = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $sss < 4\text{ }psu$. Par contre, lorsque la température de surface est maximale en août, la salinité est remontée au delà de $8\text{ }psu$, et la probabilité, selon le modèle de *Louis et al.* (2003), est quasiment nulle de juillet à novembre. Durant cette période, la sst se situe aux alentours de $18\text{ }^{\circ}\text{C}$, la $sss > 8\text{ }psu$, et on bascule d’une P significative à $P = 0$ à chaque coup de vent qui

refroidit la couche de surface et dilue la sss. A partir de Novembre, et jusqu'au mois de Mars, la probabilité oscille entre $P = 0$ et $P = 0.3$ pour MED12-ECMWF, et entre $P = 0$ et $P = 0.4$ pour MED12-WRF et MED12-ARPERA.

4.2.2 Impact de la résolution du modèle océanique

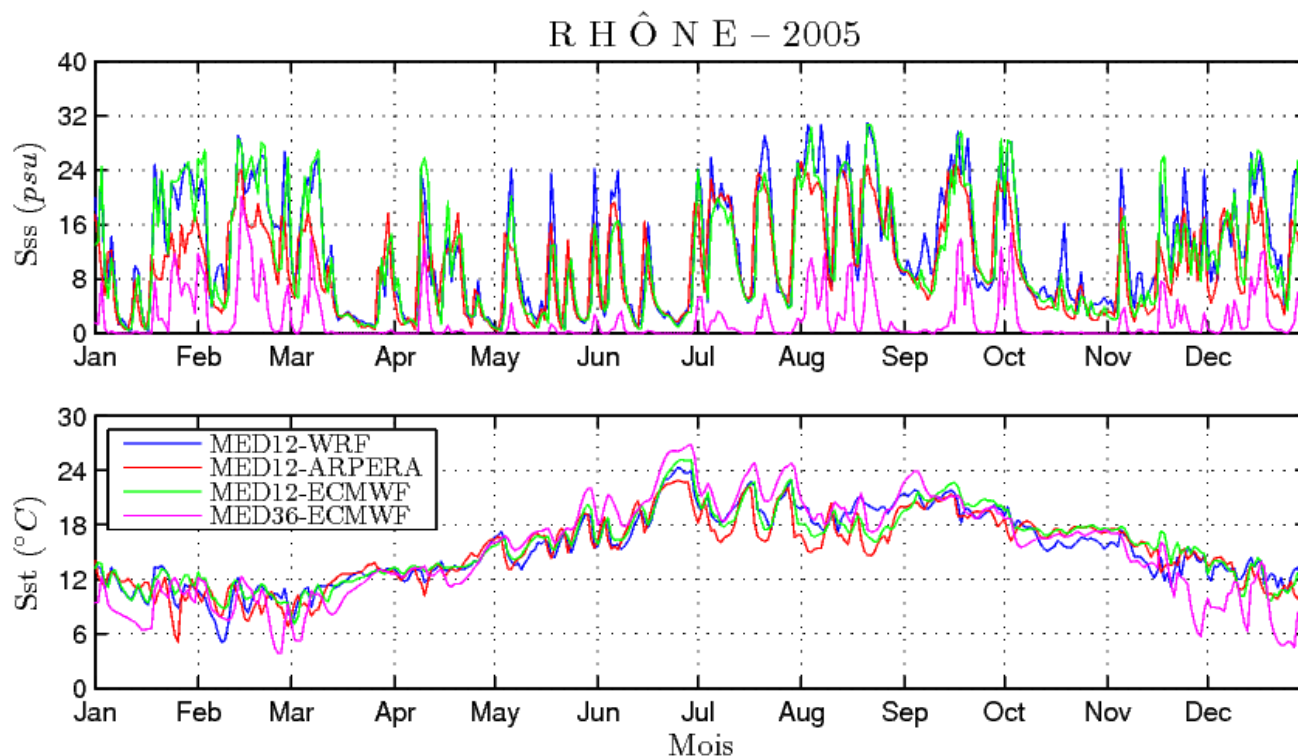


FIGURE 4.8 – Sss et sst journalières au point Rhône d’après les simulations MED12-WRF (courbe bleu), MED12-ARPERA (courbe rouge), MED12-ECMWF (courbe verte), et MED36-ECMWF (courbe magenta), pour l’année 2005.

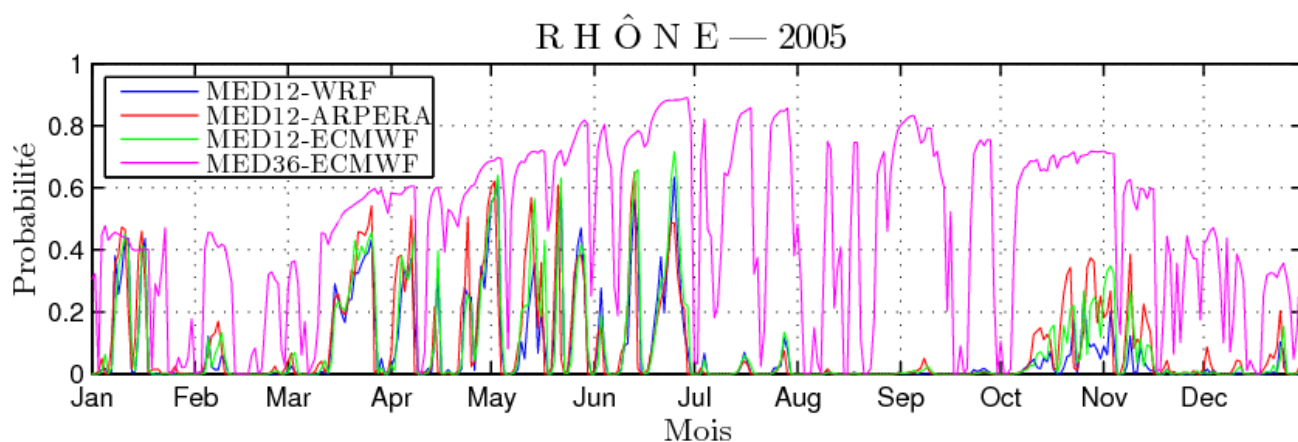


FIGURE 4.9 – Probabilité d’émergence de *V. cholerae* pour l’année 2005, calculé à partir des quatre simulations.

