

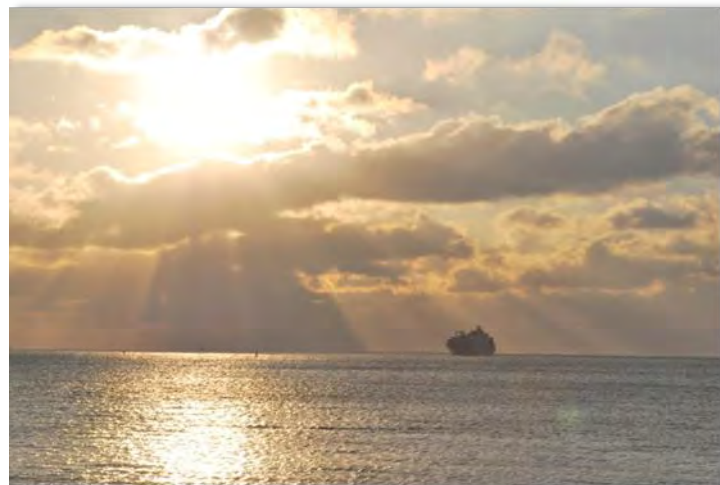
Rapport Seine-Aval 4



CLIMAT

Les effets du changement climatique
dans le contexte des changements globaux.

Expertise collective sur l'estuaire
de la Seine.



Coordination : B. Laignel & S. Souissi



Mars 2010

GIP Seine-Aval
Pôle Régional des Savoirs
115 Bd de l'Europe
76 100 - Rouen

tel : 02 35 08 37 64
<http://www.seine-aval.fr>

INTRODUCTION	3
I. DES FORÇAGES CLIMATIQUES A L'EVOLUTION DES PARAMETRES HYDROLOGIQUES	5
1. Naissance d'un consensus autour de scénarii d'évolution probable.....	5
2. Evolution des paramètres hydroclimatiques suivant plusieurs approches méthodologiques	7
a) Méthodologie	7
b) Résultats	9
3. Impact du changement climatique sur la qualité de l'eau et risque sanitaire potentiel.....	13
a) Evolution de la qualité de l'eau.....	13
b) Impact de l'évolution des microorganismes sur la qualité de l'eau et risque sanitaire associé	15
4. Bilan et perspectives.....	17
II. REPONSES DES PEUPELEMENTS AUX MODIFICATIONS DU MILIEU	19
1. Modifications attendues des habitats sous les forçages climatiques actuels	20
a) Influence de la température	20
b) Les précipitations et la qualité de l'eau	21
c) Altération de la qualité de l'atmosphère et modification des radiations solaires	21
d) Effets d'une élévation du niveau marin.....	22
e) Accroissement du CO ₂	23
f) Synergie entre facteurs	23
2. Conséquences et tendances d'évolution déjà observées sur les peuplements	24
a) Exemple de l'avifaune.....	24
b) La flore et la végétation.....	28
3. Apports de la modélisation : le cas de l'ichtyofaune	32
4. Le plancton.....	34
5. Bilan et recommandations	37
III. UN MILIEU ETROITEMENT LIE A SON CONTEXTE SOCIO-ECONOMIQUE	39
1. Quelle prise en compte du changement climatique par les acteurs aujourd'hui ? ..	39
a) Une enquête auprès des acteurs porteurs d'enjeux concernés : premiers résultats	39
b) Une observation des perceptions par les habitants : un chantier à monter.....	42
2. Quelles transformations socio-économiques, liées ou non aux évolutions climatiques, peut-on anticiper ?	46
a) Exemple d'un modèle économique pour simuler la réponse de l'économie du territoire au changement climatique	46
b) Des scénarii de transformation à long terme pour identifier les vulnérabilités principales et les ruptures possibles	49
IV. CONCLUSION	54

Introduction

Parmi les préoccupations environnementales majeures de ces dernières décennies, le changement climatique tient une part particulièrement importante, notamment du fait des incertitudes liées aux phénomènes mis en jeu et de leurs conséquences potentiellement importantes sur l'environnement et sur l'économie. La communauté scientifique s'accorde à dire qu'il s'agit bel et bien d'une tendance réelle et inéluctable, mais la quantification du phénomène reste encore approximative en fonction des domaines d'études et même entre scientifiques d'une même discipline. Il n'en demeure pas moins que de nombreuses observations témoignent d'ores et déjà de changements majeurs (augmentation des températures atmosphériques et océaniques, modification de la pluviométrie, changements des structures et/ou compositions des populations, impacts sur les rendements agricoles...) et les travaux du GIEC permettent d'en avoir une vision relativement synthétique à l'échelle du globe. Néanmoins à des échelles plus restreintes, l'analyse de la bibliographie met en exergue la difficulté d'avoir une vision exhaustive du phénomène, du fait de l'hétérogénéité des méthodes et des échelles spatiales utilisées, et de sujets d'études trop précis, ciblant une région particulière ou un thème précis. De plus, du fait de l'émergence récente de ces interrogations, beaucoup d'études sont encore en phase de finalisation et ne sont pas encore accessibles.

Les estuaires, de par leur nature d'interface entre le domaine continental et le domaine marin, sont des milieux particulièrement complexes, encore trop peu investigués par la recherche scientifique en matière de changement climatique. Pourtant, à l'image de l'estuaire de la Seine, il s'agit en général de régions présentant un fort intérêt socio-économique et des enjeux certains en matière de biodiversité. Les zones littorales faisant partie des zones les plus exposées à une montée du niveau marin, les conséquences sur leur morphologie et les dommages physiques sur l'ensemble du bâti (infrastructures industrielles, touristiques, habitations...) pourraient être très importants. La pression exercée par les activités humaines rend néanmoins difficile la déconvolution des facteurs d'influence, ce qui ne permet pas toujours de distinguer quelles transformations résultent du changement climatique, et lesquelles attribuer à d'autres facteurs tels que la pollution, l'urbanisation, les grands aménagements portuaires, le tourisme, etc.

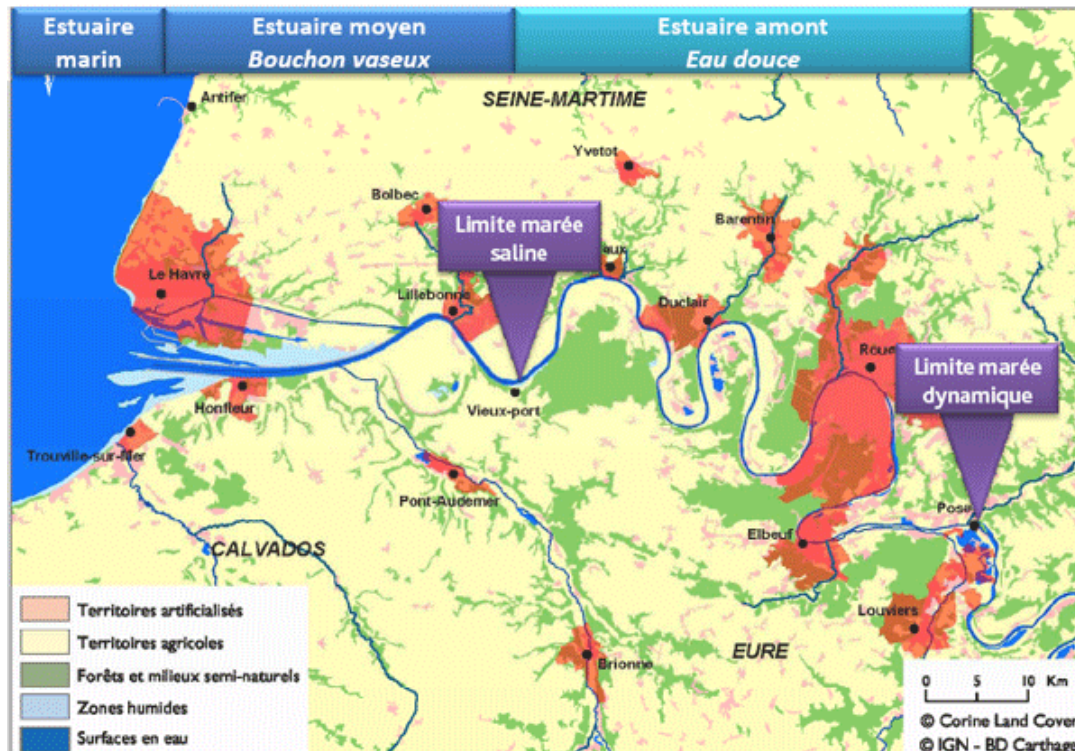
Menée suivant une approche pluridisciplinaire, la présente expertise s'inscrit dans une démarche globale visant à faire un état des lieux des connaissances existant autour de la problématique des effets du changement climatique sur les fleuves et les grands estuaires, et en particulier sur l'estuaire de la Seine. Elle réunit plusieurs équipes travaillant sur des thèmes différents : l'hydro-climatologie, la qualité de l'eau, la microbiologie, l'hydrobiologie, l'ichtyologie, l'avifaune, la flore et la végétation, l'économie, la sociologie et la prospective. Ce bilan de connaissances se propose d'apporter les premiers éléments de réponse aux questions posées par les partenaires du Groupement d'Intérêt Public Seine-Aval, et de définir de nouvelles orientations de recherche en fonction des limites et lacunes identifiées, ceci afin d'améliorer les connaissances sur ce sujet et de contribuer à une meilleure compréhension du phénomène par les acteurs du territoire.

L'estuaire de la Seine, défini comme la zone d'influence de la marée dynamique, sera ici délimité géographiquement de la manière suivante :

- à l'amont, par le barrage de Poses
- à l'aval, au tiers oriental de la baie de Seine, soit la zone comprise au Sud d'un parallèle à Antifer et à l'Est du méridien passant à Ouistreham

- latéralement, à tous les bassins versants internes au système estuarien et leurs milieux associés (zones connexes : vasières, zones humides, zones de confluence des affluents de l'estuaire interne).

Afin de garder une certaine cohérence, ces limites peuvent néanmoins être étendues en fonction des domaines de recherche (extension au bassin versant amont, à la baie de Seine).



Carte 1 : Délimitation longitudinale de l'estuaire de la Seine et des trois zones définies par des conditions de salinité différentes

Dans le but d'identifier d'ores et déjà les enjeux et secteurs socio-économiques dominants, la figure 1 propose une représentation possible du système « estuaire de la Seine ». Parmi les enjeux dominants, le transport multimodal tient une part essentielle dans l'économie, de par son façonnement autour de grands pôles regroupant les activités portuaires, logistiques et industrielles (activités de stockage, pétrochimiques, de construction automobile...). L'ouverture du territoire vers le monde industriel le rend fortement dépendant vis-à-vis des activités commerciales et de l'énergie, en particulier du pétrole. Par ailleurs, la gestion de l'eau est un enjeu primordial, compte tenu des besoins agricoles (et de la pollution associée), de la demande d'eau potable des grands pôles urbains, des besoins des industries et des activités portuaires.

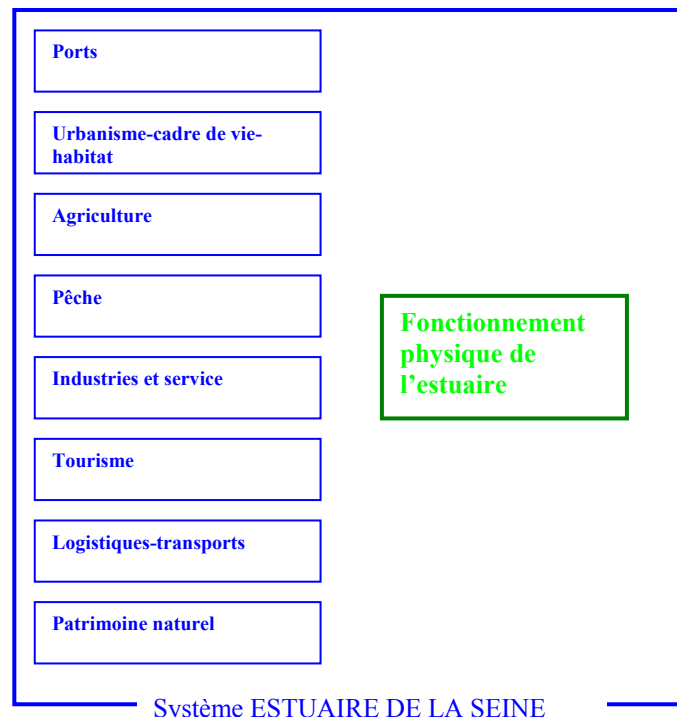


Figure 1 : Structure interne du système "Estuaire de la Seine": les secteurs d'activité socio-économiques

Le patrimoine naturel représente ici les aspects liés à l'écosystème (état de la biodiversité, qualité des milieux, fonctions environnementales, etc.) qui se traduisent généralement par la notion de biens et services rendus par l'estuaire.

Quant au fonctionnement physique, il ne s'agit pas à proprement parler d'un secteur d'activité socio-économique de l'estuaire de la Seine, mais davantage d'un domaine structurant dans l'organisation géographique du territoire (dépendance des secteurs pour leur implantation physique et vis-à-vis de leur utilisation de l'eau).

I. Des forçages climatiques à l'évolution des paramètres hydrologiques

1. Naissance d'un consensus autour de scénarii d'évolution probable

Dès lors que la communauté scientifique a observé un réchauffement du climat, i.e. une augmentation des températures atmosphérique et océanique à l'échelle du globe, l'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)¹ a été créé afin de synthétiser la littérature scientifique et technique relative au changement climatique, d'en évaluer les conséquences environnementales et socio-économiques et de proposer des stratégies pour palier au phénomène. L'ensemble de ces travaux est regroupé dans quatre rapports principaux, dont le dernier a été édité en 2007. Des rapports spéciaux, des documents techniques et méthodologiques sont également disponibles.

La réalité du changement climatique est désormais sans équivoque et fait l'objet d'un consensus affirmé. De nombreux phénomènes témoignent d'ores et déjà de cette évolution : hausse des températures moyennes océaniques et atmosphériques, fonte massive de la neige et de la glace, élévation du niveau moyen de la mer,...

Jugés comme une référence pour la plupart des gouvernements, des scientifiques et des experts, les travaux du GIEC permettent de définir des bases de travail communes au sein de la communauté internationale. Quatre grandes hypothèses d'évolution socio-économique à

¹ Ou GIEC en français : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

l'échelle mondiale ont été retenues par le GIEC à l'horizon 2100 (cf. figure 2), sans prendre en compte les initiatives climatiques supplémentaires récentes, comme la Convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques ou encore le protocole de Kyoto concernant les émissions.

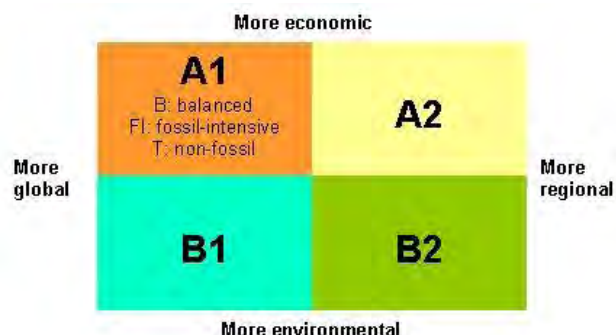


Figure 2 : scénarii du *Special Report on Emissions Scenarios (SRES)*, GIEC, 2000

Chaque patron d'évolution se traduit de manière différente sur la croissance et l'économie mondiale et implique des évolutions différentes de la démographie, comme illustré dans le tableau 1.

A1	Croissance mondiale très rapide, sans réorientation environnementale Introduction de nouvelles technologies => distinction de 3 groupes selon les ressources énergétiques utilisées : combustibles fossiles majoritaires (FI), autres sources (T), et répartition équilibrée (B)	Mondialisation => convergence entre régions et homogénéisation du revenu par habitant	Croissance jusqu'au milieu du siècle puis diminution de la population
A2	Croissance économique sans virage environnemental. Croissance par habitant et évolution technologique plus lentes	Autosuffisance et préservation des identités locales => maintien des différences de revenus	Accroissement continu de la population mondiale
B1	Croissance économique mondiale avec réorientation environnementale. => vers une économie de services et d'information. Introduction de technologies plus propres , utilisation raisonnée des ressources.	Politique mondiale vers une viabilité économique, sociale et environnementale. Homogénéisation du revenu par habitant	Croissance jusqu'au milieu du siècle puis diminution de la population
B2	Développement économique intermédiaire : politique régionale en faveur de l'environnement Evolution technologique moins rapide et plus diverse que pour A1 et B1. Orientation vers une protection de l'environnement et une équité sociale	Politique locale vers une viabilité économique, sociale et environnementale, mais maintien des différences de revenu par habitant	Croissance continue mais plus lente que pour A2

Tableau 1 : contexte général relatif à chaque scénario proposé par le GIEC

Chaque trajectoire socio-économique mondiale possible peut ensuite se traduire par des schémas d'évolution de la concentration en gaz à effet de serre (GES), responsables en grande partie du réchauffement planétaire observé depuis le milieu du XX^{ième} siècle. Ensuite, à partir des différents patrons d'évolution de la concentration en GES, des Modèles de Circulation Générale de l'Atmosphère et des Modèles Globaux de la Circulation des Océans, on aboutit à différents scénarii d'évolutions possibles du climat et de ses caractéristiques. L'IPCC (2001, 2007) évalue l'augmentation de la température globale de la surface de la Terre, d'ici 2100, entre 1,1 et 6,4°C, mais de façon plus probable entre 1,8 et 4°C. Il est important de noter que selon le GIEC, une réduction des émissions de GES ne pourra inverser la tendance actuelle :

compte tenu de leur durée de vie dans l'atmosphère, les effets des émissions passées et futures devraient se faire ressentir pendant plus d'un millénaire. A partir de ces différents scénarii et des modèles existants, l'ONERC (Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique) a pu proposer une évolution des caractéristiques climatiques attendues au niveau global et en particulier au niveau national².

