

Interactions microbiologie/changement climatique global en estuaire de Seine

Rapport bibliographique

Josselin Bodilis, Université de Rouen

Février 2009

Groupe Microbiologie
Laboratoire M2C, UMR CNRS 6143
Bâtiment IRESE B, 2ème étage
UFR des Sciences - Université de Rouen
76821 Mont Saint Aignan
FRANCE
Tel : 33 (0) 2 32 76 94 53
Fax: 33 (0) 2 35 14 66 88
Josselin.bodilis@univ-rouen.fr

Sommaire

Introduction	3
I) Changement climatique global et estuaire de la Seine	3
A) A l'échelle planétaire	4
B) A l'échelle de la France.....	4
C) A l'échelle de l'estuaire de Seine	5
II) Microbiologie, santé humaine et estuaire de la Seine	5
A) Changement climatique et risque microbiologique dans les systèmes aquatiques	6
B) Risque microbiologique dans l'estuaire de la Seine.....	9
C) Perspective d'un changement climatique et risque microbiologique dans l'estuaire de la Seine	9
III) Ecologie microbienne et estuaire de la Seine	10
A) Changement climatique et écologie microbienne dans les systèmes aquatiques.....	10
B) Ecologie microbienne et estuaire de la Seine.....	11
C) Perspective d'un changement climatique et écologie microbienne dans l'estuaire de la Seine	11
Conclusions générales et recommandations.....	12
Références bibliographiques	13

Introduction

Dans le cadre de la 4^{ème} phase de Seine-Aval, l'analyse des effets du changement climatique a été retenue par les partenaires du GIP Seine-Aval comme un des thèmes prioritaires à développer. Cette analyse doit intégrer l'ensemble des changements globaux qui concernent toutes les modifications majeures engendrées tant par les activités anthropiques que par les facteurs naturels.

Face à la complexité de la problématique, une expertise collective a été mise en place avec pour objectifs, notamment, (i) de reformuler les questions de société issues des partenaires du GIP Seine-Aval en problématiques scientifiques et (ii) de définir les questions prioritaires en terme de recherche et orienter les projets du programme Seine-Aval.

Ce document s'inscrit dans cette démarche d'expertise collective en réalisant une synthèse bibliographique mono-disciplinaire sur les interactions possibles entre la microbiologie et les changements climatiques globaux dans le contexte d'un estuaire fortement anthropisé. Cette étude est préparatoire à la synthèse pluri-disciplinaire qui devra intégrer l'ensemble des réflexions et synthèses mono-disciplinaires.

Les microorganismes sont d'une importance (quantitative et qualitative) majeure dans l'ensemble des écosystèmes, de par leurs interactions avec les autres organismes vivants (notamment l'homme) et leurs fonctions dans les principaux cycles biogéochimiques. Ces interactions et fonctions ne résultent généralement pas de microorganismes isolés mais de populations et communautés microbiennes complexes dont la diversité est directement dépendante des conditions environnementales.

Une première partie (chapitre I) décrira brièvement les effets possibles des changements climatiques globaux sur l'estuaire de Seine afin de dégager une liste de paramètres géologiques, physiques, chimiques et socio-économiques susceptibles d'interagir avec une modification de la diversité microbienne.

Les changements climatiques globaux pourraient affecter la diversité microbiologique de l'estuaire de Seine sur deux grands aspects, en santé humaine (i) et aux niveaux du fonctionnement de l'écosystème (ii). Chacun de ces aspects feront l'objet d'un développement particulier, respectivement dans les chapitres II et III.

Enfin, la dernière partie de ce document comprendra une synthèse des chapitres II et III afin de dégager des questions scientifiques prioritaires dans le domaine de la microbiologie et du changement climatique.

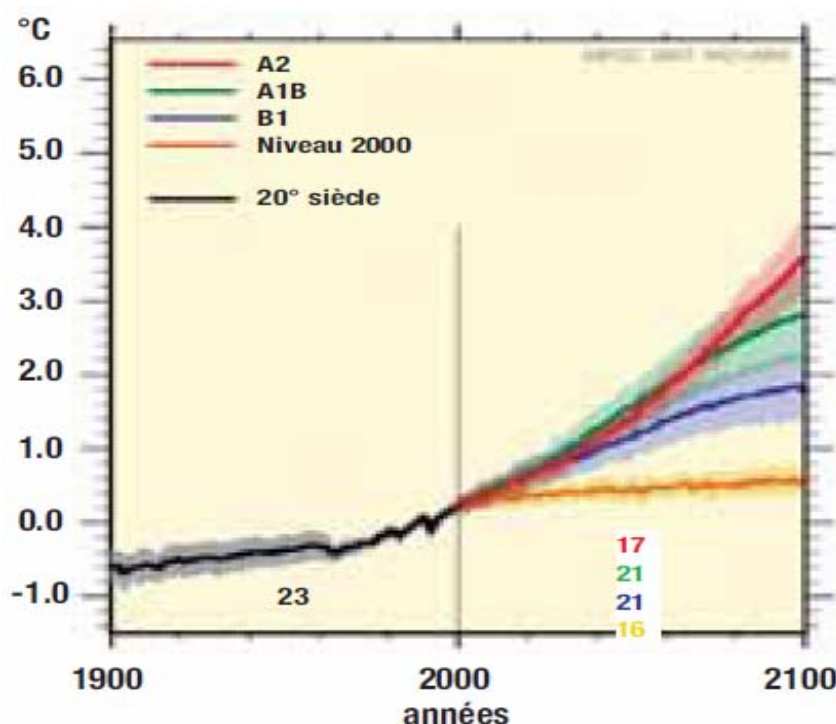
I) Changement climatique global et estuaire de la Seine

Dans ce rapport, la définition du changement climatique sera celle utilisée par le GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat ; <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-spm-fr.pdf>), c'est-à-dire un changement du climat qui peut être identifié par des **modifications des valeurs moyennes et/ou de la variabilité de ces propriétés**. Ces modifications peuvent être naturelles ou d'origine anthropique. Toutefois, nous n'aborderons pas dans ce rapport les mécanismes de ce réchauffement (effet de serre, par exemple) ou les origines anthropiques (émission des gaz à effet de serre, par exemple).