On observe (figure 4.8) d'importants écarts entre les modèles MED12 et le modèle MED36 au niveau des conditions océaniques (jusqu'à 22 psu pour la sss, 6 °C en sst), ce qui se traduit par des différences de P pouvant atteindre 0.8 en été (figure 4.9). En effet, la sst est plus froide en hiver, et plus chaude en été dans MED36 que dans MED12, la sss quant à elle est beaucoup plus faible dans MED36 (maximum de $sss = 18 \text{ psu}$ contre $sss = 32 \text{ psu}$ pour MED12). Pour la période de juillet à novembre, la probabilité est également très différente atteignant $P = 0.8$ contre $P = 0$. L'allure de la courbe de P semble suivre celle de la sst, la sss étant toujours très faible dans le modèle MED36 en été.

4.2.3 Résumé

Pour conclure, MED36-ECMWF est beaucoup plus précis, et permet d'avoir les conditions de salinité et de température très près des côtes. L'effet du Rhône est donc mieux représenté, et les conditions de sst et sss semblent cohérentes avec les zones de types estuariennes du Golfe du Lion. Ces zones sont soumises aux apports d'eau douce par le Rhône, qui sont encore mal représentés par les modèles de circulation océanique.

Chapitre 5

Conclusion

Un premier travail de synthèse bibliographique, ainsi que les capacités des différents modèles à disposition, nous ont conduit à nous focaliser sur deux paramètres (les plus récurrents dans les études) qui semblent conditionner le développement des bactéries *Vibrio* : la température et la salinité de surface. L'habitat naturel du *Vibrio* est de type estuaire (Colwell 1996), comme les bassins et marécages bordant le GAM dont les échanges avec les eaux méditerranéennes concernent celles de surface. Les paramètres sst et sss apparaissent donc être les plus pertinents pour une première analyse. A titre indicatif, les valeurs de la concentration en chlorophylle a dans le Goffe du Lion et le GLS ont également été renseignées (entre 0 et 4.5 mg/m^3), et correspondent aux valeurs rencontrées lors d'études précédentes (Constantin de Magny et al. 2005, Mendelsohn et al. 2005, Jiang 2001b). Ces résultats semblent indiquer que le taux de chlorophylle a en Méditerranée nord-occidentale n'est pas un facteur limitant en ce qui concerne le développement de *Vibrio*.

Notre collaboration avec le laboratoire MIVEGEC de Montpellier, nous a notamment permis d'avoir accès à un modèle prédictif d'émergence de *V. cholerae*. Le Rhône constitue le plus important apport d'eau douce dans la zone du GAM, et c'est donc sur le point de grille des modèles océaniques situé à son embouchure que nous avons décidé d'appliquer le modèle probabiliste. Nous avons ainsi pu mettre en évidence l'impact de son activité sur les conditions océaniques dans la zone du golfe.

Les premiers résultats de sst et sss ont permis d'identifier, et de quantifier l'impact des saisons sur ces paramètres. La sst est la variable la plus influencée par les changements saisonniers, elle tombe progressivement en dessous de $15 \text{ }^\circ\text{C}$ au milieu de l'automne, et remonte au delà lors du printemps. La sss, sur les côtes méditerranéennes, est peu variable avec de fortes valeurs ($> 37 \text{ psu}$). Cependant, dans les zones soumises aux apports d'eau douce, comme ici au point Rhône, on observe des variations marquées intra-annuellement avec des minima de salinité au printemps $< 1 \text{ psu}$. Ces variations, dans les modèles, sont dirigées par l'activité des fleuves, dont les apports constituent un élément clé pouvant conduire à des conditions favorables pour le développement des pathogènes. L'intrusion du Courant Liguro-Provençal par le nord-est sur le plateau favorise l'étalement du panache

du Rhône en direction du GAM, mais les eaux apportées par le fleuve sont rapidement mélangées aux eaux méditerranéennes, et la sss augmente rapidement à mesure que l'on s'éloigne de son embouchure. Toutefois, l'existence de branchements à l'intérieur des terres entre le Rhône et les estuaires et marécages bordants le GAM laissent supposer que des conditions favorables peuvent apparaître en ces zones difficiles à représenter dans les modèles océaniques.

L'analyse d'évènements particuliers (2003 et 2005) montre qu'une augmentation des températures ne peut que favoriser le développement des bactéries. C'est notamment durant l'année de la canicule (2003) que l'on obtient les valeurs de P les plus importantes.

En résumé, la Méditerranée est une mer très salée qui paraît peu favorable au développement des bactéries. Cependant, les zones littorales influencées par des apports d'eau douce par les fleuves semblent remplir les conditions de température et de salinité nécessaires au développement des bactéries. Même si dans le cadre de cette étude les conditions dans les marécages et les petits bassins bordant le GAM n'ont pu être évaluées, leurs connexions avec des fleuves laissent présager que ces zones pourraient constituer un risque pour l'émergence des espèces de *Vibrio*. Dans le cadre de changement climatique, avec une augmentation probable de la sst de + 3 à 5 °C à la fin du siècle, les conditions dans ces régions particulières pourraient s'avérer être plus propices.

Références

Cités dans le rapport

Alam M., Hasan N.A., Sadique A., Bhuiyan N.A., Ahmed K.U., Nursin S., Nair G.B., Siddique A.K., Sack R.B., Sack D.A., Huq A., Colwell R.R., June 2006. Seasonal Cholera Caused by *Vibrio cholerae* Serogroups 01 and 0139 in the Coastal Aquatic Environment of Bangladesh, Applied Environmental Microbiology, p. 4096–4104.