2. Evolution des paramètres hydroclimatiques suivant plusieurs approches méthodologiques

a) Méthodologie

Les paramètres climatiques et hydrologiques les plus couramment utilisés dans la littérature sont la température atmosphérique, les précipitations et le débit des fleuves, car il s'agit des paramètres les plus mesurés sur de longues périodes. Pour exploiter les données vis-à-vis des fluctuations climatiques, il est communément admis que des enregistrements d'une durée minimum de 30 ans sont nécessaires. D'autres paramètres peuvent toutefois être intégrés : la température des eaux marines et continentales, le niveau des stocks d'eau (niveau de la mer et des nappes souterraines), la salinité,...

Actuellement, peu d'études hydroclimatiques concernent la partie estuarienne des fleuves, en raison du grand nombre de paramètres à intégrer pour aboutir à des relations valides et à des modèles relativement fiables. Sur le bassin versant de la Seine, les principaux programmes de recherche traitant des effets du changement climatique sont le programme Seine-Aval dans lequel s'inscrit cette expertise, le projet RExHySS³, inclus dans un programme du MEEDDM ciblé sur la gestion et l'impact du changement climatique, et le projet GICC-Seine. Le projet RExHySS s'intéresse à l'impact du changement climatique sur la distribution des événements extrêmes dans les bassins versants de la Seine et de la Somme, en termes de crue, d'étiage et de sécheresse en particulier. Ce projet présente l'avantage de tenter de répondre directement aux questions des acteurs locaux (aménagement du territoire et gestion de l'eau essentiellement) et de considérer des paramètres habituellement peu intégrés dans les études hydroclimatiques tels que l'évapotranspiration. Au sein du projet GICC-Seine, les travaux se concentrent sur l'hydrologie de la Seine, sur les flux biogéochimiques et la qualité des eaux, en lien avec le changement climatique mais également avec les activités anthropiques et en particulier l'agriculture.

Deux grandes approches complémentaires sont usuellement employées lorsqu'on s'intéresse au climat et à son impact sur les hydrosystèmes :

- **l'analyse des données historiques** (méthode rétrospective) : basée sur l'analyse de séries chronologiques de paramètres hydroclimatiques, cette approche permet de dégager des tendances passées et présentes, des cyclicités et des ruptures, l'occurrence d'événements extrêmes (crues, sécheresses) et de définir des relations expliquant l'évolution de ces caractéristiques par rapport à leur environnement. En particulier, il peut résulter de cette phase la mise en évidence d'une relation entre le climat et l'évolution d'un paramètre abiotique ou biotique.
- la **modélisation** (méthode prospective) : elle propose une simulation de l'évolution future de paramètres physiques (précipitations, températures, niveau marin...).

² *Impacts du changement climatique, adaptation et coûts associés en France, 2008*

³ = Impact du changement climatique sur les Ressources en eau et les Extrêmes Hydrologiques dans les bassins de la Seine et de la Somme.

Parmi les approches basées sur l'analyse des enregistrements historiques, la littérature fait référence à trois méthodes principales : la caractérisation des régimes hydrologiques, l'hydrologie stochastique (ou méthode probabiliste) et la méthode déterministe.

La caractérisation des régimes hydrologiques permet de mieux comprendre le fonctionnement d'un fleuve et de son bassin versant et la relation avec les grands régimes climatiques (indices climatiques NAO, ENSO,...). L'approche stochastique ou probabiliste est basée sur l'ajustement d'une loi statistique à un paramètre donné (précipitations, débits,...) et a pour objectif de prévoir la probabilité d'occurrence de certaines valeurs, moyennes et extrêmes. Enfin, l'approche déterministe regroupe des techniques très variées, de tests de tendance à l'utilisation de techniques de traitement du signal, destinées à décrire précisément les modalités des variations temporelles des signaux (climatiques, hydrométéorologiques, niveau marin,...). Les analyses spectrales (Fourier, ondelettes...) qui appartiennent à la dernière catégorie, renseignent sur les modes de variabilité (périodicités et ruptures dans les signaux hydrologiques) et identifient la relation avec les fluctuations climatiques à grande échelle (indices climatiques), avec l'impact anthropique et les caractéristiques propres de filtrage du bassin versant.

L'approche modélisatrice repose quant à elle sur la construction d'un modèle de fonctionnement du système ciblé (bassin versant, écosystème,...), paramétré à partir de données enregistrées caractéristiques de ce système (précipitations, débits, caractéristiques et utilisation du sol, géologie,...). Ce modèle est ensuite soumis à un scénario climatique plus ou moins pessimiste, basé sur l'hypothèse d'une augmentation plus ou moins forte des principaux gaz à effet de serre et aérosols dans l'atmosphère au cours du XXI^{ème} siècle. Cette articulation d'un modèle du climat et d'un modèle du système étudié permet de projeter le devenir du fonctionnement de ce système selon plusieurs hypothèses d'évolution du climat. Une étape importante dans ce cadre est celle de la régionalisation des scénarii climatiques produits par les modèles globaux vers l'échelle du système ciblé (méthode de la descente d'échelle).

Les modèles climatiques globaux qui permettent de décrire l'évolution du climat à long terme sont basés sur le couplage de quatre sous-modèles dédiés aux principaux compartiments du système climatique, en particulier l'océan et l'atmosphère, afin d'obtenir un modèle décrivant au mieux les interactions entre ces compartiments : les Modèles de Circulation Générale de l'Atmosphère (MCGA), les Modèles de Circulation Générale des Océans (MCGO), les modèles de banquise, et les modèles traduisant l'effet de la végétation et des sols. L'élaboration des modèles climatiques globaux nécessite dans un premier temps une validation de chacun des modèles le composant.

En France, deux modèles couplés ont été intégrés pour l'étude de la réponse transitoire du système climatique à l'augmentation du gaz carbonique. Il s'agit, d'une part, du modèle atmosphérique du LMD⁴ couplé au modèle océanique du Lodyc (Laboratoire d'Océanographie Dynamique et de Climatologie), et d'autre part, du modèle atmosphérique ARPEGE du CNRM (Centre National de Recherche Météorologique) couplé au même modèle océanique, à l'aide du coupleur Oasis développé par le Cerfacs⁵. Cependant, l'application à une échelle régionale reste limitée en partie du fait d'une mauvaise représentation de l'orographie et des conditions d'occupation du sol (type de végétation et type de sol), dont l'influence est prépondérante en Europe (influence des chaînes de montagne, des mers et des océans). Jusqu'à présent, le modèle le mieux adapté pour intégrer l'influence de ces éléments utilise une version non homogène du modèle ARPEGE-Climat.

⁴ Laboratoire de Météorologie Dynamique, *Masson et Joussaume, 1997*

⁵ Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique, *Barthelet et al., 1998*

b) Résultats

Le tableau suivant synthétise l'état des connaissances sur l'évolution passée et future des principaux paramètres hydrologiques et climatiques, suivant les deux méthodologies présentées précédemment (rétrospective et prospective) et selon deux échelles, à l'échelle globale et de grandes régions géographiques d'une part, à l'échelle nationale et régionale (bassin de la Seine) d'autre part. Malgré l'hétérogénéité des méthodes et des échelles spatiales utilisées, le sens d'évolution des paramètres étudiés est sensiblement identique.

	Méthodes rétrospectives		Méthodes prospectives	
	Echelle globale	France - Seine	Echelle globale	France - Seine
Température atmosphérique	Augmentation moyenne de 0,6°C au XX ^{ième} siècle (+ 0.05°C/décade) (1906-2005 : + 0,74 °C), marquée par 2 périodes de réchauffement (1910-1940 ; à partir de 1970). Dernière décennie du XX ^{ième} siècle enregistrée comme la plus chaude. Disparités spatiales : augmentation de T° plus importante dans la région polaire de l'hémisphère nord (+ 1,5 à 2 °C).	En France, augmentation moyenne de T° de 0,7 à 1,1°C, répartie de façon hétérogène sur le territoire. Tendance statistiquement significative à l'augmentation des T° sur le bassin de la Seine depuis le début ou la moitié du XX ^{ième} siècle (selon la longueur des chroniques des stations).	+ 1,1 à 6,4°C et plus probablement +1,8 à 4°C d'ici 2100 ⁶ , en fonction de l'évolution de la quantité de GES. Le réchauffement pourrait être moins important selon certains scientifiques, du fait notamment de phénomènes de rétroaction compensant l'effet de serre.	En France : + 3 à 5°C d'ici 2100. Sur le bassin versant de la Seine : + 2 à 4°C d'ici 2100. Augmentation probable du nombre de jours de forte chaleur et diminution accrue du nombre moyen de jours de gel et de neige.
Précipitations	Intensification des précipitations en particulier ces dernières décennies, en réponse à une accélération du cycle hydrologique (hausse des températures => évaporation plus intense et sursaturation de l'atmosphère en vapeur d'eau) : + 3%. Disparités spatiales : intensification aux hautes latitudes et zones équatoriales, stagnation ou ralentissement dans zones entre 20 et 45° de latitude. En Europe, dipôle : assèchement méditerranéen et humidification de l'Ouest et du Nord ⁷ ces 15 dernières années.	Aucune tendance significative sur les données enregistrées localement sur le bassin aval de la Seine. Rupture dans le régime pluviométrique du bassin versant de la Seine dans les années 90.	Accélération attendue du cycle de l'eau et des précipitations. Accentuation des différences régionales : zones équatoriales et pôles plus humides, zones méditerranéennes et tropicales plus sèches. Accentuation du dipôle européen : assèchement du Sud et humidification du Nord.	Bassin versant de la Seine d'ici 2100 : diminution des précipitations annuelles (-12%), diminution des précipitations estivales, incertitudes en hiver ⁸ . Augmentation du nombre de jours sans précipitation et persistance plus importante des épisodes secs.
Evénements extrêmes	Pas de consensus	Pas de tendance significative sur la fréquence et l'intensité des tempêtes ces 50 dernières années.	Augmentation probable des événements extrêmes, mais pas de consensus.	

⁶ source Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2001, 2007

⁷ Confirmation de l'importance de la NAO sur les précipitations, l'indice étant en phase positive depuis 1990.

⁸ Le Nord et le Nord-Ouest de la France se situent dans une zone de transition où les incertitudes sur l'évolution du cycle de l'eau sont grandes.

	Méthodes rétrospectives		Méthodes prospectives	
	Echelle globale	France - Seine	Echelle globale	France - Seine
Débits	Augmentation globale du débit des fleuves depuis 1920, excepté en Europe (diminution) et en Afrique (stabilisation) ⁹ . Disparités spatiales : augmentation significative pour les hautes latitudes et la zone équatoriale, stagnation voire diminution dans les latitudes moyennes et subtropicales.	Tendance statistiquement significative à l'augmentation du débit de la Seine et de ses affluents (lorsque les chroniques sont suffisamment longues). Augmentation du débit moyen de la Seine depuis les années 1946 : +10 à +30% selon la tendance ajustée. Observation de 2 ruptures dans le régime hydrologique de la Seine : années 70 et 90.	Augmentation du débit moyen mondial attendue : +7,3% d'ici 2050. Accentuation des disparités entre les hautes latitudes et les régions équatoriales (augmentation des débits) et les régions subtropicales et méditerranéennes (diminution).	La tendance générale en France pour 2050 est à la diminution voire à la stagnation. Diminution du débit moyen annuel de la Seine d'ici 2100 de 140 m ³ /s (incertitudes d'environ 50 m ³ /s), soit 26% du débit moyen actuel. Diminution du débit en toutes saisons, mais essentiellement en été.
Stocks d'eau (eaux souterraines et superficielles)	Tendance globale à la diminution des stocks d'eau (surface + subsurface + souterrain) des grands bassins fluviaux par télédétection ¹⁰ : -60km ³ /an de 2002 à 2007. Disparités entre les grands bassins fluviaux mondiaux.	Tendances hétérogènes sur le stock d'eau souterrain du bassin de la Seine (autre facteur en jeu que le changement climatique : le contexte structural).		D'ici 2100, baisse importante de la recharge des aquifères : -2700 Mm ³ /an (même ordre de grandeur que les volumes actuellement prélevés sur le bassin de la Seine).
Niveau de la mer	+ 1mm/an depuis le début du XX ^{ième} siècle à une échelle globale. Augmentation répartie de façon inégale sur le globe. Tendance à l'augmentation pour l'Atlantique Nord et Sud.	Au niveau des côtes françaises de 1993 à 2006 : variation moyenne de 0 à +5mm/an (données satellitaires et mesures). Embouchure de la Seine (mesures au Havre) : + 1,8 +/- 0,4 mm/an de 1938 à 2006, avec une accélération de 1993 à 2006 : + 2,7 +/- 1,5 mm/an ¹¹ .	Grandes incertitudes : +18 à 59cm en moyenne d'ici 2100, en fonction des scénarii du GIEC (+80 cm à 1m dans certaines études). Scénario dramatique : + 5m en cas de fonte brutale des glaces polaires.	Projections sur l'élévation du niveau marin : - valeur minimale à partir de la tendance observée dans les mesures : +18 à +27 cm - valeur haute du GIEC : +60 cm => +1m en ajoutant les surcotes.

⁹ Augmentation de la moyenne des débits mondiaux de 4% par degré atmosphérique supplémentaire, en réponse certainement à l'intensification des précipitations et de la fonte des neiges

¹⁰ Données LEGOS (Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales ; Cazenave, 2008)

¹¹ Données P.Pirazzoli (2008)

	Méthodes rétrospectives		Méthodes prospectives	
	Echelle globale	France - Seine	Echelle globale	France - Seine
Température des eaux de surface	Au cours du XX ^{ième} siècle : +1°C à l'échelle du globe, et +2°C pour les eaux de l'Atlantique Nord. Augmentation de la température des eaux des fleuves.	Augmentation T° des fleuves français (ex : +0,8 °C sur la Loire entre 1975 et 2005). Augmentation de T° des eaux de Seine est fonction de la T° de l'air et de l'ordre de Strahler des cours d'eau.	Poursuite probable de l'augmentation de la température des eaux de surface en relation avec la T° atmosphérique.	Poursuite probable de l'augmentation de la température des eaux de surface en relation avec la T° atmosphérique.
Evolution de la salinité	Etudes trop ponctuelles pour proposer une synthèse de l'évolution de la salinité en relation avec le changement climatique.		De manière qualitative, une augmentation du taux et de la pénétration de la salinité est attendue dans les estuaires. ¹²	En intégrant une élévation du niveau de la mer de 60cm : remontée du front de salinité en Seine de 1km ¹³ .

¹² Conséquence d'une élévation du niveau marin mais probablement aussi des variations climatiques générales (corrélation entre le taux de salinité de certains estuaires et des indices d'oscillations).

¹³ Selon modélisation de Le Hir, 2000. Cependant, le modèle ne tient pas compte des interactions des stocks d'eau et de la baisse prévue du débit de la Seine.

3. Impact du changement climatique sur la qualité de l'eau et risque sanitaire potentiel

a) Evolution de la qualité de l'eau

L'étude de la qualité de l'eau regroupe en général des caractéristiques telles que la température, la qualité biogéochimique de l'eau (nutriments, carbone et oxygène principalement) et la dynamique des MES (Matières En Suspension). Les principaux paramètres liés à l'évolution du climat susceptibles d'influencer la qualité de l'eau sont la hausse de sa température, qui agit sur la cinétique des processus biogéochimiques, et les variations de débit qui influencent la dilution, la sédimentation et les temps de rétention.

Dans ce domaine, les principaux résultats sont issus du programme GICC-Seine et basés sur des scénarii d'évolution du climat relativement cohérents avec ceux plus récents du projet RExHySS. Dans le cadre de ces travaux, l'importance relative de l'impact direct du changement climatique et des impacts liés à l'évolution probable des contraintes et activités anthropiques sur le bassin de la Seine a été étudiée, intégrant la pollution azotée diffuse d'origine agricole¹⁴ et les rejets ponctuels, domestiques et industriels.

L'analyse fut menée à l'aide du modèle RIVERSTRAHLER et de son application au bassin de la Seine le modèle SENEQUE, qui permettent de calculer des variations géographiques et saisonnières du débit, de la qualité de l'eau (nutriments, matières en suspension, carbone organique, oxygène) et du fonctionnement écologique d'un réseau hydrographique (dynamique des populations microbiologiques planctoniques, y compris eutrophisation) en fonction de la morphologie des cours d'eau, des lames d'eau écoulées, de l'insolation et de la température de l'eau, de l'usage du sol du bassin versant et des rejets ponctuels d'eaux usées.

A l'horizon 2100, l'impact cumulé du changement climatique pourrait se répercuter sur la qualité des eaux à travers une augmentation du taux de nitrates d'environ 20mg/l dans les aquifères et 10mg/l dans les cours d'eau par rapport aux valeurs de 2000. Bien que cette évolution puisse être contrebalancée par une politique d'agriculture raisonnée impliquant une diminution des apports en azote, l'impact sur la production algale et sur l'eutrophisation resterait négligeable. Néanmoins, en appliquant aux hypothèses d'évolution du climat l'évolution de certains facteurs issue d'une démarche prospective spécialisée, tels que la démographie, le secteur industriel ou encore les progrès technologiques en matières de dépollution et d'épuration, se traduisant par une diminution importante des apports ponctuels durant le XXI^{ème} siècle, il semblerait que le phénomène d'eutrophisation tende à diminuer.

A partir des hypothèses récentes d'évolution des débits, les résultats issus du projet GICC-Seine mettent en évidence l'influence prépondérante du réchauffement de l'eau sur sa qualité par rapport aux changements de débits.