A) A l'échelle planétaire

La prédiction des évolutions climatiques futures passent nécessairement par **une étape de modélisation**. Un modèle climatique est une représentation simplifiée qui tient compte des principaux échanges d'énergie, d'eau et de carbone entre les différents compartiments terrestres (atmosphère, surfaces continentales, océans, glaciers et glace de mer). Ce modèle est ensuite soumis à **différents forçages** en fonction des scénarios testés, afin de **réaliser des simulations**.

Le GIEC a retenu 3 scénarios socio-économiques (A2, A1B et B) permettant de réaliser 3 simulations du changement climatique à l'échelle planétaire, sur une période d'un siècle. Le scénario A2 correspond à une augmentation soutenue des émissions de CO₂ tandis que ces émissions se stabilisent rapidement dans le scénario B1. Le scénario A1B est intermédiaire aux deux autres.



Ce graphique ne représente que les prédictions de changement de la température moyenne sur l'ensemble de la planète. Il est important de noter qu'il est davantage attendu une augmentation de la variabilité spatio-temporelle de la température. De plus d'autres événements climatiques (précipitations, tempêtes..) sont susceptibles d'avoir une action tout aussi importante sur les activités humaines.

B) A l'échelle de la France

Les simulations du GIEC ont été réalisées à une échelle globale avec une résolution spatiale de 300 km. Il est donc nécessaire d'ajuster ces modèles à l'échelle de la France en tenant compte des particularités régionales. Des modèles régionaux ont ainsi été réalisés, notamment l'ARPEGE (Météo-France) et LMDZ (Institut Pierre-Simon Laplace), qui ont respectivement des résolutions de 60 et 160 km. A partir de ces modèles, le projet national IMFREX (<http://medias.cnrs.fr/imfrex>) prévoit ainsi **une évolution des extrêmes climatiques**

avec, notamment, une augmentation de l'intensité, de la fréquence et de la durée des **vagues de chaleur estivales**. Il est également prédit une augmentation des **précipitations hivernales** dans la moitié nord du pays ainsi qu'une fonte précoce de la neige ce qui aura des conséquences importantes sur le cycle hydrologie.

C) A l'échelle de l'estuaire de Seine

Au niveau de l'estuaire de la Seine il est ainsi probablement attendu :

- Une **augmentation de la température moyenne** de quelques degrés (en fonction des scénarios socio-économiques) d'ici à 2100.
- une **augmentation de l'intensité, de la fréquence et de la durée des vagues de chaleur estivales**.
- Une **augmentation de la concentration en CO₂** atmosphérique et dissoute ce qui pourrait entraîner une **diminution du pH** de l'eau.
- Une augmentation de l'effet de serre induira une **augmentation des UV**.
- Comme il a été précisé dans le paragraphe précédent, les modèles régionaux prévoient un **débit globalement accru** dans les cours d'eau de la moitié nord de la France avec surtout des **crues de printemps plus précoces**.
- L'augmentation attendue de la variabilité du débit de la Seine entraînera des changements géomorphologiques avec localement des **sédimentations ou des remises en suspension importantes**.
- Une modification globale du niveau marin et/ou une modification du débit de la Seine entraîneront vraisemblablement un **déplacement du bouchon vaseux et du gradient de salinité**.
- Une **érosion des bassins versants** (précipitations violentes), l'imperméabilisation des sols (urbanisation), une **modification des pratiques agricoles**, une **évolution des systèmes d'épuration d'eaux usées**, ainsi que des remises en suspension de sédiments pourraient entraîner **des modifications importantes de l'apport en nutriments et en polluants** (métalliques ou organiques).
- Enfin, des vagues de chaleurs estivales et/ou un contexte socio-économique différent (augmentation du coût du transport, développement du tourisme,...) pourraient entraîner des **modifications de l'usage des eaux récréatives et donc de l'exposition de la population humaine**.

Cette liste de modifications climatiques se veut la plus exhaustive possible mais ne tient pas compte de l'amplitude et la probabilité d'apparition de ces modifications. Ces derniers points, qui mettront en évidence les **paramètres climatiques prioritaires**, seront définis par d'autres études mono-disciplinaires (notamment pour ce qui concerne l'aspect hydrologie).

II) Microbiologie, santé humaine et estuaire de la Seine

Les maladies infectieuses représentent la deuxième cause de mortalité dans le monde, juste après les maladies cardiovasculaires. Les agents microbiologiques responsables de ces maladies infectieuses (**bactéries, virus, protozoaires**) se **transmettent soit directement** (grippe, HIV, tuberculose,...), **soit indirectement, via des vecteurs biologiques** (moustiques, tiques, animaux) **ou non biologiques** (eau, sol, air). Les maladies infectieuses se transmettant

directement de l'homme à l'homme sont, *a priori*, moins susceptibles d'être influencés par une évolution climatique. **Ainsi, nous évoquerons seulement des agents pathogènes à transmission indirecte.** Toutefois, il faut noter que des mouvements migratoires et/ou un changement important des comportements humains pourraient affecter l'incidence de l'ensemble des maladies infectieuses.