Béranger, K., Y. Drillet, M-N. Houssais, P. Testor, R. Bourdallé-Badie, B. Alhammoud, A. Bozec, L. Mortier, P. Bouruet-Aubertot, and M. Crépon, 2010. Impact of the spatial distribution of the atmospheric forcing on water mass formation in the Mediterranean Sea, J. Geophys. Res., 115, C12041, DOI :10.1029/2009JC005648.

Beuvier, J., Sevault F., Herrmann M., Kontoyiannis H., Ludwig W., Rixen M., Stanev E., Béranger K., Somot S, 2010. Modelling the Mediterranean Sea interannual variability over the last 40 years : focus on the EMT, J. Geophys. Res., 115, C08017, DOI :10.1029/2009JC005950.

Borroto R.J., 1998. Global warming and growing risk of cholera incidence : a review of the literature and evidence, Geojournal 44.2, 111–120.

Bouma M.J. & Pascual M., 2001. Seasonal and interannual cycles of endemic cholera in Bengal 1891–1940 in relation to climate and geography, Hydrobiologia 460, 147–156.

Bryan P.J., Steffan R.J., DePaola A., Foster J.W., Bej A.K., 1999. Adaptative Response to Cold Temperatures in *Vibrio vulnificus*, Current Microbiology, Vol. 38, pp. 168–175

Canals, M., P. Puig, X. Durrieu de Madron, S. Heussner, A. Palanques and J. Fabras, 2006. Flushing submarine canyons, Nature, 444, 354-357.

Colwell R.R., December, 1996. Global Climate and infectious Disease : The Cholerae Paradigm, Science - Vol. 274.

Colwell, R. R., and W. M. Spira, 1992. The ecology of *Vibrio cholerae*, p. 107-127. In D. Barua and W. B. I Greenouh (ed.), Cholera. Plenum, New York, N.Y.

Constantin de Magny G., Murtugudde R., Sapiano M.R.P., Nizam A., Brown C.W., Busalacchi A.J., Yunus M., Nair G.B., Gil A.I., Lanata C.F., Calkins J., Manna B., Rajendran K., Bhattacharya M.K., Huq A., Sack R.B., Colwell R.R., 2008. Environmental signatures associated with cholera epidemics, PNAS, Vol. 105 n°. 46.

Estournel C., Durrieu de Madron X., Marsaleix P., Auclair F., Julliand C., Vehil R., 2003. Observation and modeling of the winter coastal oceanic circulation in the Gulf of Lion under wind conditions influenced by the continental orography (FETCH experiment), Journal of geophysical research, DOI : 10.1029/2001JC000825.

Heidelberg J.F., Heidelberg K.B., Colwell R.R., November 2002. Seasonality of Chesapeake Bay Bacterioplankton Species, Applied and Environmental Microbiology, Vol. 68, No. 11, p. 5488–5497.

Herrmann, M. J., and S. Somot, 2008. Relevance of ERA40 dynamical downscaling for modeling deep convection in the Mediterranean Sea, Geophys. Res. Lett., 35, L04607, doi :10.1029/2007GL032442.

Hervio-Heath D., Colwell R.R., Derrien A., Robert-Pillot A., Fournier J.M. & Pommeputy M., 2002. Occurrence of pathogenic vibrios in coastal areas of France, Journal of Applied Microbiology, 92, 1123–1135.

Hsieh J.L., Fries J.S. Noble R.T., 2008. Dynamics and predictiv modelling of *Vibrio* spp. in the Neuse River Estuary, North Carolina, USA, Environmental Microbiology, DOI : 10.1111/j. 1462-2920.2007.01429.x.

Huq, A., R. R. Colwell, M. A. Chowdhury, B. Xu, S. M. Moniruzzaman, M. S. Islam, M. Yunus, and M. J. Albert. 1995. Coexistence of *Vibrio cholerae* O1 and O139 Bengal in plankton in Bangladesh. Lancet 345 :1249.

Jiang S.C., 2001. *Vibrio cholerae* in recreational beach waters and tributaries of Souther California, Hydrobiologia 460 : 157–164.

Kaneko T., and R. R. Colwell, 1975. Adsorption of *Vibrio parahaemolyticus* onto chitin and copepods. Appl. Microbiol. 29 :269-274.

Lipp E.K., Huq A., Colwell R.R., 2002. Effects of Global Climate on Infectious Disease : the Cholera Model, Clinical Microbiology Reviews, DOI : 10.1128/CMR.15.4.757–770.2002.

Lebeaupin Brossier C., Béranger K., Deltel C., Drobinski P., 2011. The Mediterranean response to different space-time resolution atmospheric forcings using perpetual mode sensitivity simulations, *Ocean Modelling* 36, 1–25.

Lebeaupin Brossier C., Béranger K., Drobinski P., 2011b. Sensitivity of the North-Western Mediterranean coastal and thermohaline circulations as simulated by the 1/12° resolution oceanic model NEMO-MED12 to the space-time resolution of the atmospheric forcing, (soumis).

Louis V.R., Russek-Cohen E., Choopun N., Rivera I.N.G., Gangle B., Jiang S.C., Rubin A., Patz J.A., Huq A., Colwell R.R., 2003. Predictability of *Vibrio cholerae* in Chesapeake Bay, *Environmental Microbiology*, DOI : 10.1128/AEM.69.5.2773–2785.2003.

Millot C., 1999. Circulation in the Western Mediterranean Sea, *Journal of Marine Systems* 20, 423–442.

Millot C. and Taupier-Letage I., 2005. Circulation in the Mediterranean Sea, *The handbook of Environmental Chemistry*, Vol 1.

Pascual M., Bouma M.J., Dobson A.P., 2002. Cholera and climate : revisiting the quantitative evidence, *Microbes and Infection* 4, 237–245.