En termes d'apports de nutriments à l'estuaire, les changements ci-dessus devraient se traduire par une augmentation des apports en nitrate, une baisse des apports en phosphate et une augmentation des apports en silice dissoute (du fait de la diminution des blooms de Diatomées dans les cours d'eau de la Seine). Ce dernier point devrait profiter aux Diatomées de l'estuaire, et pourrait y limiter les blooms de phytoplancton non siliceux.

Bien que la dynamique des matières en suspension, facteur fondamental du fonctionnement global des estuaires, dépende directement de paramètres hydrologiques influencés par le changement climatique tels que le débit du fleuve, l'intensité des apports aval ou encore la

¹⁴ simulation à partir du modèle couplé STICS-MODCOU-NEWSAM

salinité, il n'a pas été mis en évidence à ce jour d'influence directe du changement climatique sur la dynamique des MES.

Le bouchon vaseux, où l'annulation des courants fluviaux et marins favorise les processus de décantation et de sédimentation, est contrôlé par le cycle des marées et par l'intensité des débits amont. Il tend à se déplacer vers l'amont pendant la période d'étiage et vers l'aval en période de crue, et sa concentration varie avec le cycle des marées. Concernant les vasières, celles-ci s'érodent de manière plus ou moins importante au gré des conditions météorologiques, en fonction de leur nature et de leur caractère plus ou moins compact. Fraction la plus mobile, les vases molles sont déposées et remises en suspension suivant le cycle des marées. L'érosion des vasières consolidées et des vases réduites compactes nécessite plus d'énergie, ce qui confère une certaine stabilité à ces formations sauf en cas d'augmentation des événements extrêmes.

De nombreux modèles développés dans le cadre du programme Seine-Aval, ont permis, au même titre que les mesures de terrain, de mieux comprendre le fonctionnement hydro-sédimentaire de l'estuaire de la Seine. L'ensemble s'appuie sur deux modèles principaux, MODESTE et SAM (Simulation Advection Multivariable), décrivant l'hydrodynamisme et le transport de masse dans l'estuaire, auxquels s'ajoutent plusieurs modèles interdépendants, relatifs à des processus particuliers liés à la dynamique des sédiments, aux processus biologiques et chimiques intervenants, ou encore au transport des contaminants (cf. figure 3).

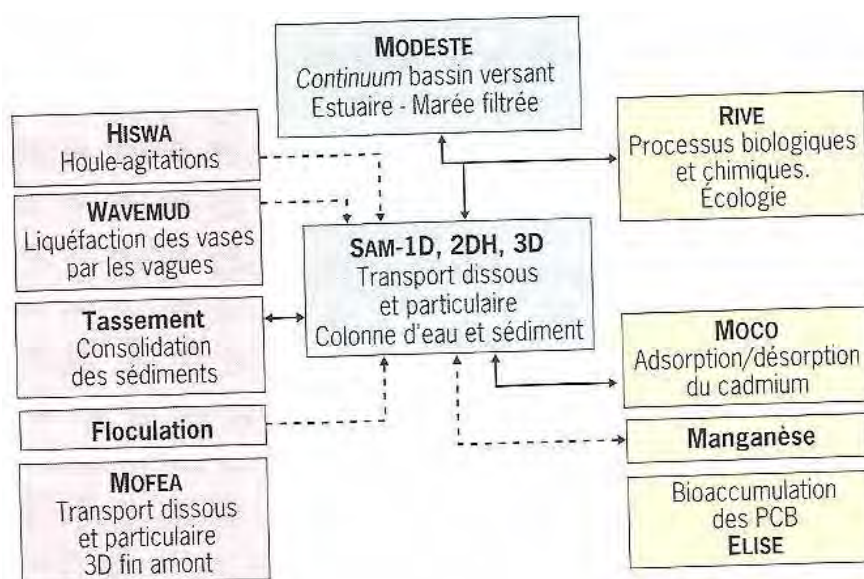


Figure 3 : couplages et interactions entre différents modèles développés sur la Seine

Bien que ces avancées permettent de mieux appréhender l'évolution hydro-sédimentaire de l'estuaire de la Seine, il apparaît fondamental de poursuivre les travaux de modélisation dans ce domaine à partir des projections de l'évolution du débit et du niveau marin. En effet, l'étude de l'impact de certains aménagements suggère que la modification des flux (intensité, salinité) induit une variation des conditions de sédimentation et d'érosion dans l'estuaire. De ce fait, les modifications de l'hydrosystème liées au réchauffement climatique devraient également se répercuter sur ces mêmes paramètres.

A titre d'exemple, un premier essai de modélisation a été réalisé par Le Hir (2000). En intégrant une élévation du niveau de la mer de 60 cm sur l'estuaire de la Seine, les simulations du modèle tridimensionnel ont donné les résultats suivants :

- une faible sensibilité de la remontée des eaux marines à l'élévation du niveau de la mer, avec un déplacement de l'ordre de 1 km vers l'amont des isohalines de faible salinité.
- des différences sur le bouchon vaseux à peine perceptibles (simulation pendant une période de 6 mois pour un débit de 350 m³/s, légèrement inférieur au débit moyen du fleuve) : les masses en suspension du bouchon vaseux restent équivalentes et on observe un recentrage de celui-ci vers le chenal central.

Ces simulations ne tiennent cependant pas compte de l'ensemble des interactions des différents stocks de l'estuaire (mer, débit de la Seine et de ses affluents, nappes souterraines) et de la diminution de débit envisagée dans le projet RExHySS. Les simulations futures devront donc intégrer ces interactions et notamment les différentes hypothèses de diminution de débit et des stocks souterrains.

b) Impact de l'évolution des microorganismes sur la qualité de l'eau et risque sanitaire associé

De par leur rôle dans les cycles biogéochimiques et les multiples interactions avec les autres organismes vivants, les microorganismes constituent un maillon très important dans le fonctionnement général de l'écosystème. Ainsi, il est important de savoir de quelle manière ils sont susceptibles de répondre au changement climatique. En particulier, la variabilité de certains paramètres environnementaux tels que la température des eaux, sa salinité, etc., pourrait modifier sensiblement la diversité microbienne et affecter l'estuaire de la Seine au niveau de son fonctionnement et des risques sanitaires. Néanmoins, la logique consistant à raisonner suivant l'aire de répartition géographique ne peut s'appliquer à ces organismes, puisque si les conditions physico-chimiques favorables à leur développement sont réunies, ils sont susceptibles d'être présents. Par ailleurs, les microorganismes ont un temps de développement court et s'adaptent rapidement aux nouvelles conditions environnementales, ce qui rend d'autant plus difficile la prévision de leur évolution.

Tandis que les scientifiques s'accordent à dire que la diversité des microorganismes devrait être modifiée, au même titre que celle des autres compartiments du vivant, les conséquences au niveau du fonctionnement écologique des estuaires présentent davantage d'incertitudes de par la grande redondance fonctionnelle des bactéries. En effet, certaines fonctions peuvent être réalisées par plusieurs espèces, ce qui ne met pas systématiquement en péril le système en cas de disparition d'une espèce. A long terme, il est toutefois possible que cette capacité de résilience soit affectée par l'évolution climatique.

Intervenants dans les cycles du carbone, de l'azote ou du soufre qui alimentent eux-mêmes les grands schémas de fonctionnement des systèmes, l'activité bactérienne dépend de la qualité des eaux, en particulier de la température, du pH, de l'oxygène dissous, de la salinité, de la concentration en CO₂ ou encore de la concentration en ammonium, autant de paramètres qui, a priori, devraient évoluer dans le contexte de changement global. Sur l'estuaire de la Seine, il existe des modèles qui décrivent de façon plus ou moins fiable le cycle du carbone et le cycle de l'azote, allant pour certains jusqu'à une prévision de leur évolution. En particulier, le programme Piren-Seine encourage ce type de modélisation. Néanmoins, la plupart n'intègre pas certains facteurs pourtant essentiels tels que les apports latéraux par écoulement ou plus simplement les débits du cours principal et de ses affluents.

Au-delà de la capacité de résilience du système, certaines modifications de l'activité microbienne pourraient avoir des répercussions directes. Une augmentation de température devrait par exemple entraîner une intensification de l'activité microbienne et se traduire par une augmentation de l'émission de gaz à effet de serre.

Parmi les fonctions écologiques assurées par un estuaire, l'épuration est parmi les plus importantes, compte tenu de la quantité de matières et de contaminants accumulés le long du

bassin versant. Les bactéries jouent un rôle important dans cette dépollution, notamment en ce qui concerne les micropolluants métalliques et organiques. Or, étant donné que la diversité et l'activité de ces bactéries dépendent de paramètres tels que la température ou encore la salinité, le changement climatique pourrait avoir des conséquences non négligeables sur cette fonction écologique, selon l'importance de la redondance fonctionnelle.

Sur l'estuaire de la Seine, des analyses ont déjà mis en évidence des variations de la diversité des bactéries sulfato-réductrices et de celles participant à la dégradation des HAP, en fonction des saisons, sans pour autant obtenir une déconvolution de l'importance relative des facteurs environnementaux. Des études plus approfondies et des campagnes supplémentaires permettraient de déterminer les facteurs prépondérants dans l'évolution des communautés microbiennes. Ainsi, de la prévision de ces paramètres jugés prioritaires pourrait résulter une estimation de l'évolution des microorganismes et des fonctions écologiques associées.

En ce qui concerne le risque sanitaire, les microorganismes les plus susceptibles d'être influencés par le changement climatique sont les organismes pathogènes à transmission indirecte. En effet, ceux-ci se transmettent par vecteur biologique (moustiques, animaux) ou par vecteur non biologique (eau, air, sol), qui sont eux-mêmes susceptibles d'être affectés par l'évolution climatique. Cette relation tripartite entre le microorganisme pathogène, le vecteur de transmission et l'hôte rend d'autant plus difficile l'estimation de l'évolution des maladies sous forçage climatique.

Néanmoins, des études ont mis en évidence le rôle prépondérant des températures et du niveau de précipitations dans la transmission des maladies infectieuses à vecteur biologique. Une corrélation a notamment été établie entre certaines maladies et la saisonnalité, comme illustré dans le tableau 2.

Maladies à vecteurs biologiques	Saisonnalité du déclenchement de la maladie	Mécanisme qui explique la saisonnalité	Bibliographie
Malaria (<i>Plasmodium</i> spp.)	Saison chaude et humide	Précipitations 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	Précipitations et température	Campbell et al., 2002
Virus encéphalite à tique	Printemps/été	Température	Randolph et al., 2000

Tableau 2 : maladies à vecteurs biologiques influencées par la saisonnalité (d'après Altizer et al., 2006)

Au vu de l'évolution supposée du climat décrite précédemment, une question émerge de ces résultats : de quelle manière un marquage plus important des différences saisonnières va-t-il jouer sur la transmission de ces maladies ?

Pour les maladies infectieuses à vecteur non biologique, les facteurs climatiques pouvant influencer la présence et l'état physiologique des microorganismes responsables sont également les précipitations et la température : les variations de précipitations pourraient se répercuter sur le transport et la dissémination des agents pathogènes, tandis que la hausse générale des températures devrait influencer la croissance des organismes autochtones* (ayant

l'eau comme habitat principal) ou la survie des organismes allochtones (organismes d'origine fécale). Le pH, la salinité de l'eau ou encore les rayonnements UV sont également des paramètres qui agissent sur ces agents et la transmission des maladies infectieuses.

Tandis que la survie de certains organismes est directement dépendante du climat (ex : la bactérie *Vibrio cholerae* responsable du choléra), celui-ci peut aussi agir de manière indirecte, notamment chez les individus dont le développement est associé avec d'autres espèces vivantes, elles-mêmes susceptibles d'être impactées par le CC.

A une échelle globale, la modification des courants marins peut en outre influencer les apports microbiens.

Habituellement, l'estimation de la qualité sanitaire des eaux préconisée dans les normes européennes est basée sur la recherche d'indicateurs de contamination fécale (ICF). Ceci explique sans doute que jusqu'à présent, les études relatives au risque microbiologique sur l'estuaire de la Seine se sont concentrées sur les ICF, en particulier sur les coliformes fécaux ou *Escherichia coli* qui semble être un bon indicateur pour les eaux douces. Dans les zones salines, l'ICF le plus utilisé est basé sur les entérocoques. Cependant, bien que de nombreuses données de suivi existent, en particulier pour les coliformes fécaux ou *E.coli*, la corrélation entre l'abondance de la flore indicatrice et la présence réelle des microorganismes pathogènes correspondant reste encore complexe.

En approfondissant les études épidémiologiques relatives aux indicateurs de contamination fécale, une estimation plus fine de la qualité des eaux de baignade ou des eaux récréatives et un suivi systématique de certains pathogènes pourrait être mis en place.

Etant donné qu'on ne peut raisonner en terme d'aire de répartition, que les vitesses de développement et d'adaptation des microorganismes sont rapides, les études devraient être élargies à des organismes qu'on ne retrouve pas « classiquement » dans nos régions. De plus amples connaissances sur les stratégies écologiques d'adaptation de certains pathogènes s'avèreraient dans ce cas très utiles.

4. Bilan et perspectives

A l'échelle du globe, les travaux du GIEC permettent d'avoir une vision relativement synthétique du réchauffement climatique et de ses effets. A partir de la bibliographie relative aux paramètres climatiques et hydrologiques, plusieurs constats peuvent être faits :

- Malgré l'hétérogénéité des systèmes considérés et des méthodes employées, il existe un réel consensus sur le caractère réel du changement climatique et sur l'importance des conséquences potentielles du phénomène sur le fonctionnement des fleuves et des estuaires, comme en témoignent déjà certaines observations (température et précipitations notamment). Bien que les estimations quantitatives diffèrent parfois, de grandes tendances se dégagent également en ce qui concerne l'évolution des stocks d'eau, des débits, du niveau de la mer ou encore de la température de l'eau.
- L'appréhension du phénomène reste difficile à une échelle régionale voire locale pour plusieurs raisons : de plus en plus de scientifiques se penchent sur la problématique du changement climatique mais les études sont souvent très ciblées (zone géographique particulière, paramètres et domaine d'étude restreints) et les résultats sont peu voire pas extrapolables ; l'hétérogénéité forte des méthodes et des échelles utilisées pose le même souci ; le sujet étant « d'actualité », de nombreuses études sont en cours et les résultats ne sont pas encore disponibles.
- On recense des freins similaires en ce qui concerne l'évolution de la qualité de l'eau. De plus, un problème de disponibilité des données vient s'ajouter puisqu'il est

communément admis que la durée minimum des enregistrements pour obtenir des résultats fiables doit être de 30 ans.

Bien que les estimations de l'évolution des paramètres hydrologiques et climatiques soient de plus en plus précises grâce à la multiplication des programmes de recherche, les incertitudes autour de l'estimation quantitative de certains paramètres sont encore trop grandes pour appréhender de manière efficace le phénomène. En particulier, les interactions entre les différents stocks d'eau (mer, fleuve, aquifère), l'élévation du niveau marin, la fréquence et l'intensité des événements extrêmes ou encore l'avancée du front de salinité sont autant de facteurs essentiels à considérer pour anticiper le changement climatique et opter pour des mesures de gestion mieux adaptées et durables.

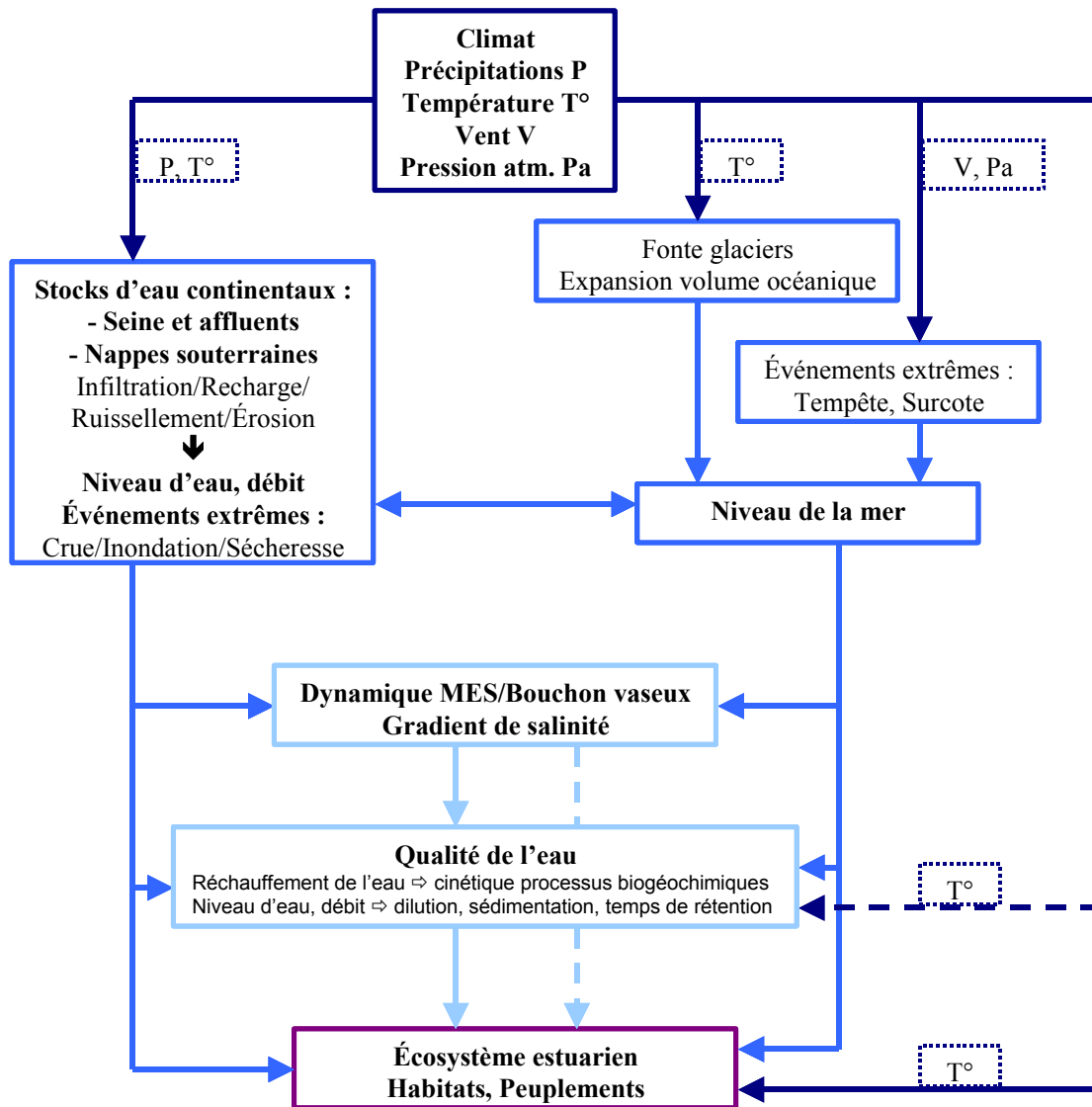


Figure 4 : schéma synthétisant l'ensemble des interactions régissant le fonctionnement de l'hydrosystème

Dans un premier temps, les efforts pourraient se concentrer sur la modélisation de l'élévation du niveau marin, qui semble être un sujet particulièrement délicat pour les acteurs de l'estuaire. Ce travail devra se baser sur les données marégraphiques disponibles et sur les données satellitaires, afin d'aboutir à un intervalle de montée des eaux plus précis. L'utilisation d'une modélisation pourra d'une part contribuer au développement d'autres modèles, mais aussi servir d'outil de gestion, favorisant une prise de conscience collective au sein du territoire et soulignant les zones les plus vulnérables face à une montée des eaux.