Les microorganismes pathogènes provenant d'une contamination fécale étant généralement présents en faible quantité dans l'eau (et donc difficilement détectables), les normes de qualité des eaux privilégient actuellement une **recherche d'indicateurs de contamination fécale** (*E. coli* et *Enterococcus*, nouvelle directive européenne 2006/7/EC).

A) Changement climatique et risque microbiologique dans les systèmes aquatiques

Dans le cas des **maladies infectieuses à vecteur biologique**, comme la malaria (transmission par les moustiques), l'impact du climat est très complexe car la dynamique de transmission dépend d'une **relation tripartite** faisant intervenir le microorganisme pathogène, le vecteur et l'homme (Deubel and Rodhain, 1999). Ainsi une modification du climat peut perturber par exemple la répartition géographique et la longévité du vecteur ou de l'hôte et ainsi modifier la fréquence de l'infection (Kovats et al., 2001). De plus, la répartition géographique d'une maladie ne se superpose pas toujours à celle de son vecteur, ce qui complique davantage l'épidémiologie de ces maladies (Besancenot, 2007). Par exemple, les moustiques de la malaria sont présents sur le territoire français alors que la maladie y a disparu depuis longtemps (Rodhain, 2002).

D'une manière générale, les **facteurs climatiques prépondérants dans le contrôle de la transmission des maladies infectieuses à vecteur biologiques sont la température et le niveau de précipitations** (Gubler *et al.*, 2001 ; Sutherst, 2004).

Maladies à vecteur biologiques	Saisonnalité du déclenchement de la maladie	Mécanisme qui explique la saisonnalité	Bibliographie
Malaria (<i>Plasmodium</i> spp.)	Saison chaude et humide	Précipitation et température	Hoshen and Morse, 2004)
Virus de la dengue	Saison chaude	température	Watts et al., 1987
Virus du Nil occidental	Été/début automne dans les régions tempérées	Précipitation et température	Campbell et al., 2002
Virus encéphalite à tique	Printemps/été	température	Randolph et al., 2000

Maladies à vecteurs biologiques influencées par la saisonnalité (d'après Altizer et al., 2006).

Les micro-organismes responsables de **maladies infectieuses à vecteur non biologique** peuvent être distingués entre **microorganismes d'origine fécale (allochtone)** et **microorganismes ayant l'eau comme habitat principal (autochtone)**. De manière générale, le niveau de précipitations influence le transport et la dissémination des agents infectieux

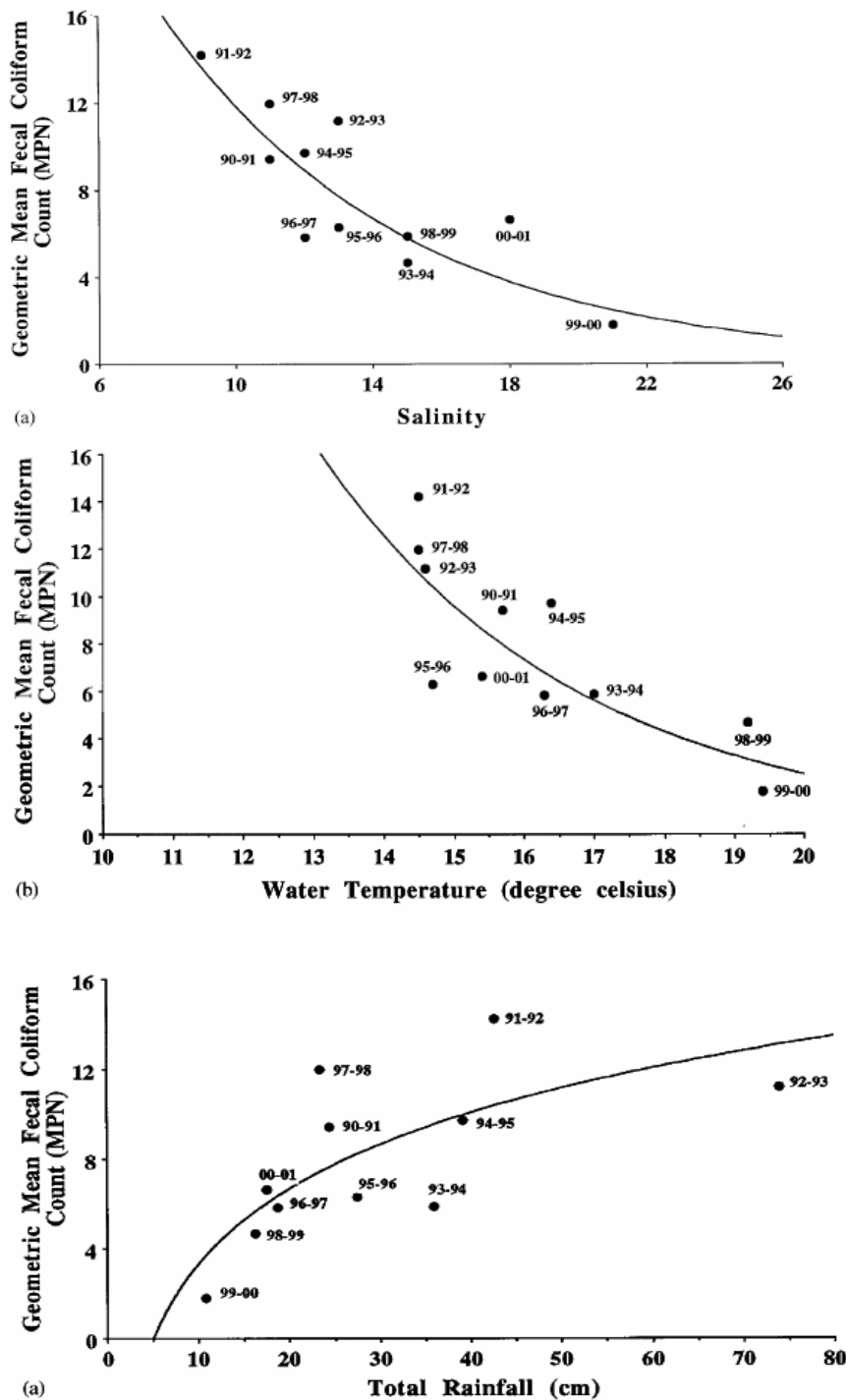
(allochtone et autochtone), alors que la température influence plutôt leur croissance (autochtone) ou leur survie (allochtone).