Pfeffer C.S., Hite M.F., Oliver J.D., 2003. Ecology of *Vibrio vulnificus* in Estuarine Waters of Eastern North Carolina, *Applied and Environmental Microbiology*, DOI : 10.1128/AEM.69.6.3526–3531.2003.

Singleton F.L., Attwell R., Jangi S., Colwell R.R., 1982. Effects of Temperature and Salinity on *Vibrio cholerae* Growth, *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 44, No. 5, p. 1047–1058.

Vezulli L., Pezzati E., Moreno M., Fabiano M., Pane L., Pruzzo C., 2009. Benthic ecology of *Vibrio* spp. and pathogenic *Vibrio* species in a coastal Mediterranean environment (La Spezia Gulf, Italy), *Microbial Ecology*, DOI : 10.1007/s00248-009-9542-8.

Non cités dans le rapport

Caldini G., Neri A., Cresti S., Boddi V., Rossolini G.M., Lanciotti E., July 1997. High Prevalence of *Vibrio cholerae* Non-01 Carrying Heat-Stable-Enterotoxin-Encoding Genes among *Vibrio* Isolates from Temperate-Climate River Basin of Central Italy, *Applied and environmental Microbiology*, p. 2934–2939.

Carroll J.W., Mateescu M.C., Chava K., Colwell R.R. & Bej A.K., 2001. Response and tolerance of toxigenic *Vibrio cholerae* 01 to cold temperatures, *Antonie van Leeuwenhoek* 79 : 377–384.

Chávez M.R.C., Sedas V.P., Borunda E.O., Reynoso F.L., 2005. Influence of water temperature and salinity on seasonal occurrences of *Vibrio cholerae* and enteric bacteria in oyster-producing areas of Veracruz, México, *Elsevier - Marine pollution bulletin* 50 1641–1648.

Constantin de Magny G., Paroissin C., Cazelles B., De Lara M., Delmas J.F., Guégan J.F., September 2005. Modeling Environmental Impact of Plankton reservoirs on Cholera Population Dynamics, *ESAIM : Proceedings*, Vol. 14, 156–173.

Constantin de Magny G., Long W., Brown C.W., Hood R.R., Huq A., Murtugudde R., Colwell R.R., 2010. Predicting the Distribution of *Vibrio* spp. in the Chesapeake Bay : A *Vibrio cholerae* Case Study, *Ecohealth*, DOI : 10.1007/s-10393-009-0273-6.

Gil A.I., Louis V.R., Rivera I.N.G., Lipp E., Huq A., Lanata C.F., Taylor D.N., Russek-Cohen E., Choopun N., Sack R.B. & Colwell R.R., 2004. Occurrence and distribution of *Vibrio cholerae* in the coastal environment of Peru, *Environmental Microbiology* 6(7), 699–706.

Gonzales-Acosta B., Bashan Y., Hernandez-Saavedra N.Y., Ascencio F. & De la Cruz-Agüero G., 2005. Seasonal seawater temperature as the major determinant for populations of culturable bacteria in the sediments of an intact mangrove in an arid region, *Federation of European Microbiological Societies*, DOI : 10.1111/j. 1574-6941 1.2005.00019.x.

Huq A., Sack R.B., Nizam A., Longini I.M., Nair G.B., Ali A., Morris J.G., Jr., Huda Khan M.N., Siddique A.K., Yunus M., Albert M.J., Sack D.A., Colwell R.R., 2005. Critical Factors Influencing the Occurrence of *Vibrio cholerae* in the Environment of Bangladesh, *Applied and Environmental Microbiology*, DOI : 10.1128/AEM.71.8.4645–4654.2005.

Jiang S.C., Fu W., 2001b. Seasonal Abundance and Distribution of *Vibrio cholerae* in Coastal Waters Quantified by a 16S-23S Intergenic Spacer Probe, *Microbial Ecology*, DOI : 10.1007/s00248-001-0029-5.

Koelle K., Rodó X., Pascual M., Yunus Md. & Mostafa G., 2005. Refractory periods and climate forcing in cholera dynamics, *Nature*, DOI : 10.1038/nature03820.

Lobitz B., Beck L., Huq A., Wood B., Fuchs G., Faruque A.S.G., Colwell R.R., 1999.

Climate and infectious disease : Use of remote sensing for detection of *Vibrio cholerae* by indirect measurement, PNAS, Vol. 97, No. 4.

Luque Fernández M.A., Bauernfeind A., Jiménez J.D., Gil C.L., El Omeiri N., Herrera Guibert D., 2008. Influence of temperature and rainfall on the evolution of cholera epidemics in Lusaka, Zambia, 2003—2006 : analysis of a time series, Elsevier Health, TRSTMH-965, No of Pages 7.

Mendelsohn J., Dawson T., 2006. Climate and cholera in KwaZulu-Natal, South Africa : Rhe role of environmental factors and implications for epidemic preparedness, International Journal of Hygiene and Environmental Health, DOI : 10.1016/j.ijheh.2006.12.002.

Motes M.L., DePaola A., Cook D.W., Veazey J.E., Hunsucker J.C., Garthright W.E., Blodgett R.J., Chirtel J., 1998. Influence of Water Temperature and Salinity on *Vibrio vulnificus* in Northern Gulf and Atlantic Coast Oysters (*Crassostrea virginica*), Applied and Environmental Microbiology, Vol. 64, No. 4, p. 1459–1465.

Parveen S., Hettiarachchi K.A., Bowers J.C., Jones J.L., Tamplin M.L., McKay R., Beatty W., Brohawn K., DaSilva L.V., DePaola A., 2008. Seasonal distribution of total and pathogenic *Vibrio parahaemolyticus* in Chesapeake Bay oysters and waters, International Journal of Food Microbiology, DOI : 10.1016/j.ijfoodmicro.2008.09.019.