L'avancée des connaissances dans ce domaine permettra ensuite d'alimenter les modèles décrivant l'évolution hydro-sédimentaire de l'estuaire et de mieux comprendre les conséquences potentielles en matière d'inondation et d'évolution de la qualité de l'eau, au travers notamment de la progression du front de salinité et de la dynamique des matières en suspension. En particulier, la zone de l'estuaire moyen, où se mélangent les eaux douces et salées, pourrait être déplacée vers l'amont ou l'aval en fonction de débit de la Seine, ce qui pourrait avoir des conséquences importantes sur la dynamique du bouchon vaseux et du gradient de salinité.

L'intensification des études des enregistrements historiques et des études de modélisation devra en outre se faire de manière intégrée et considérer l'estuaire dans son bassin hydrographique. En effet, il est indispensable de mieux comprendre les interactions entre l'évolution du niveau marin, le débit de la Seine et l'aquifère de la craie pour prévoir l'évolution générale du fonctionnement hydrographique de l'estuaire sous contraintes climatiques. Des informations relatives à l'occupation des sols (modes d'agriculture, aménagements et urbanisation,...) pourraient en outre venir compléter le profil obtenu afin d'aboutir à une image de l'estuaire de la Seine la plus complète possible.

Suivant la même logique intégrée, la relation complexe entre les communautés microbiennes et les cycles biogéochimiques mériterait d'être davantage explorée, afin de produire des modèles traduisant de manière réelle l'évolution de ces cycles et les conséquences potentielles sur le changement global. En particulier, la connaissance des interactions entre certains microorganismes et l'émission de gaz à effet de serre pourrait venir compléter les grands modèles climatologiques existants.

Par ailleurs, parmi les aléas liés directement ou indirectement à l'évolution du climat et susceptibles d'affecter de manière importante la vulnérabilité de l'estuaire de la Seine, la fréquence, l'amplitude et les conditions d'apparition des événements extrêmes sont encore trop peu connues (crues, inondations, sécheresses, tempêtes). Alors que certaines études tentent d'identifier les facteurs responsables des débits et des précipitations extrêmes, il existe peu de données relatives aux tempêtes, en particulier au niveau de l'estuaire de la Seine. Pourtant, le risque d'inondation ponctuelle lié aux phénomènes de surcote, et les risques de dégradation dus à la force ou à la direction des vents sont des conséquences non moins importantes.

Enfin, un dernier point à considérer concernerait la mise en perspective du changement climatique dans le cadre des variations climatiques sur des échelles de temps plus grandes que celle du siècle dernier. Sur la Seine, les archives sédimentaires pourraient permettre d'atteindre non seulement cet objectif, mais aussi de faire des zooms sur des périodes clés affectées par des changements climatiques significatifs ayant eu des conséquences importantes sur la sédimentation et la morphologie de l'estuaire, telles que l'optimum médiéval ou le petit âge glaciaire.

II. Réponses des peuplements aux modifications du milieu

Les changements climatiques et hydrologiques vont se répercuter de multiples façons sur l'ensemble des habitats estuariens et sur tous les compartiments du vivant qui façonnent la diversité biologique de l'estuaire de la Seine, à travers la physiologie des organismes, leur phénologie, la structure des communautés, etc., comme l'illustre la figure 5. Bien que la littérature cible majoritairement de grands ensembles ou à l'inverse des territoires bien précis et que les données ne soient pas facilement extrapolables à l'échelle de l'estuaire de la Seine,

certaines observations et résultats témoignent d'ores et déjà de l'impact du changement climatique sur les habitats et les peuplements recensés sur notre territoire d'étude.

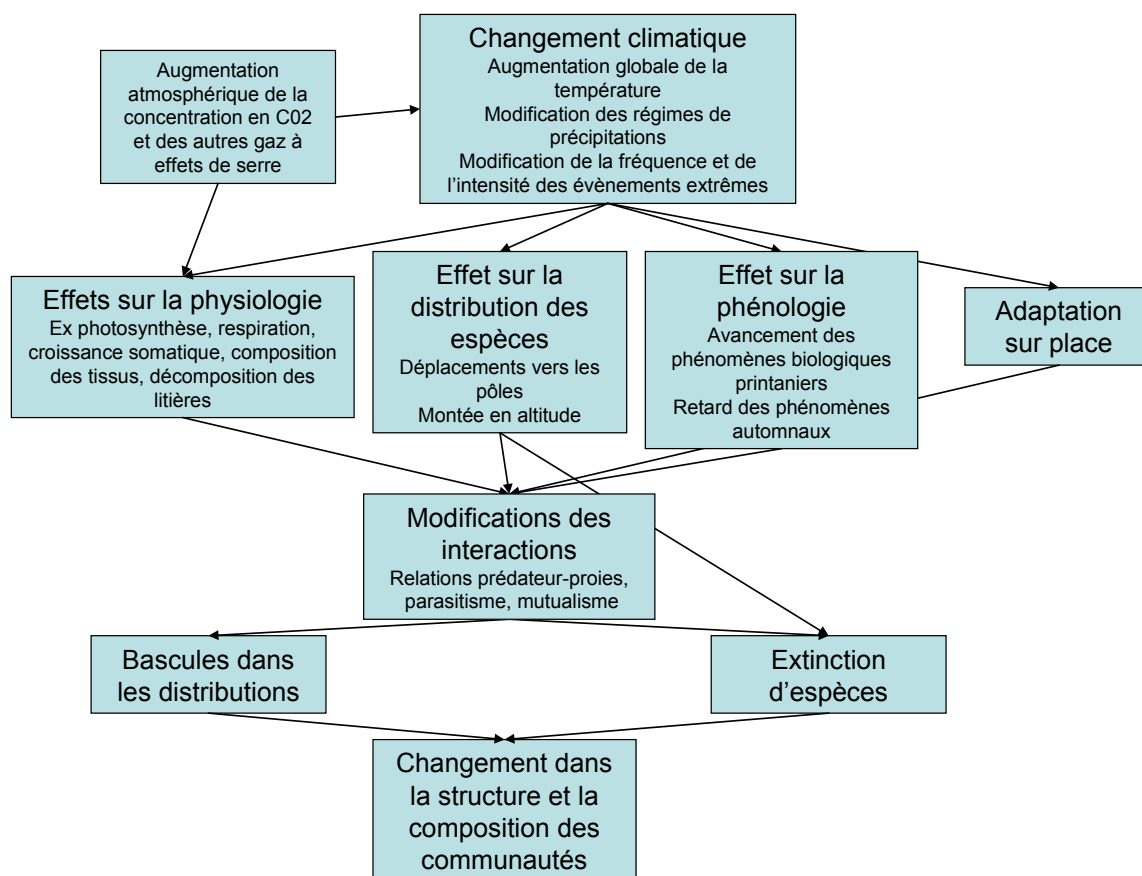


Figure 5 : Canevas global des conséquences du CC sur le vivant, adapté d'après Hughes (2000)

1. Modifications attendues des habitats sous les forçages climatiques actuels

Tandis que le niveau d'eau reste l'une des principales préoccupations, d'autres impacts non moins importants soulèvent des interrogations. En particulier, les conséquences sur le régime des marées, les vagues et l'hydrodynamisme, les radiations solaires, le régime des précipitations ou encore les gaz à effet de serre sont autant de questions qui méritent d'être approfondies. Des variations dans la valeur de ces paramètres sont en effet susceptibles d'affecter les organismes présents dans l'estuaire de manière directe d'une part, à travers leur phénologie, leur biologie,..., et de manière indirecte d'autre part via la modification des habitats.

a) Influence de la température

La température de l'eau influence la phénologie de certaines espèces et contrôle la répartition géographique de nombreux organismes aquatiques. Par exemple, la variation de la période de migration de certaines espèces de poissons peut découler de ces changements de température puisque le déclenchement des migrations requiert souvent des conditions thermiques particulières. Le décalage temporel des cycles de vie peut ensuite perturber les liens trophiques et en particulier le rapport proie/prédateur, ce qui peut affecter sérieusement la survie d'une espèce ou au contraire favoriser le développement d'une autre, et modifier de ce fait la structure et le fonctionnement de communautés entières.

Par ailleurs, si on considère qu'une espèce est affiliée à une niche écologique particulière, la modification d'un paramètre structurant tel que la température aura un impact sur sa

répartition, de manière plus ou moins importante en fonction de sa tolérance et de sa capacité d'adaptation. La répartition biogéographique des espèces aquatiques illustre bien ce phénomène puisque la plupart des organismes vagiles* vont avoir tendance à se déplacer en suivant les masses d'eau dont les conditions physico-chimiques sont favorables à leur développement. A l'inverse, les organismes sessiles* risquent dans un premier temps de voir leur aire de répartition diminuer, faute de pouvoir rapidement s'adapter et retrouver des conditions propices à leur survie. Dans le cas des espèces invasives et des espèces opportunistes, on peut s'attendre de manière générale à ce qu'elles étendent leur aire de répartition biogéographique. Les réponses des organismes étant très variées, il est difficile de prévoir de manière précise l'évolution de leurs aires de répartition biogéographiques. De nombreux programmes de recherche tentent d'éclaircir cet aspect, et certains se focalisent en particulier sur les zones limites des aires de répartition, afin de mieux expliquer la dynamique des espèces dans ces zones de transition et d'identifier les processus d'adaptation.

A un autre niveau, une modification de la température ambiante va affecter la cinétique de nombreuses réactions, ce qui pourrait se répercuter sur des processus tels que la photosynthèse et la respiration aérobie, sur les cycles biogéochimiques et sur le métabolisme général des organismes.

b) Les précipitations, le débit et la qualité de l'eau

Avec le changement climatique, c'est l'ensemble du cycle hydrologique qui va être perturbé. La modification du régime des précipitations devrait se faire ressentir sur les débits de la Seine et de ses affluents et sur le niveau des nappes. L'état des connaissances actuel ne permet pas de prévoir de manière précise quel sera l'impact sur l'estuaire moyen, autrement dit sur la zone de mélange des eaux douces et des eaux salées. Néanmoins, la qualité de l'eau devrait subir ces variations hydrologiques à travers d'une part, la modification de la salinité, et d'autre part, la modification de la charge en produits chimiques d'origine anthropique... La diminution du débit de la Seine prévue par la modélisation devrait entraîner des changements dans les processus de dilution et de sédimentation et les temps de rétention.

Les changements observés s'avèrent différents en fonction de la zone d'étude, mais ils sont susceptibles pour la plupart d'avoir des répercussions sur les communautés vivantes, et ce à différents niveaux trophiques. Ainsi, il semblerait par exemple que la variabilité du régime des précipitations ait des conséquences plus ou moins négatives sur les communautés planctoniques côtières. Conditionnée en estuaire par les flux entrants d'eau salée et les arrivées d'eau douce provenant de l'amont, la salinité influence par ailleurs les paramètres physiologiques et métaboliques de certaines espèces de bivalves (ex : fréquence cardiaque, respiration, acquisition d'énergie et taux de croissance pour la moule *Mytilus edulis*), se traduisant parfois par une réduction du renouvellement des populations. A long terme, un tel effet chronique est susceptible d'affecter l'état de santé immunologique de ces espèces, leur croissance, leur abondance et leur distribution.

A l'échelle du système estuarien, de telles conséquences sur des espèces clés de voûte telles que certaines espèces de bivalves pourraient affecter le fonctionnement entier des écosystèmes et modifier de façon significative leur biodiversité.

c) Altération de la qualité de l'atmosphère et modification des radiations solaires

La composition atmosphérique évolue avec le climat et avec les activités anthropiques, à l'image de la couche d'ozone qui s'amincit dans la stratosphère. Ainsi, il existe un risque d'appauvrissement du spectre solaire à la faveur des UV-B, qui constituent la part du rayonnement la plus nocive sur la physiologie des organismes. Les effets sont multiples (fécondité diminuée, croissance ralentie, inhibition de la photosynthèse...) et vont

de l'altération de la survie d'une espèce à des effets létaux. Les communautés végétales et animales des vasières y sont particulièrement vulnérables, du fait d'une émergence et donc d'une exposition directe aux UV régulière, et de la faible profondeur en période d'immersion, à l'exception peut-être des invertébrés benthiques vivant enfouis.

« Dans les systèmes côtiers et estuariens, les caractéristiques optiques sont principalement contrôlées par la présence des apports terrestres en matière particulaire et dissoute, ainsi que par l'intensité du mélange généré, principalement, par la circulation côtière et les effets des marées (Vincent et al., 1994). » Etant donné que ces éléments absorbent une partie des radiations solaires, on peut supposer qu'une variation des apports sédimentaires entraînera une variation qualitative et quantitative de la pénétration des radiations solaires dans la colonne d'eau, ce qui affectera entre autres la production primaire et la capacité photosynthétique du phytoplancton. De plus, l'augmentation potentielle de la Matière Organique Dissoute Colorée (CDOM) allochtone* pourrait également impacter la disponibilité de l'éclairement et son spectre apte à la photosynthèse, et altérer de ce fait l'efficacité photosynthétique des organismes. Peu de travaux existent sur ces problématiques, mais il semblerait que certaines espèces phytoplanctoniques puissent s'adapter face à une diminution de la ressource énergétique d'origine lumineuse.

Au vu de ces quelques informations, la modification qualitative et quantitative du spectre solaire pourrait donc, de la même manière que pour les précipitations, avoir des répercussions à l'échelle de l'estuaire à travers des changements dans la composition des espèces et une diminution générale de la biodiversité. Certaines espèces ont développé des stratégies d'adaptation pour lutter contre les effets préjudiciables des UV, mais les connaissances actuelles ne permettent pas de prévoir si ces stratégies suffiront à contrecarrer l'augmentation supposée des rayonnements nocifs aux organismes.

d) Effets d'une élévation du niveau marin

La hausse du niveau marin devrait entraîner, entre autre, une redistribution de l'énergie hydraulique, avec pour conséquence une modification du transport sédimentaire à l'échelle de l'estuaire et une modification des formes géomorphologiques côtières actuelles, à l'échelle plus large des littoraux adjacents. Ainsi, la fréquence et la hauteur des vagues devraient être modifiées et impacter le trait de côte : érosion des falaises, déplacement de l'estran vers le haut, accumulation ponctuelle de sédiments variant suivant le profil et l'existence d'obstacles rigides tels que des ouvrages de protection. L'augmentation du niveau marin peut donc agir sur les peuplements de deux façons différentes, soit directement en perturbant les courants et donc par exemple la dispersion des propagules (larves, graines, etc.), soit indirectement via la transformation des habitats.

Globalement, « la nature de la réponse morphodynamique à long terme à l'élévation du niveau de la mer dépend du type estuarien et de la disponibilité du sédiment externe pour satisfaire la demande croissante de sédiment dans le système (Reeve and Karunarathna, 2009) ». Dans le cas de l'estuaire de la Seine, on peut s'attendre à un élargissement des chenaux, et à une élévation bathymétrique des vasières et du shorre* dans l'estuaire interne, du fait de l'augmentation probable de l'érosion au niveau de l'estuaire externe et donc d'un apport de sédiments plus important. Il est également possible que les vasières avales subissent une érosion importante, sans pour autant que cela s'accompagne d'une migration des vasières de haut niveau vers l'amont, du fait d'un endiguement trop important. En Angleterre, le développement d'un modèle en deux dimensions a permis d'estimer la vitesse moyenne de migration en lien avec la vitesse d'élévation du niveau marin, dans le cas où un degré de liberté est laissé à l'estuaire.

En raison d'aménagements nombreux et contraignants, l'élévation du niveau de la mer pourrait de plus conduire à la disparition des habitats intertidaux et donc à une perte de biomasse de la faune macrobenthique. Enfin, les prairies halophiles, marais et prés salés devraient subir des changements plus ou moins importants selon les conditions locales (élévation du niveau marin, caractéristiques physiques de la zone, pente entre le schorre* et la slikke*...).