Ainsi, les maladies transmises par l'eau sont provoquées par des pathogènes qui sont présents dans l'eau de boisson ou les eaux récréatives dont la qualité et la disponibilité dépendent aussi du climat. **Les maladies infectieuses transmises par l'eau potable aux Etats-Unis montrent une saisonnalité bien marquée** (Rose et al., 2001). Par exemple, la bactérie qui est responsable du cholera (*Vibrio cholerae*) vit dans l'eau de mer (autochtone) et son cycle vital est strictement dépendante du climat (Wilson, 2001 ; Constantin de Magny *et al.*, 2008). Toujours chez *Vibrio* spp., il a également été mis en évidence une **association avec des copépodes**, la bactérie utilisant la chitine du zooplancton comme source de nutriments (Montanari *et al.*, 1999). **La modification des courants marins est donc susceptible d'influencer** également la distribution des copépodes en zone côtière et donc l'occurrence des *Vibrio*.

Groupe de pathogènes	Agent pathogène	Milieu aquatique	Impacts climatiques directs	Bibliographie
Virus	Virus entériques (ex. hépatite A)	Eaux stagnantes	Température, PH, salinité, UV	Brown et al., 2008
Bactéries	Vibrions, cyanobactéries	Eaux récréatives, eaux de consommation	Température, PH, salinité, UV, précipitations, courants marins	Hsieh et al., 2008 ; Almeida et al., 2007 ; Callaghan et al., 2004 ; Blackwell and Oliver, 2008 ; Constantin de Magny et al., 2008 ; Paerl et al., 2003 ; Montanari <i>et al.</i> , 1999
Protozoaires	<i>Cyclospora</i> , <i>Cryptosporidium</i> , <i>Naegleria</i>	Eaux récréatives, eaux de consommation	température	Boenigk et al., 2007

Principales maladies transmissibles par l'eau et qui peuvent être influencées par le climat (d'après Rose et al., 2001)

Enfin l'abondance des flores indicatrices de contaminations fécales montre également des variations saisonnières qui peuvent être reliées à des paramètres physico-chimiques particuliers (Chigbu et al., 2004 ; Noble et al., 2004). Ainsi, dans l'estuaire du Mississipi, il a été observé des **variations de la quantité des coliformes fécaux en fonction de la salinité et de la température** (relation inverse) **mais aussi en fonction des précipitations** (relation positive).



Relation entre le nombre de coliformes fécaux et la salinité, la température de l'eau ou la quantité de précipitations (d'après Chigbu *et al.*, 2004).

Récemment, il a été proposé une méthode en deux étapes pour mieux évaluer l'évolution des maladies infectieuses en fonction du changement climatique global (Dufour *et al.*, 2008). La première étape consiste à déterminer les maladies dont l'incidence ou la distribution géographique pourrait être affectées par des changements climatiques. La deuxième étape consiste à évaluer le risque réel de chacune de ces maladies par des études écologiques et épidémiologiques plus approfondies.

B) Risque microbiologique dans l'estuaire de la Seine

Concernant les flores indicatrices de contaminations fécales en estuaire de Seine, plusieurs études ont tenté d'évaluer la pertinence de ces indicateurs, c'est-à-dire la **corrélation entre le nombre de coliformes fécaux ou *E. coli*** (mais également les entérocoques ou *Clostridium*) **et la présence réelle de microorganismes pathogènes** (Berthe *et al.*, 2008 ; Touron *et al.*, 2007 ; Garcia-Armisen and Servais, 2006 ; Menon *et al.*, 2003). Il ressort de ces études une relation complexe principalement due à un comportement (survie, stress, fixation sur les particules...) différent entre la flore indicatrice et le pathogène recherché. Cette observation rejoint les résultats des études réalisées à partir d'autres estuaires (Chigbu *et al.*, 2004, 2005). De plus, il existe de nombreuses données de **suivi des coliformes fécaux (depuis 1977)** ou d'*E. coli* en estuaire de la Seine. Ces données proviennent de différentes sources et vont être prochainement regroupées sous forme d'une **base de données unique accessible à la communauté scientifique** (projet de SA4, coordonné par Fabienne Petit, M2C, Université de Rouen).

En ce qui concerne la détection des microorganismes pathogènes en estuaire de Seine, il a été **recherché et détecté *Salmonella*, *Listeria*, *Aeromonas*, *Giardia*, et *Cryptosporidium*** (Touron *et al.*, 2007, données SA). Il a été également initié une **recherche d'adénovirus** dans la Seine (Castignolle *et al.*, 1998).