Randa M.A., Polz M.F., Lim E., 2004. Effects of Temperature and Salinity on *Vibrio vulnificus* Population Dynamics as Assessed by Quantitative PCR, Applied and Environmental Microbiology, DOI : 10.1128/AEM.70.9.5469–5476.2004.

Sack R.B., Siddique A.K., Longini I.M., Jr., Nizam A., Yunus Md., Islam M.S., Morris J.G., Jr., Ali A., Huq A., Nair G.B., Qadri F., Faruque S.M., Sack D.A., Colwell R.R., 2003. A 4-Year Study of the Epidemiology of *Vibrio cholerae* in Four Rural Areas of Bangladesh, The Journal of Infectious Disease, 187.97–101.

Speelman E.C., Checkley W., Gilman R.H., Patz J., Calderon M., Manga S., 2000. Cholera Incidence and El Niño-Related Higher Ambient Temperature, Journal of American Medical Association, Vol. 283, No 23, p. 3072–3074.

Thomas K.U., Joseph N., Raveendran O., Nair S., 2006. Salinity-induced survival strategy of *Vibrio cholerae* associated with copepods in Cochin backwaters, Elsevier - Marine Pollution Bulletin, DOI : 10.1016/j.marpolbul.2006.04.011.

Turner J.W., Good B., Cole D., Lipp E.K., 2009. Plankton composition and environmen-

tal factors contribute to *Vibrio* seasonality, International Society for Microbial Ecology Journal, p. 1082–1092.

Annexes

Cette annexe présente un quatrième point d'étude situé à l'embouchure du Pô. Comme on l'a vu dans le rapport, les zones favorables pour l'émergence du *Vibrio*, d'après le modèle de Louis et al., sont les zones soumises à d'importants apports d'eau douce par les fleuves. Nous avons donc élargi notre étude à la Mer Adriatique, et sélectionné un point de la grille des modèles MED12 et MED36 correspondant à l'embouchure du Pô.

Evolution de la sss et sst en Mer Adriatique – Période 1989 - 2008

La figure 5.2 représente les séries temporelles de température et salinité issues des modèles MED12-WRF (a), et MED12-ARPERA (b).

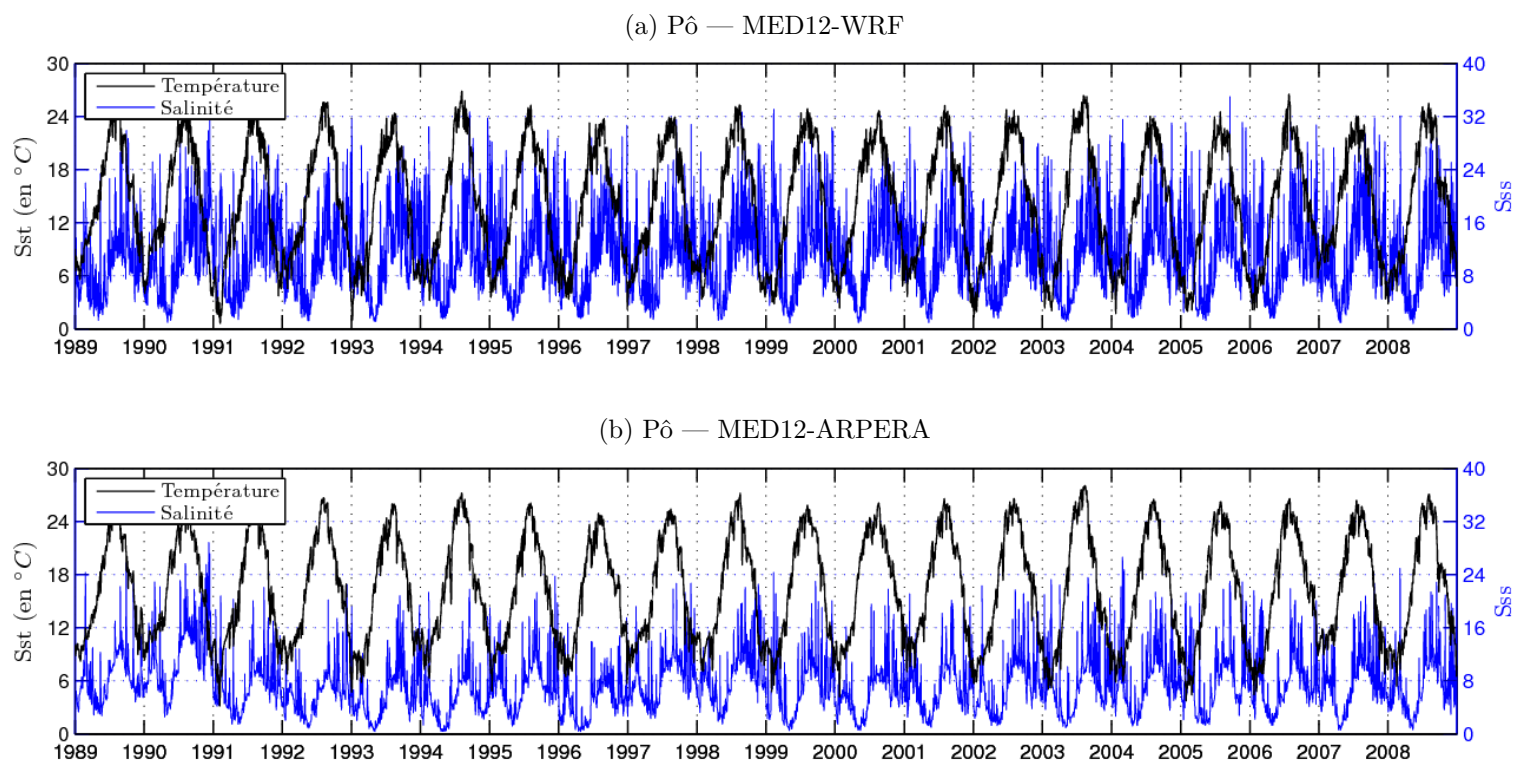


FIGURE 5.1 – Sss et sst journalières au point Pô pour la période 1989 - 2008, d'après les simulations MED12-WRF (a), et MED12-ARPERA (b).