Sur d'autres grands estuaires, l'influence de la dynamique du bouchon vaseux sur la survie des communautés macrobenthiques a été mise en évidence : une chute du nombre d'individus de certaines populations a en effet été observée, à la suite d'apports terrigènes trop brutaux. Bien que la vitesse de recolonisation soit rapide après dispersion des dépôts argileux superficiels, certaines populations telles que les grands bivalves ne retrouvent pas leur niveau initial.

A noter que l'équilibre sédimentaire estuarien pourra être perturbé par les épisodes de vent fort, mettant en péril la stabilité des peuplements des vasières en raison d'apports sédimentaires plus importants qu'à l'accoutumée.

Une autre conséquence de la hausse du niveau marin devrait être la modification des salinités et des valeurs de pH. Plusieurs auteurs ont confirmé que ces facteurs, liés au temps d'inondation, peuvent avoir un impact considérable sur la structure des communautés et sur la zonation spatiale des espèces végétales du schorre.

Globalement, la réorganisation générale des habitats devrait se traduire par un accroissement des communautés marines, au dépend des communautés typiquement estuariennes. Cette tendance sera renforcée ou non en fonction des futurs aménagements de l'estuaire et du degré de liberté accordé aux habitats par les gestionnaires.

e) Accroissement du CO₂

L'augmentation du CO₂ atmosphérique favorise la réaction de photosynthèse et donc augmente la production primaire, comme l'illustrent différents travaux sur les agrosystèmes, la forêt et les systèmes herbacés. Peu de travaux existent en système estuarien mais des effets similaires ont déjà été observés dans les mangroves.

L'équilibre des échanges de carbone entre l'océan et l'atmosphère devrait par ailleurs être modifié et tendre vers une dissolution des éléments calcaires, impliquant une réduction de la disponibilité en ions métalliques. Eléments indispensables à la croissance et au développement des organismes, leur indisponibilité pourrait par exemple se répercuter sur la distribution des plantes des prés salés.

A un autre niveau, il semblerait que le CO₂ joue sur la physiologie des organismes en affectant leur métabolisme général (perturbation de l'équilibre interne acido-basique, acidose des tissus et des liquides corporels,...). A long terme, une augmentation de CO₂ pourrait de ce fait altérer leurs capacités de croissance et de reproduction.

f) Synergie entre facteurs

Dans certains systèmes marins, l'influence d'une hausse de température sur la stratification des eaux a été mise en évidence : l'accroissement de la température de l'eau induit une stratification de la colonne d'eau plus marquée, et il semblerait que la régénération des éléments nutritifs soit de ce fait moindre, en raison d'un mélange plus difficile des eaux. A long terme, ceci pourrait se répercuter sur les populations planctoniques ainsi que sur les espèces benthiques qui risquent de ne plus bénéficier des apports de nutriments d'origine continentale arrivant dans les eaux de surface.

Bien que plusieurs cas témoignent que l'action des facteurs environnementaux n'est pas systématiquement additive (synergique ou antagoniste), la hausse de température semble de manière générale favoriser ou accentuer certaines réactions et perturbations existantes. Combinée à d'autres facteurs, elle peut provoquer un déséquilibre des communautés et accentuer l'effet d'une perturbation. Par exemple, l'impact négatif d'un accroissement des radiations solaires devrait être renforcé par la température, via les modifications phénologiques qu'elle induit (décalage temporel ou changement qualitatif). Dans cette même logique d'action synergique, l'eutrophisation, contrôlée entre autres par l'apport d'éléments nutritifs mais aussi par la température et l'hydrodynamisme, pourrait devenir plus fréquente, ce qui augmenterait alors le risque d'asphyxie du milieu. En effet, l'augmentation supposée de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes tels que les inondations et les périodes de sécheresse, pourrait favoriser le phénomène.

Enfin, l'action de certains polluants organiques ou chimiques a été étudiée dans le cadre du changement climatique. Tout d'abord, les variations de débits vont clairement influencer sur les concentrations des polluants arrivant du bassin versant. De plus en cas d'augmentation moyenne des précipitations, le ruissellement serait amplifié, ce qui favoriserait la diffusion dans l'environnement des polluants organiques et des substances toxiques, impactant de manière préférentielle les systèmes aquatiques et les systèmes tidaux à faible pente. De la même manière, les milieux jusqu'à présent peu ou pas inondés et susceptibles de l'être avec la hausse du niveau marin, devraient être exposés à davantage de polluants transportés notamment dans les eaux de surface ainsi qu'à des apports excessifs de nutriments. Certaines espèces végétales et certains habitats à caractère oligotrophe pourraient de ce fait être menacés de disparition, comme par exemple certaines espèces et milieux turfcloles*.

Certains de ces aspects ont été traités par le biais du modèle SENEQUE, déjà cité précédemment, notamment la réponse des écosystèmes à la pollution nitrique, sous l'influence du changement climatique et à l'échelle du réseau hydrographique de la Seine.

2. Conséquences et tendances d'évolution déjà observées sur les peuplements

Dans la littérature, on distingue deux grandes approches complémentaires mises en œuvre pour comprendre les effets du changement climatique et tenter de les anticiper : l'analyse de chroniques d'observation et la modélisation. La première mobilise les données historiques de suivi afin d'établir des relations entre l'évolution des paramètres environnementaux (climatiques et/ou hydrologiques) et celle des organismes vivants et de dégager des tendances. Destinées à mieux comprendre le phénomène, ces études visent généralement une espèce particulière ou un petit groupe d'espèces ayant des caractéristiques communes (ex : guildes trophiques, espèces migratrices,...) et sont difficilement extrapolables. De manière générale, les espèces les plus suivies sont des espèces menacées, emblématiques ou d'intérêt commercial majeur.

a) Exemple de l'avifaune

Parmi les changements déjà observés sur les oiseaux en lien avec l'évolution du climat, l'altération de la phénologie des migrations et des aires de répartition géographique est le plus évident. D'autres modifications des comportements ont été relevées mais la déconvolution des facteurs responsables de ces perturbations reste délicate. En effet, les problèmes de surexploitation (pression cynégétique), de pollution industrielle, de croissance urbaine, d'eutrophisation, ou plus généralement de perte d'habitats, sont autant de facteurs qui viennent s'ajouter aux variations du climat.

Bien que l'ensemble de la vallée de la Seine présente un intérêt ornithologique certain, la biodiversité avienne se concentre essentiellement sur un grand secteur qui regroupe la Zone

de Protection Spéciale « Estuaire et marais de la basse Seine » et la Réserve Naturelle Nationale située à l'embouchure de la Seine. En effet, la partie aval de l'estuaire, en particulier, correspond à un véritable carrefour migratoire. Aussi, les données d'observations disponibles concernent principalement ces deux sites. Cependant, il est indispensable pour l'avifaune migratrice d'étendre le champ de prospection au niveau national et international, en particulier jusqu'en Afrique où une modification du climat est susceptible de se répercuter de manière importante sur les espèces hivernantes. En effet, des périodes de sécheresse trop intenses et/ou trop longues risqueraient d'altérer la survie des oiseaux hivernant dans ces régions.

La richesse spécifique de ce secteur repose sur sa localisation géographique générale (voie de migration Ouest Paléarctique ou Est Atlantique) mais également sur la diversité des milieux rencontrés (vasières, prairies humides, mégaphorbiaies, cultures, forêts, marais salés,...) et leur complémentarité en termes de fonctions potentielles, et sur sa capacité d'accueil importante de par la taille des patches d'habitats. En lien ou non avec le changement climatique, la modification des habitats est donc susceptible d'affecter les populations d'oiseaux de manière très importante. Sur la réserve, le maintien de la fonctionnalité des milieux dépend à la fois de la gestion de la ressource en eau (qualité, origine donc salinité, degré d'inondation) mais aussi de l'évolution des ressources trophiques (phénologie de la végétation et des insectes). Les principaux facteurs susceptibles d'impacter directement la population avienne de l'estuaire sont donc la température, la pluviométrie et les conditions hydrologiques de l'estuaire.

A travers l'étude des différentes séries d'observations, plusieurs perturbations liées au changement climatique ont déjà été mises en évidence : dans la **phénologie des espèces** (changement des dates d'arrivée et de départ lors des migrations, changement des périodes de reproduction) et dans leurs **aires de répartition** (déplacement, extension/contraction des aires préférentielles).

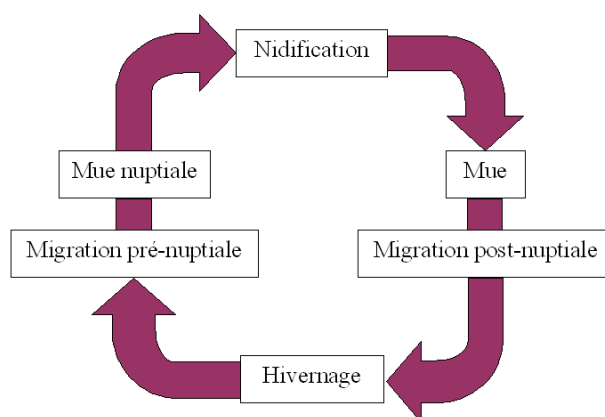


Figure 6 : Cycle phénologique annuel des oiseaux

Grâce aux différentes contributions¹⁵, voici quelques exemples des changements phénologiques et de répartition observés sur les espèces a priori les plus sensibles aux variations climatiques :

- Régression des hivernants nordiques : la remontée des isoclines conduit ces espèces à hiverner plus au nord, vers les pays de la mer du Nord, de la Baltique et vers les côtes britanniques notamment. A l'horizon 2100, il est de ce fait probable qu'on ne

¹⁵ Groupe Ornithologique Normand, Réserve Naturelle Nationale de l'Estuaire, le programme STOC qui suit les oiseaux communs, les suivis nationaux Wetland, la British Trust for Ornithology,...

rencontrera plus du tout d'alouette hausse-col *Eremophila alpestris*, de bruant des neiges *Plectrophenax nivalis* ou de linotte à bec jaune *Carduelis flavirostris* en Normandie. De la même manière, la plupart des nicheurs nordiques étendent leur aire de répartition vers le nord afin de suivre la remontée de leurs proies, ce qui devrait se traduire par une diminution significative des effectifs en Haute-Normandie.

- Colonisation progressive d'espèces méridionales, notamment pour l'hivernage et la nidification, à l'image de l'aigrette garzette *Egretta garzetta* et du héron garde-bœufs *Bubulcus ibis*. Bien que la déconvolution des facteurs responsables des changements observés soit délicate, comme pour d'autres domaines, l'augmentation de certains effectifs est à nuancer dans notre contexte d'étude, puisqu'il semblerait que d'autres facteurs prennent parfois le pas sur le changement climatique, tels que l'augmentation d'habitats favorables liée par exemple à des conditions d'usage du sol différentes. Une augmentation des effectifs hivernants de quelques limicoles* est aussi observée et particulièrement marquée, certaines espèces passant du statut d'hivernant rare à un statut « plus commun ». Le déplacement de leur aire d'hivernage entraîne une diminution du trajet depuis leur aire de reproduction, ce qui améliore nettement leur taux de survie.
- Décalage général de la migration pré-nuptiale, en réponse aux modifications phénologiques des végétaux liées au climat qui agissent comme déclencheurs de la reproduction, et aux variations de la disponibilité en nourriture qui conditionne l'état physiologique des individus. Ainsi, il semblerait que les espèces s'adaptent en avançant leur date moyenne d'arrivée sur les sites de reproduction, du fait d'un retour des conditions favorables plus précoce (accroissement de la production primaire dû au redoux et donc plus grande disponibilité des ressources) et d'une compétition intra et interspécifique encore faible à cette période. Néanmoins, de nombreux migrateurs restent désynchronisés avec les pics d'abondance de leurs proies, ce qui affecte nettement leur réussite de reproduction à l'instar du gobemouche noir *Ficedula hypoleuca* dont les effectifs, étudiés dans une région de Hollande, ont diminué de 90 %. D'autres encore, s'adaptent en modifiant de manière claire leur trajet migratoire, en choisissant des sites aux conditions plus clémentes et/ou en réduisant la distance entre leur aire d'hivernage et celle de nidification.
- Dates de ponte plus précoces, dans une moindre mesure que le décalage de la migration pré-nuptiale, de manière à pouvoir nourrir leurs petits correctement. Tandis que les paramètres climatiques conditionnent fortement le succès reproducteur des espèces, il n'a pas encore été établi de réelle corrélation entre le changement climatique et un quelconque changement de productivité.
- Changements des migrations post-nuptiales, en fonction des stratégies de chaque espèce : départ plus tardif pour les migrateurs à courte distance (nourriture disponible plus longtemps sur le lieu de reproduction) et retour précoce pour les migrateurs longue distance de manière à éviter la sécheresse saharienne lors de leur descente vers l'Afrique tropicale.

Au delà des aspects phénologiques, la survie de certaines espèces aviennes risque d'être affectée par la **modification des habitats**, en réponse au changement climatique ou à l'évolution de l'usage des sols. En particulier, les milieux directement liés au fleuve ou à l'estuaire et donc impactés par les variations de débits et du niveau marin, sont susceptibles de régresser, à l'image des vasières. En effet, les vasières sont menacées par l'élévation du niveau marin, alors qu'elles supportent de nombreuses espèces patrimoniales pour l'alimentation ou le repos. La perte de cet habitat serait dommageable à la fois pour la survie

de ces espèces mais également pour l'équilibre global de l'estuaire, au vue de la richesse inféodée aux vasières. A titre d'exemple, la diminution régionale des effectifs de certains limicoles* tels que l'avocette élégante *Recurvirostra avosetta*, en opposition à la tendance nationale en augmentation, semble être directement liée à la diminution de surface de vasière et à l'altération de leur qualité. Au delà de la diminution de leur surface, le temps d'exondation des vasières devrait tendre à diminuer, limitant l'accès aux ressources alimentaires pour certaines espèces. A long terme, cela pourrait altérer l'état physiologique des individus pendant l'hivernage et au retour sur les sites de reproduction. A contrario, une augmentation du temps d'inondation des prairies humides et sub-halophiles pourrait favoriser la migration et la nidification d'autres espèces, si ces milieux sont préservés et gérés de manière favorable (fauche tardive). A cet égard, le râle des genêts *Crex crex* pourrait bénéficier de conditions plus favorables pour sa nidification.

De la même manière, les espèces paludicoles* sont inféodées aux marais et aux roselières et sont très sensibles aux variations des niveaux d'eau. L'augmentation de la variabilité des conditions climatiques et en particulier de la pluviométrie risque donc de les impacter fortement. La grande roselière de l'estuaire de la Seine est un milieu privilégié pour ces espèces patrimoniales, particulièrement pour les passereaux paludicoles, mais aussi pour le butor étoilé *Botaurus stellaris* et le busard des roseaux *Circus aeruginosus* lors de la reproduction et des haltes migratoires, et sa gestion conditionnera en partie le maintien des populations dans l'estuaire. Le niveau d'eau et les intrusions de salinité seront à surveiller afin d'assurer la pérennité de l'habitat.

De plus, l'augmentation du niveau marin devrait avoir pour conséquence la diminution de la surface de l'estran, menaçant ainsi les espèces nichant sur ces zones transitoires, comme le gravelot à collier interrompu *Charadrius alexandrinus* devenu rare en estuaire de Seine.

Le changement climatique pourrait en outre conduire à quelques transformations positives, à l'instar des prés salés dont la surface devrait croître. En effet, il semblerait qu'actuellement l'apport de sédiments (naturel ou lié aux activités anthropiques) soit suffisant pour compenser le phénomène de montée du niveau marin, et que le comblement de certaines anses donne naissance à des prés salés, visités par les migrants.

L'ensemble des modifications déjà observées et à venir suggère un changement global à l'échelle de l'estuaire de la Seine, sur les populations aviennes d'une part (compétition alimentaire, compétition pour l'espace : sites de nidification et reposoirs,...) et sur le fonctionnement global de l'estuaire d'autre part (relations trophiques, fonctionnalités,...). Certaines espèces devraient devenir plus rares tandis que d'autres devraient bénéficier du réchauffement climatique. De manière générale, les espèces sédentaires et celles qui tendent à le devenir en réponse à la douceur hivernale devraient se développer au dépend des espèces migratrices, moins compétitives.

Continuer à suivre les espèces et leur phénologie* devrait permettre d'établir de nouvelles relations entre l'évolution des populations aviennes et la variation des paramètres environnementaux. Certaines espèces, plus sensibles que d'autres au changement climatique pourraient servir d'indicateurs. En outre, les prochains travaux devront s'appuyer sur une approche intégrée de manière à considérer le compartiment ornithologique comme une partie, un échelon du système estuaire de la Seine. En particulier, il apparaît indispensable de mieux cerner les relations entre les oiseaux, leur nourriture et les habitats, pour appréhender correctement les changements à venir et proposer des mesures de gestion et/ou d'adaptation adéquates. Certains modèles décrivent déjà la relation entre oiseaux, paysage et parasites, ou

encore entre paysage, pratiques forestières et oiseaux. Dans cette optique, la déconvolution des facteurs d'influence s'avère nécessaire.

b) La flore et la végétation

Plusieurs types de modifications liées au changement climatique ont déjà été recensés au travers de l'analyse de la littérature relative à la flore et la végétation :

- changements physiologiques : stress hydrique, modification de la croissance, de la productivité,
- changements d'ordre phénologique : chez les vivaces*, allongement de la période de végétation et débourrement plus précoce ; jaunissement plus tardif des feuilles des arbres ; décalage des cycles plus tôt dans la saison chez de nombreuses herbacées ; effets létaux résultant de sécheresses estivales plus marquées,
- conséquences au niveau génétique : localement, sélection d'individus et/ou de populations mieux adaptées aux modifications du climat, pouvant entraîner à terme la sélection de génotypes plus adaptés.