Le **peu de données épidémiologiques** disponibles rend actuellement difficile l'analyse du risque microbiologique en estuaire de Seine. Par exemple, beaucoup de contaminations microbiennes donnant lieu à des gastro-entérites bénignes ne sont pas signalées et donc prises en compte dans les études épidémiologiques. Il sera tout d'abord **nécessaire de mieux définir les populations exposées**.

C) Perspective d'un changement climatique et risque microbiologique dans l'estuaire de la Seine

Comme il a été évoqué dans la première partie de ce document, un changement climatique global est susceptible de modifier, par l'intermédiaire de nombreux paramètres, la présence et l'état physiologique (virulence, état viable non cultivable) des microorganismes hydriques. La **salinité** et la **température** sont notamment des paramètres importants de la survie des microorganismes pathogènes d'origine fécale, tandis que le **niveau de précipitations** peut influencer sur les sources de contaminations. Au niveau de l'estuaire marin, d'autres paramètres peuvent également entrer en compte comme **les courants marins** qui peuvent modifier les apports microbiens sous forme libre ou associées ou d'autres organismes vivants (voir par exemple l'association copépode/vibron).

Quoi qu'il en soit l'estuaire de la Seine, comme tous les estuaires est un milieu complexe présentant une très grande variabilité spatiale (gradient de salinité, MES,...) et temporelle (marées, saison,...). Cette complexité rend son étude et sa modélisation extrêmement difficile. Cependant, des études antérieures ont générées des **données importantes sur les indicateurs de contaminations fécales qui peuvent actuellement être réanalysées sous une nouvelle perspective** en tentant de mieux dégager des paramètres clés, comme la température, la salinité ou le niveau de précipitation. **Il pourra ensuite être envisagé d'étudier spécifiquement des paramètres prioritaires (en fonction de la synthèse pluridisciplinaire) lors de campagnes *in situ* ou d'études en microcosmes.**

En ce qui concerne les microorganismes pathogènes d'origine fécale (allochtone), **des études épidémiologiques plus approfondies** pourraient mettre en évidence la nécessité de développer des méthodes de détection fine et un suivi systématique de certains pathogènes (notamment viraux).

Enfin, en ce qui concerne les microorganismes pathogènes ayant une origine non fécale (autochtones), comme *Vibrio*, *Legionella*, certaines cyanobactéries ou diatomées, leur présence est actuellement peu recherchée en Seine, car peu probable ou ne présentant pas, *a priori*, de risque pour l'homme. Par exemple ***Vibrio spp.*** ne se développent (relativement par rapport aux autres flores compétitives) que dans certaines conditions physico-chimiques qui semblent maintenant bien caractérisées (Hsieh *et al.*, 2008 ; Almeida *et al.*, 2007 ; Blackwell and Oliver, 2008 ; Constantin de Magny *et al.*, 2008). Ce genre bactérien a toutefois **développé de nombreuses stratégies lui permettant de survivre et de croître** en milieu hostile (notamment en parasitant les coquilles de copépodes). Il serait donc nécessaire **d'approfondir les connaissances sur les stratégies écologiques de ce pathogène** en estuaire de Seine. Pour d'autres flores comme *Legionella*, les cyanobactéries, ou les algues toxiques (diatomées), le risque pour l'homme **dépend essentiellement des activités humaines**, comme les eaux récréatives, les systèmes de réfrigération, et surtout la consommation de coquillages. Ce risque est évident susceptible d'évoluer dans l'avenir.

Pour **la problématique des toxines algales** (Ifremer, REPHY), liée au boom phytoplanctonique consécutif à une eutrophisation des eaux (Garnier, Seine Aval 3), le déterminisme de l'émergence des espèces toxiques (*Dinophysis*, *Alexandrium*,...) **est aujourd'hui mal connu**. Toutefois le niveau de précipitation (apport en nutriments) ainsi que la température influencera certainement la fréquence de ces blooms phytoplanctoniques.

III) Ecologie microbienne et estuaire de la Seine

Les bactéries jouent un rôle très important dans le fonctionnement des écosystèmes, dont l'écosystème estuarien. Ainsi, **les micro-organismes interviennent dans tous les grands cycles biogéochimiques** mais également **dans des fonctions écologiques de dépollution**.

Des changements climatiques modifieront très vraisemblablement la diversité spécifique microbienne. Cependant, les bactéries présentent une grande redondance fonctionnelle, c'est-à-dire que plusieurs espèces différentes peuvent réaliser des fonctions similaires. Une modification de la diversité n'entraîne donc pas nécessairement une modification durable du fonctionnement de l'écosystème. **Cette robustesse du système face aux perturbations est appelée « résilience »**. Un changement climatique global pourrait toutefois perturber l'écosystème au delà de cette résilience.

A) Changement climatique et écologie microbienne dans les systèmes aquatiques

L'étude des grands cycles biogéochimiques est indispensable à la compréhension du devenir de la matière organique rejetée dans l'estuaire mais c'est également un préalable à l'estimation de l'émission de gaz à effet de serre (CO₂, CH₄, NO₂). Ces cycles biogéochimiques, dont les cycles du carbone, de l'azote ou du soufre, sont étroitement dépendants des bactéries. Une modélisation globale du fonctionnement de l'estuaire passe donc nécessairement par l'étude de la diversité et de l'activité bactériennes. Les métabolismes microbiens sont **eux-mêmes contrôlés par différents facteurs physico-chimiques**, tels que la concentration en **ammonium** (fonction de la qualité des rejets des eaux usées), la **température**, le **pH**, l'**oxygène dissout**, la **salinité** ou la concentration en CO₂ (Rols *et al.*,

1994 ; Barnard *et al.*, 2005 ; Fontaine *et al.*, 2007 ; Laverman *et al.*, 2007 ; Paerl *et al.*, 2002). Tous ces paramètres sont susceptibles d'évoluer au cours d'un changement climatique global.