Evolution de la sst

D'après la simulation MED12-WRF on retrouve au point Pô le cycle saisonnier des températures observé sur les précédentes zones d'études, avec un maximum en été et un minimum en hiver sur la période 1989 – 2008 (figure 5.2). Les valeurs maximum en été peuvent atteindre 26.9 °C au point Pô, et atteignent 0.6 °C en hiver (Tab. 5.1). Les conditions sst en ce point sont proches des conditions observées dans le GDL, et sont légèrement plus froides en hiver et au printemps (6.4 °C et 14.5 °C, respectivement). En été, la température de l'eau de surface à l'embouchure du Pô est plus chaude d'1.7 °C par rapport au point Rhône, et est égale à 22.2 °C en moyenne pendant l'été entre 1989 et 2008.

Température de surface – sst (°C)						
	Simu.	Min.	Max.	Moy. hiver	Moy. printemps	Moy. été
Pô	WRF	0.6	26.9	6.4	14.5	22.2
	Période	02/1991	08/1994	21 déc. → 19 mars	20 mars → 20 juin	21 juin → 23 sept.
	ARPERA	3.1	28	9	16.1	23.9
	Période	02/1991	08/2003	21 déc. → 19 mars	20 mars → 20 juin	21 juin → 23 sept.

TABLE 5.1 – Caractéristiques des séries temporelles de température issues des modèles MED12-WRF et MED12-ARPERA, pour la période 1989 – 2008.

On remarque dans la table 5.1 que la sst est globalement plus chaude dans MED12-ARPERA de ± 1.5 °C en moyenne par rapport à MED12-WRF. Une nouvelle fois, les données correspondant à l'automne ne sont pas présentées ici car durant cette période, et d'après le modèle de Louis et al., les $P \approx 0$ (tab. 5.3).

Evolution de la sss

Toujours d'après MED12-WRF, on observe un cycle saisonnier à l'embouchure du Pô, avec un décalage de quelques mois par rapport à la sst (figure 5.2). On observe ici le maximum de débit au printemps, lorsque la sss est la plus faible.

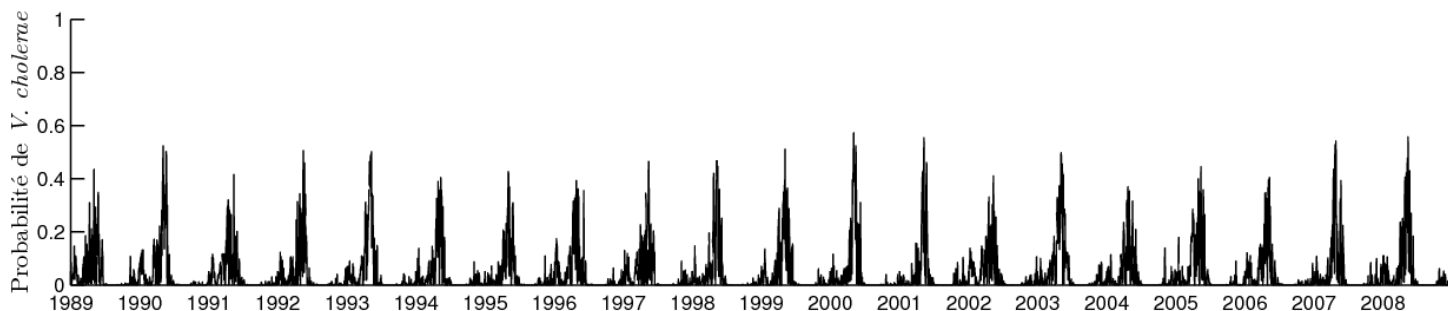
Salinité de surface – sss						
	Simu.	Min.	Max.	Moy. hiver	Moy. printemps	Moy. été
Pô	WRF	0.8	35	10.9	5.5	15.4
	Période	05/2008	09/2005	21 déc. → 19 mars	20 mars → 20 juin	21 juin → 23 sept.
	ARPERA	0.4	28.9	7.6	3.6	10.3
	Période	05/1993	12/1990	21 déc. → 19 mars	20 mars → 20 juin	21 juin → 23 sept.

TABLE 5.2 – Caractéristiques des séries temporelles de salinité issues des modèles MED12-WRF et MED12-ARPERA, pour la période 1989 – 2008.

Les gammes de valeurs (tab. 5.2) pour la sss dans les simulations au point Pô sont très semblables aux conditions relevées au niveau de l’embouchure du Rhône, avec des valeurs légèrement plus faible en hiver et au printemps (10.9 contre 10.1, et 5.5 contre 7.3 respectivement). On peut ici noter une différence relativement importante de ± 3 entre MED12-WRF et MED12-ARPERA, avec les valeurs les plus faibles pour la dernière simulation. Ces variations entre les deux simulations semblent expliquées par le terme d’évaporation plus fort dans MED12-WRF. Une nouvelle fois, c’est au printemps que les conditions semblent le plus favorables pour l’émergence des pathogènes.