Quel que soit le type de réponse des espèces (adaptation, résistance, « effets létaux »,...), le changement climatique va impacter de façon importante les **aires de répartition des espèces** : remontée de la limite sud de répartition, déplacement global des aires de répartition vers le nord, étalement pour certaines espèces notamment les allochtones* et les invasives,... De ce fait, la composition et la structure des communautés végétales peuvent s'en trouver modifiées. Au delà d'un changement de répartition des espèces et de leur abondance relative, de nouvelles espèces peuvent apparaître et d'autres disparaître, donnant ainsi naissance à des communautés inédites.

Néanmoins, contrairement aux organismes capables de se déplacer tels que les oiseaux, la migration des végétaux est limitée par la fragmentation des habitats. De plus, la vitesse de cette migration pourrait s'avérer insuffisante pour contrer la rapidité des changements du climat.

En matière de modélisation, quelques outils ont été développés à partir d'observations et d'expérimentations. Dédiés à seulement quelques espèces au niveau européen, ces modèles sont basés sur les aires de répartition des espèces et les conditions climatiques actuelles. Bien que certains modèles intègrent des variables essentielles comme la compétition, la capacité de dispersion et de colonisation des végétaux, la fragmentation des écosystèmes ou encore l'occupation des sols, et sont de ce fait relativement précis, ils ne prennent peu ou pas en compte les différents types d'interactions, et ne traduisent donc pas efficacement le fonctionnement réel de l'écosystème. Or, il semble admis par la majorité de la communauté scientifique que les changements déjà observés résultent en partie des modifications de la compétition intra et interspécifique, et des interactions avec les autres compartiments biologiques susceptibles d'être eux-mêmes impactés par le changement climatique (bactéries, champignons, faune consommatrice de plantes,...).

Au delà de la modélisation de l'évolution d'espèces particulières et au regard des réflexions engagées sur l'évolution des habitats, le suivi de l'évolution des milieux sous forçage climatique pourrait également être pertinent. La perte d'un habitat ou l'expansion d'un autre et les modifications intrinsèques du milieu (nature physique du substrat, richesse et accessibilité des éléments nutritifs, salinité,...) sont en effet autant d'éléments structurants permettant de décrire l'évolution de la végétation d'un système.

Malgré l'existence de quelques réseaux de suivi de la flore et de la végétation à une échelle

régionale voire supra-régionale¹⁶, les données sont trop ponctuelles dans le temps et l'espace pour aboutir à des tendances d'évolution fiables de la végétation de l'estuaire de la Seine. Au travers des différents travaux et suivis existants, il ressort néanmoins que la phénologie*, tout comme pour l'avifaune, est un bon indicateur des variations du climat et un outil efficace pour cerner l'adaptation des végétaux (ex : dans le réseau RENECOFOR mis en place par l'ONF en 1992¹⁷). Par ailleurs, il semblerait que quel que soit le compartiment biologique considéré, le caractère déjà sensible des estuaires aux espèces allochtones* et particulièrement aux espèces invasives, semble être exacerbé par les modifications du climat, qui tendent à favoriser leur développement.

Certains impacts probables du changement climatique ont d'ores et déjà été identifiés sur l'estuaire de la Seine, notamment l'effet probable sur certains milieux d'une hausse des températures et d'une diminution des ressources globales en eau.

Ainsi, les pelouses calcicoles et les écosystèmes forestiers par exemple devraient être affectés par les variations du climat avec un niveau de sensibilité différent. Sur les pelouses calcicoles, les nouvelles conditions climatiques devraient bénéficier aux espèces méridionales, aux espèces thermophiles (qui aiment la chaleur) et xérophiles (qui aiment la sécheresse), et se répercuter de manière négative sur les espèces ne tolérant pas les fortes chaleurs.

Au sein des écosystèmes forestiers, a priori moins touchés, les espèces végétales devraient répondre par un déplacement de leur aire de répartition, au moins à long terme. Des changements dans la croissance des individus et/ou d'ordre phénologique sont également à prévoir (débourrement plus précoce, chute des feuilles tardive). Enfin, le risque sanitaire devrait s'accroître face à l'arrivée de nouveaux prédateurs, susceptibles de « migrer » sous les changements climatiques.

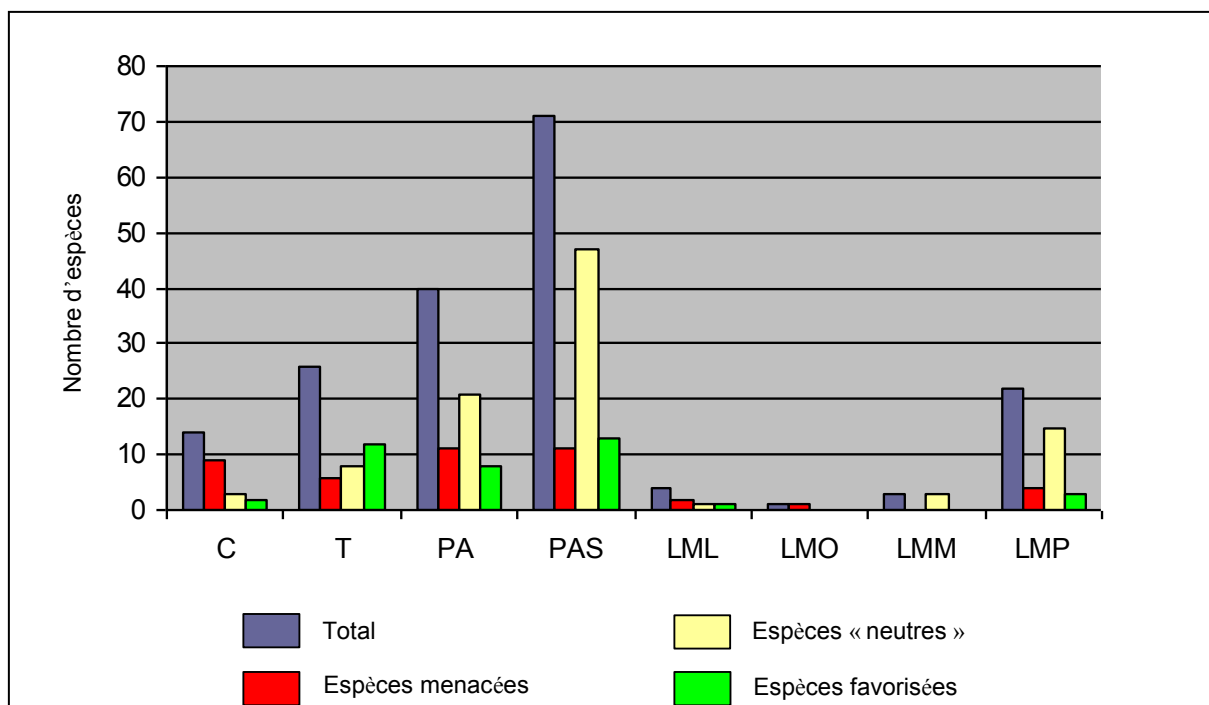
Dans l'optique d'approfondir les éléments de connaissances acquis à partir des données d'observations et d'expérimentations, un travail de modélisation a été proposé sur le territoire estuarien. Deux démarches ont été adoptées, l'une reposant sur l'analyse de la chorologie* des espèces les plus menacées et l'autre sur une simulation de l'élévation du niveau marin, de manière à déterminer d'une part l'influence directe du climat et d'autre part son influence indirecte. La chorologie concerne ici 123 taxons identifiés, à l'aide des critères de l'UICN, comme les plus menacés en Haute-Normandie, et les données sont extraites de la base de données DIGITALE du Conservatoire Botanique National de Bailleul essentiellement¹⁸.

Parmi les espèces les plus menacées par le changement climatique, les espèces endémiques telles que la violette de Rouen (*Viola hispida*) et Lunetière de Neustrie (*Biscutella neustriaca*), et les espèces les plus spécialisées telles que le Scirpe triquètre (*Schoenoplectus triqueter*) sont certainement les espèces les plus vulnérables. Les résultats par compartiments sont présentés dans la figure 7.

¹⁶ RENECOFOR (REseau National de suivi à long terme des ECOsystèmes FORestiers), OREF (Observatoire Régional des Ecosystèmes Forestiers), réseau national ODS (Observatoire Des Saisons)

¹⁷ <http://www.onf.fr/renecofor/sommaire/resultats/climat>

¹⁸ TOUSSAINT, B. & HOUSSET, P. (Coord.), 2005. - Inventaire de la flore vasculaire de Haute-Normandie (Ptéridophytes et Spermatophytes) : raretés, protections, menaces et statuts.
<http://80.118.32.9/digitale-rft/site/RessourcesDocumentaires/CataloguesFloristiques.html>



C : coteaux ; T : terrasses ; PA(S) : plaine alluviale (saline) ; LM(O/M/P) : lit mineur (oligohalin, mésohalin, polyhalin)

Figure 7 : Résultats de l'analyse de la chorologie par compartiments de l'estuaire

De manière proportionnelle et en ce qui concerne les espèces végétales déjà considérées comme menacées à l'heure actuelle, il semblerait que les espèces des coteaux soient les plus menacées par l'évolution du climat et que celles des terrasses soient les plus favorisées. Quant aux espèces situées sur la plaine alluviale, alors que ce milieu risque d'être l'un des plus impactés de l'estuaire de la Seine, l'effet direct des variations climatiques sur les espèces végétales devrait être relativement peu important, les espèces recensées sur cette zone étant majoritairement neutres.

Néanmoins, ces résultats sont à nuancer puisque les auteurs n'intègrent pas les espèces végétales communes, et plus généralement les espèces non menacées. Par conséquent, les conclusions propres aux espèces végétales menacées ne sont pas généralisables par « compartiments », car certaines de ces espèces pourraient répondre de manière différente voire opposée aux modifications du climat. Par ailleurs, afin de considérer la végétation dans son ensemble, il faudrait évaluer auparavant l'évolution des habitats associés à chaque type de végétation.

Globalement, parmi les 123 taxons étudiés sur l'ensemble de l'estuaire de la Seine, environ 35 espèces apparaissent comme menacées directement par le changement climatique, 60 à 65 espèces ont été classées comme « neutres » et ne devraient donc pas être affectées, et un peu moins d'une trentaine devraient au contraire bénéficier des tendances climatiques futures.

Réalisée à partir de données topographiques et bathymétriques, la simulation de montée des eaux a permis d'identifier les zones susceptibles d'être directement inondées pour une hausse du niveau marin de 1 mètre (estimation haute pour 2100). A partir d'une extraction de la base de données DIGITALE, la flore de ces zones inondables/submersibles a ensuite été analysée selon son degré de tolérance vis-à-vis de l'inondation et/ou de la présence de sel.

Bien que les données aujourd'hui disponibles ne représentent qu'un faible échantillon de la réalité, cet exercice met en évidence la sensibilité des prairies humides plus ou moins saumâtres à une hausse du niveau marin. Tandis que certaines espèces communes telles que le Trèfle rampant (*Trifolium repens*) et le Pâleur commun (*Poa trivialis*) seraient en déclin, du fait d'une faible tolérance à la présence de sel, d'autres espèces comme le Trosart maritime

(*Triglochin maritimum*) devraient être capables de se maintenir. Il est par ailleurs possible que les eaux estuariennes atteignent le Marais Vernier, ce qui pourrait avoir d'importantes conséquences sur sa biodiversité. Même en cas d'inondations ponctuelles, de nombreuses espèces pourraient en effet être amenées à disparaître, comme le Rossolis à feuilles rondes (*Drosera rotundifolia*) ou la Laïche bleuâtre (*Carex panicea*).

« Généralement la salinité et l'inondation sont considérées comme les facteurs environnementaux principaux régissant la zonation des phanérogames », c'est pourquoi il est important de développer le type d'approche qui a été proposé dans le cadre de l'expertise. Au delà même des conséquences d'une élévation du niveau marin, le déplacement du front de salinité et les conditions d'inondations ou de submersion futures sont des problématiques qui nécessitent d'être approfondies. Par ailleurs, seules les espèces considérées comme menacées ont été prises en compte dans cette étude, et il serait pertinent d'appliquer la même démarche sur les espèces communes mais structurantes de certains habitats ou végétations. Cela permettrait d'aborder le changement climatique selon une approche intégrée, et de réfléchir aux conséquences pas seulement en termes de biodiversité mais également en termes de fonctionnalités estuariennes.

Néanmoins, compte tenu de la multiplicité des facteurs agissant sur la flore et la végétation, il reste délicat d'attribuer les changements déjà observés et à venir uniquement aux variations du climat. En effet, les pressions anthropiques exercées sur le milieu à divers niveaux sont autant de causes possibles de changement : pratiques agricoles (impacts directs sur les espèces et indirects via la pollution des eaux et/ou des sols), aménagements portuaires, urbanisation et occupation des sols, pollution de l'eau (contamination en métaux, déficit en oxygène dissous,...).

Bien que certains scientifiques tentent de faire face à ces contraintes en créant des modèles de plus en plus sophistiqués, l'étude de la répartition des espèces en fonction des conditions climatiques (température, précipitations) reste pour l'instant la meilleure alternative pour prévoir l'évolution de la végétation. Grâce à la mise en place de suivis réguliers qui pourront éventuellement s'intégrer aux démarches d'observatoire déjà initiées à une échelle régionale, de nouvelles observations pourraient compléter les connaissances actuelles. Par exemple, une meilleure connaissance de la structuration phytosociologique des habitats estuariens permettrait de mieux cerner la sensibilité des espèces au changement climatique. A cet égard, le champ d'investigation pourrait être étendu aux Bryophytes et au domaine aquatique (algues macrophytiques, algues planctoniques, etc.) car très peu de données existent sur ces espèces sur l'estuaire de la Seine¹⁹.

Dans une perspective de développement, d'aménagement ou encore de restauration, le développement des espèces invasives et des espèces allochtones en général devrait être suivi, au regard de la forte sensibilité de l'estuaire aux espèces exogènes. En agrandissant la zone d'étude au niveau supra-régional voire national, il serait par ailleurs possible d'identifier les espèces susceptibles d'apparaître en Haute-Normandie selon les conditions climatiques futures modélisées à plus grande échelle, et d'obtenir ainsi une image plus précise de la flore et de la végétation de l'estuaire de la Seine à moyen/long terme.

Enfin, la Direction Régionale des Affaires Culturelles a réalisé une étude sur l'évolution passée de la végétation qui pourrait compléter ce volet de l'expertise. Cela pourrait être intéressant afin d'analyser l'évolution historique des végétations, de la plaine alluviale notamment, et d'évaluer les grandes tendances de cette évolution en fonction du passé climatique de l'estuaire, mais aussi et surtout de l'impact des actions anthropiques. Cet instrument ne permettra pas cependant de se faire une idée précise par rapport au climat pour

¹⁹ Se référer au rapport annexe correspondant pour connaître les plantes étudiées

les derniers siècles.

3. Apports de la modélisation : le cas de l'ichtyofaune

La mise en évidence de certaines relations, exprimées essentiellement à partir des données de suivi, permet de développer des modèles décrivant le fonctionnement du système considéré et son évolution dans un environnement particulier. Appliqués aux scénarii proposés par les climatologues, ces modèles peuvent ainsi fournir les réponses potentielles des organismes aux variations du climat mais la complexité des écosystèmes rend difficile la prédiction à long terme. La plupart des modèles expliquant correctement la distribution des espèces et décrivant de manière relativement fiable leur évolution concerne peu d'espèces et essentiellement des espèces terrestres. En effet, il faut un minimum de trente années de suivis pour dégager une influence du changement climatique quelconque et il existe peu de jeux de données d'observation aussi longs en ce qui concerne les milieux aquatiques, à l'exception peut-être de quelques espèces emblématiques ou d'intérêt commercial. De plus, en raison de la multiplicité des méthodologies employées et de la spécificité des réponses des organismes, les possibilités de comparaison et d'extrapolation à d'autres espèces sont limitées.

Néanmoins, l'approche expérimentale permet parfois de s'affranchir de la nécessité de disposer de longues séries temporelles. De cette manière, l'influence de la température et celle de la latitude ont déjà été mises en évidence sur la croissance et sur la reproduction (nombre et taille des œufs, âge à maturité, taille des géniteurs,...) de certains poissons, permettant ainsi d'évaluer leur sensibilité aux variations de température.

De manière générale, la majorité des modèles développés jusqu'à présent repose sur la théorie des niches. Grâce à la notion de niche thermique émergeant de la thermoécologie, les conditions optimales et les conditions limites de température sont ainsi connues pour certaines espèces et même certains stades, à partir des phénomènes agissant à différentes échelles (des enzymes mitochondriales au comportement de l'individu). Ainsi, la figure 8 indique que la température optimale pour le développement de la perche canadienne ou perchaude (*Perca flavescens*) est de 23°C, température à laquelle l'activité métabolique est maximale. Au-delà d'environ 27°C, un certain nombre de fonctions ne sont plus réalisées par l'organisme.