Par ailleurs, même s'il s'avère que le changement climatique global n'est pas suffisant pour dépasser la résilience de l'écosystème, **une simple augmentation de la température** augmentera directement l'activité des communautés microbiennes impliquées dans les cycles biogéochimiques (**augmentation de l'émission des gaz à effet de serre**).

Au sein de ces grands cycles de matière et d'énergie, certains contaminants métalliques ou organiques, tout en représentant généralement un flux minimes de matières, constituent des menaces importantes pour l'homme. Les bactéries jouent également un rôle important dans le devenir de ces micropolluants métalliques et organiques. Par exemple, les **bactéries sulfato-réductrices** qui agissent sur la spéciation et donc la biodisponibilité des métaux (formation de pyrites), ont une **diversité variable en fonction de la température et de la salinité** (Finke and Jorgensen, 2008 ; Jiang *et al.*, 2007). De même, il a été montré une diversité et une activité variables des **bactéries dégradant les HAPs en fonction de la température, de la salinité ou de la quantité de matières en suspension** (Coulon *et al.*, 2007 ; Shukla *et al.*, 2007 ; Xia *et al.*, 2007).

B) Ecologie microbienne et estuaire de la Seine

Depuis un certain nombre d'années le programme PIREN Seine (<http://www.sisyphe.upmc.fr/piren/presentation-piren-seine>) a encouragé le développement de la modélisation des cycles du carbone et de l'azote au niveau de la Seine et de petits bassins versants (ex. Orgeval). Ces études ont permis le développement de modèles prédictifs (Billen *et al.*, 2007 ; Flipo *et al.*, 2007). De part la complexité spatio-temporelle de l'estuaire de la Seine et l'importance des apports latéraux, ces modèles doivent cependant être adaptés à l'estuaire de la Seine.

En ce qui concerne les fonctions écologiques de l'estuaire de la Seine, des études sur les micro-organismes sulfato-réducteurs et les bactéries dégradant les HAP ont déjà été réalisées et mettent en évidence des variations de leur diversité en fonction des saisons ou des sites de prélèvements (Leloup *et al.*, 2005, 2006 ; Niepceon *et al.*, communication personnelle). Dans l'état actuel des connaissances, il semble cependant difficile de dégager l'impact relatif des différents paramètres physico-chimiques d'intérêt (salinité, température, apport de nutriments...) sur la diversité et les fonctions de ces micro-organismes.

C) Perspective d'un changement climatique et écologie microbienne dans l'estuaire de la Seine

En ce qui concerne l'étude des **cycles biogéochimiques du carbone et de l'azote**, il semble **nécessaire de disposer**, avant toutes études dédiées au changement climatique, **de modèles fiables simulant le fonctionnement actuel des cycles** du carbone et de l'azote en estuaire de Seine. Ces modèles devront bien entendu s'aider des études réalisées au cours des programmes PIREN Seine, mais aussi tenir compte des variabilités spatio-temporelles propres au milieu estuarien. Enfin, comme il a été envisagé pour l'étude du risque microbiologique, **il pourrait être nécessaire de réaliser des campagnes *in situ* supplémentaires ou des études en microcosmes dédiées à des paramètres prioritaires** (en fonction de la synthèse pluridisciplinaire et des résultats de simulations). Il semble aussi **nécessaire d'axer particulièrement ces études sur l'émission des gaz à effet de serre**, dont l'estimation

(quantitative et qualitative) est et sera probablement de plus en plus recommandée par les instances politiques.

En ce qui concerne les **fonctions écologiques** de l'estuaire de la Seine, très peu d'études ont tenté de relier ces fonctions à la diversité microbienne. Il est donc **nécessaire d'acquérir plus de données** sur ces fonctions écologiques dans les différents compartiments de l'estuaire. Devant la complexité de ces études, il pourrait être envisagé de **se focaliser, dans un premier temps, sur une ou deux fonctions écologiques particulières et quelques paramètres physico-chimiques prioritaires** (en fonction de la synthèse pluridisciplinaire). Le choix des fonctions écologiques à étudier pourraient notamment être motivé en fonction du risque actuel et futur du polluant concerné (toujours fonction de la synthèse pluridisciplinaire).

Conclusions générales et recommandations

De manière générale, il existe aujourd'hui un solide consensus scientifique autour des résultats du GIEC. Il semble donc raisonnable, pour tout gestionnaire d'un site naturel ou anthropisé, d'envisager et d'anticiper les effets prévisibles d'un changement climatique global. Cependant, il est également difficile de faire supporter par les collectivités et des partenaires privés des études sur des effets hypothétiques (et à long terme) d'un changement climatique. Un compromis peut toutefois être atteint **en cherchant à prioriser les études « sans regrets », c'est-à-dire les études qui ont également des retombées immédiates sur la gestion de l'estuaire de Seine.**

De part la complexité spatio-temporelle d'un estuaire, beaucoup d'études visant à améliorer les connaissances sur le fonctionnement actuel de l'estuaire peuvent aussi appréhender des effets prévisibles d'un changement climatique global. Ainsi, par exemple, toutes les campagnes de prélèvements prenant en compte le gradient de salinité naturel de l'estuaire lors du plan d'échantillonnage, peuvent théoriquement aussi apporter des informations sur les conséquences d'un déplacement hypothétique de ce gradient de salinité. Il en va de même pour des études en microcosmes qui visent à approfondir le rôle spécifique de paramètres précis.