Probabilité de *V. cholerae*

(a) Pô — MED12-WRF



(b) Pô — MED12-ARPERA

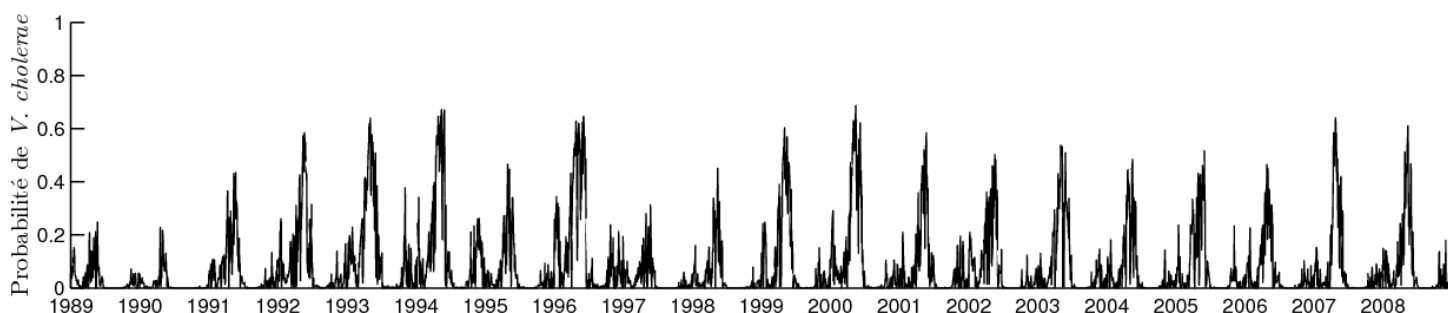


FIGURE 5.2 – Probabilité P d’émergence de *V. cholerae* au point Pô issues des modèles MED12-WRF (a) et MED12-ARPERA (b), pour la période 1989 - 2008.

Comme attendu, les valeurs de probabilité les plus fortes apparaissent au printemps pour MED12-WRF ($0.45 < P < 0.65$), et durant cette saison, la P moyenne est égale à $P = 0.13$ (tab. 5.3) sur la période d’étude (tab. 5.3). Il est à noter ici une forte variabilité inter-annuelle, plus marquée qu’au point Rhône ; la Mer Adriatique semble plus sensible aux variations climatiques que la partie nord-occidentale de la Méditerranée.

Probabilité d'émergence de *V. cholerae*

	Simu.	Min.	Max.	Moy. hiver	Moy. printemps	Moy. été	Moy. automne
Pô	WRF	~ 0	0.57	0.03	0.13	~ 0	~ 0
	Période	09/2005	05/2000	21 déc. → 19 mars	20 mars → 20 juin	21 juin → 22 sept.	23 sept. → 20 déc.
	ARP.	~ 0	0.69	0.05	0.23	0.01	0.03
	Période	08/1990	05/2000	21 déc. → 19 mars	20 mars → 20 juin	21 juin → 22 sept.	23 sept. → 20 déc.

TABLE 5.3 – Caractéristique des séries temporelles de probabilité P d'émergence de *V. cholerae* au point Pô issues des modèles MED12-WRF et MED12-ARPERA, pour la période 1989 – 2008.

Focus sur l'année 2005

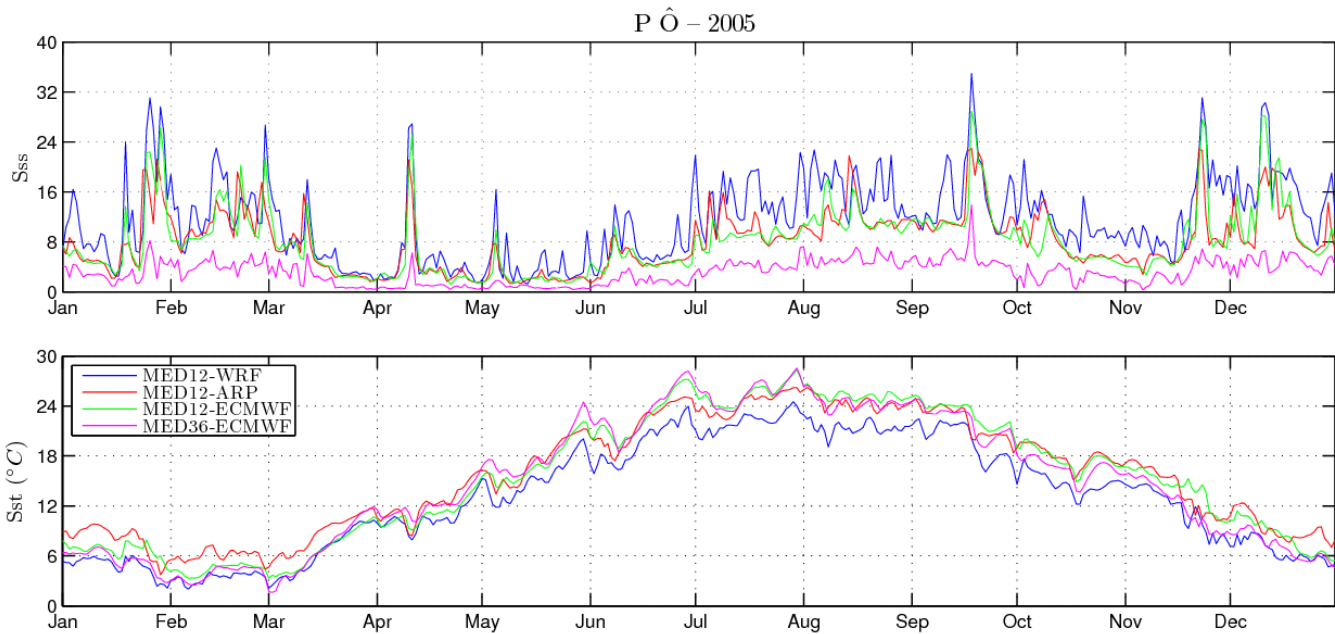


FIGURE 5.3 – Sss et sst journalières au point Pô pour l'année 2005, d'après les simulations MED12 et MED36.