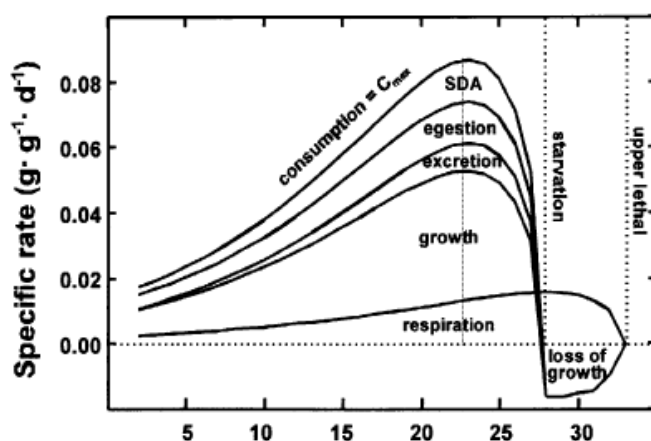


Fig. 3 The energy budget of a yellow perch as a function of temperature. Note the rapid decline in growth as temperature increases beyond 25°C. The vertical dotted line at 23°C indicates the optimal temperature and maximum metabolic scope for this species. From Kitchell et al. (1977), used with permission

Figure 8 : Enchaînement des processus physiologiques (Ficke et al., 2007)

Ce type d'avancée permet de se projeter et d'apprécier l'évolution possible des espèces à travers notamment leur taux de survie face à une augmentation de température, à l'instar de la grande alose (*Alosa alosa*) pour laquelle les possibilités de survie et de croissance des jeunes ont été analysées dans un contexte de changement climatique. Néanmoins, bien que ces modèles aient globalement une bonne capacité à expliquer et à prédire la distribution des espèces, le manque de données d'observations limite à nouveau la validation de certaines propriétés, et l'expérimentation aboutit bien souvent davantage à la définition de la « niche potentielle ou théorique » d'une espèce, qu'à celle de la « niche réalisée ». En effet, il est nécessaire de connaître au moins les interactions avec les autres espèces et avec les autres compartiments biologiques pour se rapprocher de la « niche réalisée » et déterminer correctement l'aire de répartition réelle d'une espèce. En particulier, une bonne connaissance des relations trophiques et de la répartition des proies d'une espèce et de son évolution est indispensable. La capacité d'adaptation doit également être prise en compte, d'autant plus que certains organismes sont capables de changer de niche écologique.

Parmi tous les types de modèles existants, les modèles basés sur la dynamique des populations permettent d'aborder l'évolution des espèces à une échelle locale, en intégrant plusieurs facteurs environnementaux déterminants dans la répartition et la survie des individus.

Bien que le changement climatique soit de plus en plus présent dans de nombreux travaux de recherche, un seul projet traite de ses effets sur l'ichtyofaune dans l'estuaire de la Seine. A une échelle plus large, quelques modèles ont été développés sur les poissons migrateurs européens ou encore sur des espèces aquatiques de bassins versants et d'estuaires néo-zélandais.

Afin d'avoir une image plus précise de l'ichtyofaune de l'estuaire de la Seine à l'horizon 2100, un modèle de niche a été appliqué au territoire pour estimer l'évolution des poissons migrateurs présents à une échelle supra-régionale. Globalement, les résultats présentés dans la figure 9 supposent que l'estuaire de la Seine resterait un milieu favorable pour les espèces déjà présentes aujourd'hui et pourrait potentiellement accueillir de nouvelles espèces grâce à des conditions environnementales favorables.

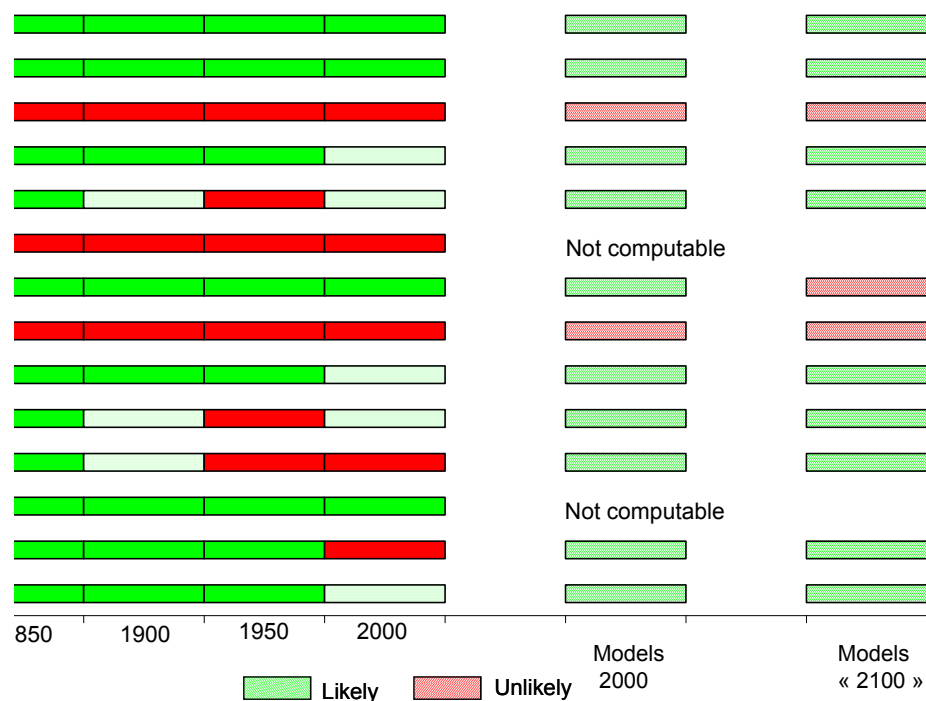


Figure 9 : Présences observées à différentes périodes (1850, 1900, 1950, 2000) des espèces migratrices présentes sur la façade atlantique européenne et projections issues des modèles de niches (Béguer, et al., 2007) pour 2000 et 2100.

Finalement parmi les espèces étudiées, seul l'éperlan (*Osmerus eperlanus*), aujourd'hui présent, devrait tendre à disparaître du paysage aquatique de l'estuaire. A contrario, les conditions environnementales de l'estuaire de la Seine devraient devenir plus favorables pour la grande alose (*Alosa alosa*), l'esturgeon européen (*Acipenser sturio*), le saumon atlantique (*Salmo salar*) et la lamproie marine (*Petromyzon marinus*).

Bien que ce type d'approche permette d'appliquer des modèles plus larges à une petite échelle, les résultats doivent être utilisés avec précaution et replacés lorsque c'est possible dans un contexte plus général. En effet, il est difficile d'analyser les changements régionaux sans prendre en compte les changements plus globaux. Dans le cas présent, l'étude des populations des espèces migratrices dans l'estuaire de la Seine ne peut être déconnectée de l'étude des mêmes espèces sur l'ensemble de la façade atlantique européenne. Par ailleurs, certaines conditions locales particulières peuvent interférer avec les résultats issus du modèle statistique construit à une échelle globale.

4. Le plancton

Les organismes planctoniques sont sensibles aux fluctuations climatiques (graduelles ou extrêmes) mais également à la qualité de l'eau. Miller et Harding (2007) ont proposé un modèle statistique liant les forçages climatiques à l'intensité du bloom phytoplanctonique dans un milieu estuarien, la baie de Chesapeake, en se basant notamment sur l'observation de blooms phytoplanctoniques d'intensité maximale pendant les années chaudes et humides (fortes précipitations). Malgré le grand nombre de travaux sur la diversité du compartiment phytoplanctonique au niveau de ce même écosystème, une synthèse sur les effets potentiels du changement climatique sur la production primaire et le risque d'eutrophisation s'avère difficile (Pyke et Najjar, 2008). Il est cependant clair que les modifications attendues au niveau de la qualité de l'eau et l'augmentation de la température devraient modifier la composition phytoplanctonique et par conséquent la productivité primaire.

Au niveau de l'estuaire de la Seine, l'absence de suivis réguliers du phytoplancton au niveau de la zone oligohaline et mesohaline empêche toute analyse quantitative. Toutefois, les modifications des rapports en amont en termes de composés azotés (N) et des phosphates (P), combinées à l'augmentation de la température et aux variations hydrologiques de l'estuaire pourraient modifier la composition du phytoplancton, la production primaire et les risques d'eutrophisation. Au niveau de la Manche orientale, Gomez et Souissi (2007, 2008), ont montré qu'une anomalie thermique (négative l'hiver ou positive l'été) peut avoir des conséquences directes sur la composition phytoplanctonique et sur la taille des espèces. La modification de la diversité phytoplanctonique devrait ensuite se répercuter sur la production primaire et sur les niveaux trophiques supérieurs.

Le suivi de phytoplancton réalisé au niveau du pont de Normandie en 2005 (année exceptionnelle de point de vue débit et anomalie thermique) dans le cadre des campagnes EURYPOND (programme Seine-Aval) a mis en évidence la dominance de diatomées d'origine marine, ce qui confirme l'intrusion saline favorisée par un faible débit en 2005 (Devreker et al., soumis).

Les conséquences des extrêmes climatiques et hydrologiques sur la composition des communautés zooplanctoniques ont été bien documentées dans l'estuaire Mondego au Portugal (Marques *et al.* 2007). En effet, il s'avère que les communautés planctoniques tracent parfaitement l'intrusion saline et représentent un bon indicateur pour développer (ou renforcer) les suivis à long-terme du compartiment planctonique dans l'estuaire de la Seine.

Si la tendance à l'élévation du niveau marin se renforce et si la diminution du débit de la Seine se confirme, on peut s'attendre à une modification de la composition planctonique au niveau de l'embouchure de la Seine. Ce secteur étant particulièrement intéressant pour les communautés planctoniques, il serait donc intéressant de suivre les modifications hydro-climatiques des prochaines années au niveau d'un site localisé en aval du pont de Normandie, et de suivre l'évolution des caractéristiques actuelles de l'écosystème, en particulier au niveau de la zone polyhaline (estuaire marin) à la limite embouchure-baie de Seine orientale. Toutefois, la présence de communautés planctoniques marines plus diversifiées que les communautés typiquement estuariennes, plus ou moins marquée selon la marée, demandera une modification de la stratégie d'échantillonnage et un effort supplémentaire pour quantifier la diversité planctonique. Cette étape de travail est indispensable pour identifier le type d'écosystème planctonique qu'on pourrait observer en fonction de la dynamique future du front de salinité.

Au niveau de la zone de gradient de salinité, c'est-à-dire de l'estuaire moyen, le zooplancton est souvent dominé par un faible nombre d'espèces. Cet écosystème planctonique est généralement associé à la dynamique du bouchon vaseux, et dépend non seulement de la production phytoplanctonique dans l'estuaire moyen, mais également des apports de phytoplancton amont (eau douce) et aval (marin) et de la matière organique.

Le programme Seine-Aval a permis d'améliorer considérablement les connaissances écologiques sur le rôle du copépode majoritaire *Eurytemora affinis*, et plus récemment, sur les copépodes plus thermophiles, *Acartia* sp. Dans l'estuaire de la Seine et plus généralement dans les estuaires où *E. affinis* est l'espèce dominante, celle-ci est au centre du réseau trophique, durant au moins la première moitié de l'année. En tant qu'espèce à tendance opportuniste, elle se nourrit sélectivement de phytoplancton (Tackx et al., 2003), mais aussi certainement de bactéries attachées aux particules en décomposition composant la MES (Powell & Berry, 1990; Crump et al., 1998). Dans les niveaux supérieurs, cette espèce sert elle-même de nourriture aux poissons (stades larvaires, juvéniles et adultes), aux mysidacés (principalement *Neomysis integer*) et aux décapodes planctoniques tels que la crevette grise *Crangon crangon*.

Dans la baie de Chesapeake, l'analyse de données pluriannuelles de zooplancton sur 16 ans a montré des différences de réponses des copépodes majeurs, *E. affinis* et *A. tonsa*, aux conditions climatiques (Figure 10). D'une façon schématique et synthétique, une année humide favorise le développement d'*E. affinis* et le recrutement de poissons, alors qu'une année sèche est plus favorable au développement d'*A. tonsa* (Kimmel et al., 2006). Les suivis réguliers du zooplancton au niveau du pont de Normandie, réalisés avec le même protocole d'échantillonnage (Devreker et al. 2008), montrent qu'en plus du débit, la température de l'eau est également un médiateur important dans la compétition indirecte entre *Eurytemora* et *Acartia*. Il semblerait en effet qu'une température élevée favorise le développement d'*Acartia*. Toutefois, la température seule ne suffit pas pour expliquer les stratégies de cycle de vie de ces deux espèces. L'étude détaillée de l'importance relative des deux principaux copépodes, *Eurytemora* et *Acartia*, et de leur dynamique, en relation avec les variabilités climatiques²⁰, devrait nous permettre de mieux comprendre les changements majeurs au niveau de cet écosystème, notamment les successions saisonnières *Eurytemora/Acartia*. Selon un scénario simple d'augmentation de la température et de la salinité, les connaissances actuelles suggèrent que ces variations des conditions climatiques se soldent par une augmentation de l'importance d'*Acartia* par rapport à *Eurytemora* au niveau du pont de Normandie.

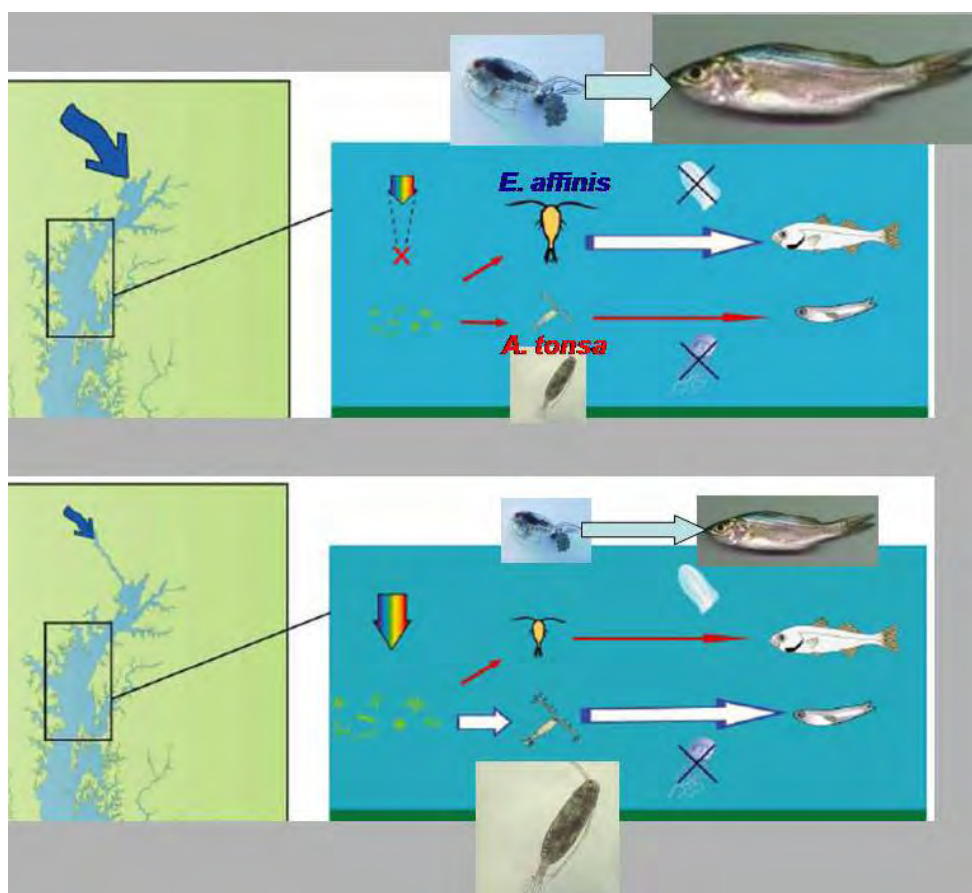


Figure 10 : Schéma synthétique représentant les liens entre la variabilité climatique, traduite ici par des régimes hydrologiques contrastés (haut : forts débits ; bas : faibles débits), et le développement des principaux copépodes dans un milieu estuarien, ainsi que les conséquences sur le recrutement de poissons. Schéma communiqué par Dr. Dave G. Kimmel (modifié d'après Kimmel *et al.*, 2006) et modifié par S. Souissi.

²⁰ Actuellement en cours d'étude dans le cadre du projet ZOOSEINE

La vérification de l'hypothèse précédente nécessite le développement d'une approche expérimentale novatrice. Basées sur une simulation de changement climatique (augmentation de température de 4°C), des expériences réalisées à Wimereux, ont déjà montré la forte plasticité du copépode *E. affinis*, capable de se développer à 24°C mais avec une faible fitness*, mais aucune expérience similaire n'a encore été développée sur *Acartia*. Cette approche expérimentale est indispensable pour la compréhension des mécanismes des individus et des populations des espèces clés de copépodes, en particulier pour la compréhension des capacités adaptatives des organismes planctoniques, et il est donc nécessaire de poursuivre et de renforcer ce type d'expérimentation. Les modèles biologiques *Eurytemora* et *Acartia* offrent plusieurs avantages pour étudier expérimentalement les effets du changement climatique : cycle de vie court, cultures maîtrisées dans certains laboratoires, plusieurs travaux dans la littérature, etc.

Le couplage entre l'approche d'observation *in situ* et l'approche écophysiological est indispensable pour bien comprendre les enjeux des changements climatiques au niveau des écosystèmes estuariens. Certains travaux récents ont déjà montré un lien direct entre la tolérance thermique du métabolisme de certaines espèces de poissons et d'invertébrés, et le déclin de leurs populations. Dans le but de compléter ces deux approches (*in situ* – laboratoire), la modélisation individu-centrée pourrait apporter un ensemble d'outils pour tester les différents scénarios d'évolution du climat. Récemment, Dur *et al.* (2009) ont montré l'importance de cette approche pour comprendre les effets combinés de la température et de la mortalité sur la reproduction du copépode *E. affinis*. Le couplage entre un modèle individu-centré et un modèle hydrodynamique a été également développé dans l'écosystème estuarien de la baie de Chesapeake, pour étudier les effets de la restauration (amélioration de la qualité de l'eau) sur l'écosystème pélagique (Adamack, 2007).

Au niveau de l'estuaire de la Seine, les travaux doivent se poursuivre suivant cette même approche multidisciplinaire et intégrée, afin d'aboutir à l'émergence de modèles réalistes et fiables, capables de proposer des outils pour répondre aux questions scientifiques mais également des gestionnaires, et ceci à différentes échelles spatio-temporelles. Au-delà de ce travail de modélisation, les suivis actuels et les approches expérimentales devraient être renforcés pour répondre aux nouvelles questions soulevées par l'expertise.