Il conviendrait donc, lors des appels à projets du GIP Seine Aval, d'inciter davantage **les études tenant compte des paramètres physico-chimiques prioritaires retenus par l'étude pluridisciplinaire, c'est-à-dire les paramètres qui sont les plus susceptibles d'être impactés par un changement climatique global et qui ont, eux-mêmes, une forte probabilité de modifier la diversité et le fonctionnement de l'estuaire de la Seine.**

Les perspectives d'études à l'interface entre la microbiologie et les changements climatiques globaux sont multiples. Elles peuvent toutefois se regrouper en deux volets.

-l'**aspect sanitaire** pourrait être abordé (i) en **ré-analysant les données existantes** sur les indicateurs de contaminations fécales, (ii) en réalisant davantage **d'études épidémiologiques** et (iii) en incitant les **études sur l'écologie des pathogènes émergents.**

-l'**aspect écologie microbienne** pourrait comprendre (i) un **effort accru de modélisation des cycles biogéochimiques** avec un **bilan des émissions de gaz à effet de serre** (ii) des **études approfondies sur quelques fonctions écologiques clés** de l'estuaire de la Seine.

Références bibliographiques

- Almeida, M. A., Cunha, M. A. & Dias, J. M. (2007).** Bacterial productivity distribution during a rainy year in an estuarine system. *Microb Ecol* **53**, 208-220.
- Altizer, S., Dobson, A., Hosseini, P., Hudson, P., Pascual, M. & Rohani, P. (2006).** Seasonality and the dynamics of infectious diseases. *Ecol Lett* **9**, 467-484.
- Barnard, R., Leadley, P. W. & Hungate, B. A. (2005).** Global change, nitrification, and denitrification: A review. *Global Biogeochem Cycles* **19**.
- Berthe, T., Touron, A., Leloup, J., Deloffre, J. & Petit, F. (2008).** Faecal-indicator bacteria and sedimentary processes in estuarine mudflats (Seine, France). *Mar Pollut Bull* **57**, 59-67.
- Besancenot, J.-P. (2007).** *Notre santé à l'épreuve du changement climatique*. Paris: Delachaux et Niestle.
- Billen, G., Garnier, J., Nemery, J., Sebilo, M., Sferratore, A., Barles, S., Benoit, P. & Benoit, M. (2007).** A long-term view of nutrient transfers through the Seine river continuum. *Sci Total Environ* **375**, 80-97.
- Blackwell, K. D. & Oliver, J. D. (2008).** The ecology of *Vibrio vulnificus*, *Vibrio cholerae*, and *Vibrio parahaemolyticus* in North Carolina estuaries. *J Microbiol* **46**, 146-153.
- Boenigk, J., Jost, S., Stoeck, T. & Garstecki, T. (2007).** Differential thermal adaptation of clonal strains of a protist morphospecies originating from different climatic zones. *Environ Microbiol* **9**, 593-602.
- Brown, J. D., Goekjian, G., Poulson, R., Valeika, S. & Stallknecht, D. E. (2008).** Avian influenza virus in water: Infectivity is dependent on pH, salinity and temperature. *Vet Microbiol*.
- Callaghan, T. V., Bjorn, L. O., Chernov, Y. & other authors (2004).** Biodiversity, distributions and adaptations of Arctic species in the context of environmental change. *Ambio* **33**, 404-417.
- Campbell, G. L., Marfin, A. A., Lanciotti, R. S. & Gubler, D. J. (2002).** West Nile virus. *Lancet Infect Dis* **2**, 519-529.
- Castignolles, N., Petit, F., Mendel, I., Simon, L., Cattolico, L. & Buffet-Janvresse, C. (1998).** Detection of adenovirus in the waters of the Seine River estuary by nested-PCR. *Mol Cell Probes* **12**, 175-180.
- Chigbu, P., Gordon, S. & Strange, T. (2004).** Influence of inter-annual variations in climatic factors on fecal coliform levels in Mississippi Sound. *Water Res* **38**, 4341-4352.
- Chigbu, P., Gordon, S. & Tchounwou, P. B. (2005).** The seasonality of fecal coliform bacteria pollution and its influence on closures of shellfish harvesting areas in Mississippi Sound. *Int J Environ Res Public Health* **2**, 362-373.
- Constantin de Magny, G., Murtugudde, R., Sapiano, M. R. & other authors (2008).** Environmental signatures associated with cholera epidemics. *Proc Natl Acad Sci U S A* **105**, 17676-17681.
- Coulon, F., McKew, B. A., Osborn, A. M., McGenity, T. J. & Timmis, K. N. (2007).** Effects of temperature and biostimulation on oil-degrading microbial communities in temperate estuarine waters. *Environ Microbiol* **9**, 177-186.
- Deubel, V. & Rodhain, F. (1999).** Climate variations and dengue fever: Direct and indirect impacts. *Med Maladies Infect* **29**, 289-295.
- Dufour, B., Moutou, F., Hattenberger, A. M. & Rodhain, F. (2008).** Global change: impact, management, risk approach and health measures--the case of Europe. *Rev Sci Tech* **27**, 529-550.