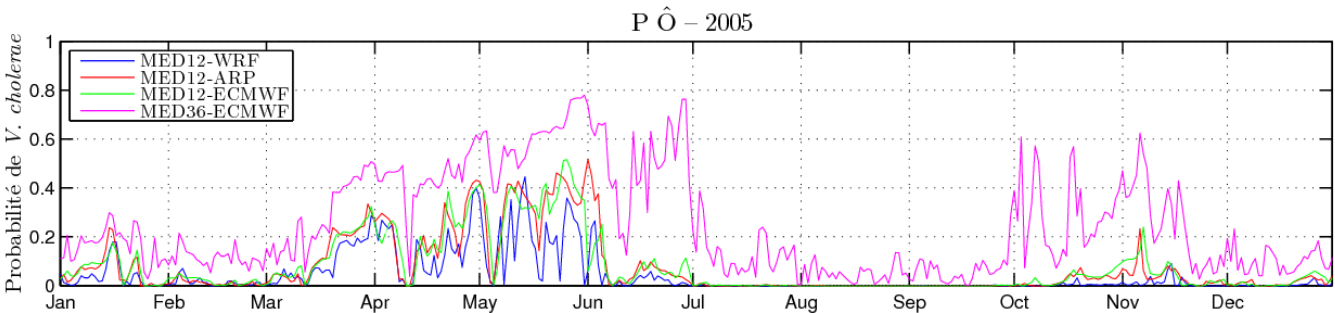


FIGURE 5.4 – Probabilité d'émergence de *V. cholerae* pour l'année 2005, calculé à partir des quatres simulations.

Table des figures

2.1	Schéma de la circulation générale en Méditerranée (Béranger et al. 2010)	6
2.2	Circulation de l'AW (Atlantic Water) et de la WIW (Winter Intermediate Water), (Millot, 1999).	7
2.3	Partie Nord-Ouest du bassin méditerranéen illustré par la topographie en mètres (contours tous les 500m). Le carré vert correspond au centre du Golfe du Lion. Le cercle vert entoure le Golfe d'Aigues-Mortes. Les vents dominants sont indiqués par les flèches roses. Le courant principal à la frontière sud du golfe est indiqué par la flèche bleu foncé (Lebeaupin Brossier et al. 2011).	9
3.1	Grille horizontale et relief d'ARPERA (Herrmann & Somot 2008)	12
3.2	Représentation 3D de la probabilité empirique P issu du modèle 5 tiré de l'article de Louis et al. (2003).	13
3.3	Probabilité d'émergence de <i>V. cholerae</i> pour l'année 2003, d'après le modèle 5 de Louis, et calculé grâce aux conditions sst et sss du modèle MED12-WRF fournis par Cindy Lebeaupin-Brossier. (a) Zones d'analyse : 1. Golfe d'Aigues-Mortes (GAM) ; 2. Embouchure du Rhône (Rhône) ; 3. Golfe de La Spezia (GLS). (b) Zoom sur la partie nord-occidentale de la Méditerranée ; les fleuves sont écrits en rouge.	17
4.1	Sss et sst journalières pour la période 1989 - 2008, d'après la simulation MED12-WRF. (a) point GAM, (b) point Rhône, (c) point GLS.	19
4.2	Probabilité P d'émergence de <i>V. cholerae</i> au niveau du point Rhône d'après le modèle de Louis et al. pour les conditions océaniques issues des modèles MED12-WRF (courbe bleu) et MED12-ARPERA (courbe rouge).	22
4.3	Sss et courants de surface en 2003, d'après la simulation MED12-WRF. (a) 31 mars, (b) 30 juillet.	23
4.4	Apport d'eau douce par le Rhône sur l'année 2009.	23
4.5	Représentation des concentrations journalières moyennes de chlorophylle a dans le Golfe du Lion (GDL) (b) et le GLS (c) pour l'année 2003. En (a) sont présentées les boîtes sur lesquelles les moyennes ont été calculées. . .	24
4.6	Sss et sst journalières au point Rhône d'après les simulations MED12-WRF (courbe bleu), MED12-ARPERA (courbe rouge), MED12-ECMWF (courbe verte), et MED36-ECMWF (courbe magenta), pour l'année 2003. .	26

4.7	Probabilité d'émergence de <i>V. cholerae</i> pour l'année 2003, calculé à partir des quatre simulations.	26
4.8	Sss et sst journalières au point Rhône d'après les simulations MED12-WRF (courbe bleu), MED12-ARPERA (courbe rouge), MED12-ECMWF (courbe verte), et MED36-ECMWF (courbe magenta), pour l'année 2005. .	27
4.9	Probabilité d'émergence de <i>V. cholerae</i> pour l'année 2005, calculé à partir des quatre simulations.	27
5.1	Sss et sst journalières au point Pô pour la période 1989 - 2008, d'après les simulations MED12-WRF (a), et MED12-ARPERA (b).	37
5.2	Probabilité P d'émergence de <i>V. cholerae</i> au point Pô issues des modèles MED12-WRF (a) et MED12-ARPERA (b), pour la période 1989 - 2008. .	39
5.3	Sss et sst journalières au point Pô pour l'année 2005, d'après les simulations MED12 et MED36.	40
5.4	Probabilité d'émergence de <i>V. cholerae</i> pour l'année 2005, calculé à partir des quatres simulations.	40

Liste des tableaux

3.1	Résumé des simulations	13
4.1	Caractéristiques des séries temporelles de température issues des modèles MED12-WRF et MED12-ARPERA, pour la période 1989 – 2008.	20
4.2	Caractéristiques des séries temporelles de salinité issues des modèles MED12-WRF et MED12-ARPERA, pour la période 1989 – 2008.	21
4.3	Caractéristique des séries temporelles de probabilité P d'émergence de <i>V. cholerae</i> au point Rhône issues des modèles MED12-WRF et MED12-ARPERA, pour la période 1989 – 2008.	22
5.1	Caractéristiques des séries temporelles de température issues des modèles MED12-WRF et MED12-ARPERA, pour la période 1989 – 2008.	38
5.2	Caractéristiques des séries temporelles de salinité issues des modèles MED12-WRF et MED12-ARPERA, pour la période 1989 – 2008.	38
5.3	Caractéristique des séries temporelles de probabilité P d'émergence de <i>V. cholerae</i> au point Pô issues des modèles MED12-WRF et MED12-ARPERA, pour la période 1989 – 2008.	40