- Finke, N. & Jorgensen, B. B. (2008).** Response of fermentation and sulfate reduction to experimental temperature changes in temperate and Arctic marine sediments. *Isme J* **2**, 815-829.
- Flipo, N., Even, S., Poulin, M., Thery, S. & Ledoux, E. (2007).** Modeling nitrate fluxes at the catchment scale using the integrated tool CAWAQS. *Sci Total Environ* **375**, 69-79.
- Fontaine, S., Barot, S., Barre, P., Bdioui, N., Mary, B. & Rumpel, C. (2007).** Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply. *Nature* **450**, 277-280.
- Garcia-Armisen, T., Thouvenin, B. & Servais, P. (2006).** Modelling faecal coliforms dynamics in the Seine estuary, France. *Water Sci Technol* **54**, 177-184.
- Gubler, D. J., Reiter, P., Ebi, K. L., Yap, W., Nasci, R. & Patz, J. A. (2001).** Climate variability and change in the United States: potential impacts on vector- and rodent-borne diseases. *Environ Health Perspect* **109**, 223-233.
- Hoshen, M. B. & Morse, A. P. (2004).** A weather-driven model of malaria transmission. *Malar J* **3**, 32.
- Hsieh, J. L., Fries, J. S. & Noble, R. T. (2008).** Dynamics and predictive modelling of *Vibrio* spp. in the Neuse River Estuary, North Carolina, USA. *Environ Microbiol* **10**, 57-64.
- Jiang, H., Dong, H., Yu, B., Liu, X., Li, Y., Ji, S. & Zhang, C. L. (2007).** Microbial response to salinity change in Lake Chaka, a hypersaline lake on Tibetan plateau. *Environ Microbiol* **9**, 2603-2621.
- Kovats, R. S., Campbell-Lendrum, D. H., McMichael, A. J., Woodward, A. & Cox, J. S. (2001).** Early effects of climate change: do they include changes in vector-borne disease? *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* **356**, 1057-1068.
- Laverman, A. M., Canavan, R. W., Slomp, C. P. & Cappellen, P. V. (2007).** Potential nitrate removal in a coastal freshwater sediment (Haringvliet Lake, The Netherlands) and response to salinization. *Water Res* **41**, 3061-3068.
- Leloup, J., Petit, F., Boust, D., Deloffre, J., Bally, G., Clarisse, O. & Quillet, L. (2005).** Dynamics of sulfate-reducing microorganisms (*dsrAB* genes) in two contrasting mudflats of the Seine estuary (France). *Microb Ecol* **50**, 307-314.
- Leloup, J., Quillet, L., Berthe, T. & Petit, F. (2006).** Diversity of the *dsrAB* (dissimilatory sulfite reductase) gene sequences retrieved from two contrasting mudflats of the Seine estuary, France. *FEMS Microbiol Ecol* **55**, 230-238.
- Montanari M.P., Pruzzo C., Pane L. & Colwell R.R. (1999)** Vibrios associated with plankton in a coastal zone of the Adriatic Sea (Italy). *FEMS Microbiol Ecol* **29**, 241-247.
- Menon, P., Billen, G. & Servais, P. (2003).** Mortality rates of autochthonous and fecal bacteria in natural aquatic ecosystems. *Water Res* **37**, 4151-4158.
- Noble, R. T., Lee, I. M. & Schiff, K. C. (2004).** Inactivation of indicator micro-organisms from various sources of faecal contamination in seawater and freshwater. *J Appl Microbiol* **96**, 464-472.
- Paerl, H. W., Dyble, J., Twomey, L., Pinckney, J. L., Nelson, J. & Kerkhof, L. (2002).** Characterizing man-made and natural modifications of microbial diversity and activity in coastal ecosystems. *Antonie Van Leeuwenhoek* **81**, 487-507.
- Paerl, H. W., Steppe, T. F., Buchan, K. C. & Potts, M. (2003).** Hypersaline cyanobacterial mats as indicators of elevated tropical hurricane activity and associated climate change. *Ambio* **32**, 87-90.
- Randolph, S. E., Green, R. M., Peacey, M. F. & Rogers, D. J. (2000).** Seasonal synchrony: the key to tick-borne encephalitis foci identified by satellite data. *Parasitology* **121** (Pt 1), 15-23.

Rodhain, F. (2002). Mécanismes de transmission des maladies vectorielles. *Environnement, Risque et Santé* numéro spécial, 32-35.

Rols, J.-L., Mauret, M., Rhamani, H., NGuyen, K., Capdeville, B., Cornier, J. C. & Deguin, A. (1994). Population dynamics and nitrite build-up in activated sludge and biofilm processes for nitrogen removal. *Water Science and Technology* **29**, 43-51.

Rose, J. B., Epstein, P. R., Lipp, E. K., Sherman, B. H., Bernard, S. M. & Patz, J. A. (2001). Climate variability and change in the United States: potential impacts on water- and foodborne diseases caused by microbiologic agents. *Environ Health Perspect* **109 Suppl 2**, 211-221.

Shukla, P., Gopalani, M., Ramteke, D. S. & Wate, S. R. (2007). Influence of salinity on PAH Uptake from water soluble fraction of crude oil in *Tilapia mossambica*. *Bull Environ Contam Toxicol* **79**, 601-605.

Sutherst, R. W. (2004). Global change and human vulnerability to vector-borne diseases. *Clin Microbiol Rev* **17**, 136-173.

Touron, A., Berthe, T., Gargala, G., Fournier, M., Ratajczak, M., Servais, P. & Petit, F. (2007). Assessment of faecal contamination and the relationship between pathogens and faecal bacterial indicators in an estuarine environment (Seine, France). *Mar Pollut Bull* **54**, 1441-1450.

Watts, D. M., Burke, D. S., Harrison, B. A., Whitmire, R. E. & Nisalak, A. (1987). Effect of temperature on the vector efficiency of *Aedes aegypti* for dengue 2 virus. *Am J Trop Med Hyg* **36**, 143-152.

Wilson, M. (2001). *Ecology and infectious disease. Ecosystem change and public health: a global perspective.* Baltimore: John Hopkins University Press.