5. Bilan et recommandations

Plusieurs difficultés relatives à l'estimation de l'évolution des habitats et des peuplements ont été identifiées au travers de l'analyse bibliographique. De manière générale, les scientifiques ne disposent pas suffisamment de longues séries d'observations pour prévoir de manière fiable et précise les réponses des organismes au changement climatique. De plus, les travaux existant concernent bien souvent des espèces précises, et la spécificité de leurs réponses limite la généralisation des résultats. Ces premières contraintes mettent en exergue la nécessité de construire une stratégie d'observation commune à long terme, avec des objectifs et une méthodologie adaptés, permettant d'avoir une vision holistique et intégrée des effets probables des variations climatiques sur l'estuaire de la Seine, sans se heurter à un manque de cohérence du à l'hétérogénéité des méthodes employées. En parallèle, un suivi régulier des habitats directement influencés par le niveau du fleuve ou des nappes (milieux intertidaux, zones humides,...) permettrait d'obtenir des informations complémentaires sur l'évolution des espèces inféodées à ces zones. L'amélioration des modèles décrivant l'élévation du niveau marin, l'évolution hydro-sédimentaire ou plus généralement l'évolution hydrologique de l'estuaire de la Seine, dont l'importance a été soulevée précédemment, permettrait sans doute de compléter ces observations.

De la même manière, l'absence de structure expérimentale de grande envergure au niveau des écosystèmes estuariens, du type Ecotron pour les écosystèmes terrestres, limite l'utilisation de

l'expérimentation comme moyen de connaître les mécanismes régissant les réponses des organismes à différentes gammes de facteurs externes et d'améliorer les prédictions. Un projet similaire dédié en grande partie aux écosystèmes aquatiques est néanmoins en préparation en région parisienne, à Foljuif, et il existe déjà une plate-forme côtière Medimeer (Mediterranean Platform for Marine Ecosystem Experimental Research) à Sète.

Parmi les manques de connaissances identifiés, il semblerait qu'un effort particulier doive être fait concernant les interactions entre les organismes, qu'il s'agisse d'interactions intra ou interspécifiques, entre plusieurs compartiments biologiques ou au sein d'un même compartiment. En effet, les relations trophiques, les relations de compétition (ressources alimentaires, habitats,...) ou encore de parasitisme interviennent de manière importante dans l'évolution des espèces. Une meilleure connaissance de ces interactions permettrait de ce fait d'avoir une meilleure compréhension du fonctionnement global des écosystèmes et donc de prévoir de manière plus fiable l'évolution des espèces grâce à des modèles plus sophistiqués. Certains modèles ont déjà été couplés pour palier à ces incertitudes, par exemple dans le domaine de l'avifaune.

Par ailleurs, la capacité d'adaptation des organismes est encore peu prise en compte dans l'évolution des peuplements du fait d'un manque de connaissances. Pourtant, il semblerait que ce facteur soit prépondérant dans l'évolution des espèces et bien souvent sous-estimé. Les observations des changements phénologiques et les modifications des aires de répartition biogéographique en témoignent notamment.

Enfin, la déconvolution des facteurs responsables des patterns observés reste délicate en raison notamment de la multiplicité des paramètres intervenants dans l'évolution des espèces.

En matière de modélisation, l'émergence récente d'applications bioclimatologiques a permis d'insister davantage sur des questions fondamentales en méthodologie et en écologie théorique. Ainsi, certaines notions écologiques fondamentales ont été abordées sous l'angle du changement climatique global (niches écologiques, capacités d'adaptation du vivant, trajectoire d'un système,...). Bien qu'il faille considérer l'évolution d'une espèce à une échelle globale pour mieux appréhender son évolution à une échelle régionale, les approches de modélisation novatrices adaptées à des petites échelles telles que l'estuaire de la Seine, permettent de mieux intégrer les réponses des individus et des populations à l'instar des modèles individu-centrés.

Le changement climatique et, en particulier, ses conséquences sur la biologie et la physiologie des organismes et sur les habitats et les peuplements, est souvent négligé dans les projets d'aménagement des estuaires et dans les politiques de gestion. Pourtant, au regard des impacts recensés dans cette étude, il apparaît évident que ces transformations auront des répercussions sur le fonctionnement global de l'estuaire, tant au niveau écologique qu'au niveau socio-économique. Afin de tirer parti de ces transformations, de s'adapter et d'anticiper les futures conditions environnementales, toute action de restauration ou de reconquête de l'estuaire devrait nécessairement intégrer ces éléments de connaissances dans une perspective à moyen et long terme.

Tandis que des travaux récents tentent d'adopter une démarche intégrée en considérant les impacts du changement climatique sur les écosystèmes dans une perspective de gestion du territoire, cette logique est encore trop peu abordée sur le territoire français. Néanmoins, le réseau européen ENCORA et sa déclinaison française le RFRC (Réseau Français de Recherche Côtière) représentent depuis 2004 un outil de base pour échanger des connaissances autour de la problématique du changement climatique global et en particulier de ses impacts sur les systèmes côtiers. Dans de telles perspectives, il est important de ne pas considérer le changement climatique et ses impacts uniquement comme une « perturbation négative », mais également comme une « opportunité de changement » permettant une

adaptation du fonctionnement actuel des écosystèmes aux conditions environnementales futures. En effet, les perturbations, qu'elles soient d'origine anthropique ou naturelle, sont parfois indispensables à la dynamique des systèmes et à leur maintien. L'instauration d'une démarche scientifique écologique devrait permettre de répondre à de tels objectifs de gestion, en pointant les processus d'adaptation des écosystèmes aux variations climatiques et en les intégrant dans de nouvelles stratégies d'aménagement et de développement. En comparant la capacité d'évolution et d'adaptation des organismes et en analysant les biens et services fournis au travers des fonctionnalités estuariennes, le choix de privilégier telle ou telle espèce ou tel ou tel écosystème dans les projets de restauration ou de réhabilitation pourra par exemple être affiné.

III. Un milieu étroitement lié à son contexte socio-économique

On sait aujourd'hui que le réchauffement global auquel nous assistons est en grande partie d'origine anthropique. Si le phénomène s'est accéléré à la fin du siècle dernier, les effets ne se font pas ou peu ressentir pour le moment et il est donc difficile de faire prendre conscience aux populations de la réalité de celui-ci. Bien qu'un retour en arrière ne soit pas possible, l'atténuation du réchauffement et donc de ses conséquences est encore envisageable. Le seuil « fatidique » d'augmentation de la température moyenne mondiale en termes d'impacts potentiels a été fixé à 2°C par le GIEC.

Au niveau mondial, européen ou encore sur le plan national à l'image du Plan Climat adopté en France, les politiques insistent sur l'importance de réduire les émissions de gaz à effet de serre et plus généralement d'atténuer le réchauffement. La nécessité de développer des politiques d'adaptation commence également à s'ancrer dans les esprits, en particulier sur les territoires littoraux qui sont les plus exposés aux risques de submersion.

Que les pays adoptent une politique de mitigation ou qu'ils privilégient une logique d'adaptation, le changement climatique aura des répercussions sur la société à plusieurs niveaux. Ces transformations peuvent à leur tour se répercuter sur l'environnement et sur le climat, dont les conditions futures détermineront elles-mêmes en partie les futurs schémas socio-économiques.

Le territoire estuarien se caractérise par une mosaïque administrative, ce qui se traduit par une multitude de conseils et d'instances décisionnelles à des échelles différentes, mais souvent redondantes. Une réflexion à l'échelle de l'estuaire devient alors un véritable enjeu pour le devenir de ce territoire qui correspond à une réalité fonctionnelle économique, sociale, hydrographique, écologique... Les plans d'aménagement, de planification et de gestion de la part des pouvoirs publics se multiplient, dans le but d'aboutir à une meilleure coordination des acteurs : SRADT (Schéma Régional d'Aménagement et de Développement du Territoire), CPER (Contrat de Projet Etat/Région), DTA (Directive Territoriale d'Aménagement), SAGEs, charte du Parc Naturel Régional des Boucles de la Seine Normande, etc. En matière de prise en compte du changement climatique et d'anticipation de ses conséquences, bien que les pouvoirs territoriaux soient conscients de la nécessité d'agir et de s'adapter, cette problématique n'apparaît peu voire pas du tout dans l'ensemble de ces documents.

1. Quelle prise en compte du changement climatique par les acteurs aujourd'hui ?

a) Une enquête auprès des acteurs porteurs d'enjeux concernés : premiers résultats

A partir de ce constat, une série d'entretiens semi-directifs ouverts a été réalisée auprès des acteurs publics, gestionnaires et associatifs du territoire afin de comprendre la façon dont ils perçoivent le phénomène et la façon dont ils conçoivent l'adaptation au changement climatique. Les acteurs ciblés appartiennent à des structures qui s'engagent à

moyen/long terme et qui, de ce fait, sont ou seront prochainement amenées à se poser la question du suivi d'une logique d'adaptation, à travers des choix d'investissement ou encore de planification.

Tout d'abord, un premier constat ressort des entretiens : bien que la plupart des acteurs interrogés soient **conscients qu'un changement climatique s'opère**, ils ont des difficultés à appréhender le phénomène car ils peinent à **en identifier les manifestations concrètes**. Celles-ci sont entachées de fortes incertitudes, parfois sur le sens même de l'évolution des caractéristiques physiques de l'estuaire. La hausse du niveau marin semble être leur principale préoccupation en termes de conséquence à laquelle ils doivent faire face (submersion et inondation), mais leurs interrogations restent succinctes. En effet, à l'exception d'acteurs dont les activités sont directement concernées par le risque de submersion, aucun ne s'interroge réellement sur l'ampleur du phénomène (i.e. la vitesse de montée des eaux).

Malgré ce manque de connaissances, un **consensus sur la nécessité d'agir** semble évident, de manière plus ou moins importante selon les acteurs, en fonction de leurs priorités d'action. En effet, les mesures et choix ayant une portée à court terme prennent généralement le pas sur ce phénomène à large échelle temporelle. Par ailleurs, les acteurs consultés ont tendance à ne pas différencier les politiques environnementales (confusion entre adaptation, mitigation ou encore développement durable), ce qui ne facilite pas la prise en compte des impacts climatiques dans leurs politiques d'action. De plus, de par leur difficulté à identifier les impacts du changement climatique sur leurs propres activités, et à formuler clairement ce que cela implique et nécessite en termes d'adaptation, la plupart des acteurs préfèrent adopter une **stratégie attentiste** quant à d'éventuelles actions de changement. Même certains acteurs porteurs d'enjeux tels que les Ports, pourtant conscients des problèmes que devrait engendrer la modification du climat vis-à-vis de leurs activités, n'intègrent pas pour l'instant ces changements à venir dans leur politique d'aménagement, du fait des incertitudes sur les conséquences physiques du changement (hydrologiques et sédimentaires principalement).

Les questions concrètes émergentes concernent essentiellement les risques de submersion ou d'inondation, en particulier dans les secteurs déjà exposés, ce qui amène ainsi certains acteurs à s'interroger sur une éventuelle aggravation de ces risques en réponse au changement climatique. Au-delà de la vulnérabilité directe face à la hausse du niveau marin, des questions de gestion sont également soulevées, en lien notamment avec une probable remontée du front de salinité : impact sur l'approvisionnement en eau potable, sur les équipements industriels de prélèvement d'eau... Ceci montre entre autre que le risque lié à une baisse de la disponibilité de la ressource en eau n'est pas une question à négliger, bien que celle-ci ne soit pas mise en avant par les acteurs.

En tout état de cause, l'adaptation au changement climatique est aujourd'hui davantage pensée en termes d'ajustements que de « rupture ». Les propositions pour diminuer la vulnérabilité du territoire divergent vis-à-vis de la logique d'action à suivre, à l'image de la gestion du risque sur les zones côtières. En effet, plusieurs collectivités territoriales s'interrogent sur leur politique de gestion du trait de côte et souhaitent dorénavant favoriser une politique de « retrait » plutôt que de « défense » contre la mer dans les zones littorales exposées. Ces doutes sur la meilleure manière de s'adapter et d'anticiper les impacts à venir ne permettent pas pour l'instant que les recommandations théoriques affichées dans certains documents de planification débouchent sur des actions précises, qu'il s'agisse d'obligations réglementaires ou non.

Conscients des obstacles/freins à la mise en œuvre d'une politique opérationnelle et efficace en matière d'adaptation au changement climatique, les personnes interrogées montrent à

travers leurs réponses, qu'ils sont dans l'attente de propositions pour mieux appréhender et mieux anticiper le phénomène. Un « **système d'information et d'aide à la réflexion** » adapté à l'échelle de l'estuaire leur permettrait dans un premier temps de mieux cerner les impacts potentiels locaux des modifications climatiques et de mieux comprendre ce que cela implique et nécessite en matière de gestion du territoire. Dans le but d'engager une telle réflexion, des scénarii pourraient être construits de façon commune grâce à la mise en perspective des résultats de divers disciplines et à la participation des acteurs concernés. L'instauration d'un dialogue régulier entre les scientifiques et les acteurs publics et gestionnaires s'avère de ce fait indispensable et pourra se faire à travers la mise en place de dispositifs cognitifs de médiation. Au-delà d'un partage des connaissances, une réflexion pourra également s'engager autour de la question de l'adaptation, en s'appuyant notamment sur des problèmes et des menaces déjà identifiés, susceptibles de s'aggraver sous les forçages climatiques actuels et à venir.

Sans traiter forcément de l'adaptation au changement climatique, deux approches principales en matière de mode de gestion des ressources naturelles abordent la question de l'adaptation dans la littérature : la gestion adaptative et la gestion collaborative.

Initialement pensée dans un objectif de conservation des écosystèmes et conçue pour aider des décideurs à mener des actions dans des situations complexes, la **gestion adaptative** propose de fonder les actions sur la base d'expérimentations conduites de manière scientifique, afin d'acquérir une meilleure connaissance des systèmes et de réduire les incertitudes. Peu d'expérimentations ont cependant réellement été mises en oeuvre, du fait notamment des limites de la modélisation, et de coûts et risques élevés au regard d'intérêts pas toujours convergents. Une nécessité s'impose néanmoins pour pouvoir agir, celle de prendre en compte les conflits sous-tendant les actions publiques environnementales.

La **gestion collaborative** repose elle, sur l'idée que la gestion de biens communs peut être fondée sur la participation des acteurs directement concernés par leur utilisation. Alors que certains affirment que l'intérêt individuel des usagers sous-tend l'impossibilité d'une gestion commune d'une ressource limitée, d'autres s'accordent à dire que l'élaboration de dispositifs de gouvernance peut conduire à l'implication des usagers dans la gestion de ressources naturelles communes et contribuer ainsi à sa réussite. Il semble néanmoins que sur un territoire comme l'estuaire de la Seine, où les enjeux sont multiples et où les modes de gestion se situent à différents niveaux d'échelle, l'application de ce principe pose des difficultés. En effet, les nombreux systèmes de gestion collaborative mis en évidence concernent souvent des systèmes très localisés, organisés autour d'un mode d'utilisation unique de la ressource et dont la capacité d'adaptation à de nouveaux enjeux n'est pas prouvée.

Pour répondre à des phénomènes globaux comme le changement climatique, les travaux suggèrent que la mise en place de systèmes de gestion collaborative requiert à la fois un combat permanent afin d'impliquer les acteurs et de régler les éventuels conflits, et l'instauration de modes de gouvernance à plusieurs niveaux. Des stratégies prometteuses pour satisfaire de telles exigences peuvent s'appuyer sur des processus de délibération entre scientifiques, usagers et acteurs publics ; des arrangements institutionnels complexes, redondants et interconnectés ; une variété institutionnelle reposant sur des combinaisons de formes de gouvernance.

Construit autour de la complémentarité entre la gestion adaptative, basée sur la production de connaissances utiles pour les décideurs/gestionnaires par le biais d'expérimentation mais qui présente un certain nombre de limites, et la gestion collaborative qui insiste sur la nécessaire implication des usagers et se préoccupe de la production commune d'accords, le concept d'«

Adaptive Co-Management » propose d'articuler ces deux principes et d'aller au-delà des limites identifiées (conditions de coopération, articulation des différents niveaux d'échelle spatiaux et temporels...). Cette logique d'action apparaît appropriée à la problématique du changement climatique au regard des résultats mis en lumière par les entretiens menés auprès d'acteurs publics et gestionnaires de l'estuaire de la Seine, qui semblent être en attente de la mise en œuvre d'une telle démarche. Cela permettrait à la fois de favoriser les flux d'informations scientifiques, mais aussi de réfléchir de façon commune à une stratégie d'adaptation, en intégrant un maximum d'acteurs et d'usagers du territoire. La gestion des problématiques déjà identifiées pourrait servir de point de départ (gestion du trait de côte, risque d'inondation et de submersion).

b) Une observation des perceptions par les habitants : un chantier à monter

Il apparaît au travers de la littérature, que peu d'études en sociologie s'attardent sur le changement climatique et sur ses effets, en dépit de l'importance des problématiques liées à l'environnement traitées généralement en termes de gestion et de perception. La raison principale est le caractère nouveau du sujet dans les domaines des sciences humaines et sociales, abordé jusqu'ici beaucoup plus par des climatologues, des hydrologues, des écologues, des géophysiciens, etc., que par des recherches en sciences sociales.

Dans le cadre d'un mémoire intitulé *Le changement climatique : perception locale d'un phénomène global ?*, un premier travail a été réalisé par Claire Hanecart sur l'estuaire de la Seine, qui permet aujourd'hui de poser les bases d'un contexte naturel, économique et social. Basés sur une grille reprenant les différents axes de discussion, des entretiens semi-directifs ont été menés sur le Havre et ses environs auprès de scientifiques et non scientifiques, dont l'activité professionnelle était liée ou non à l'estuaire. L'intérêt d'un tel travail était de se faire une idée des représentations sociales de l'estuaire, suivant différentes dimensions et en ne ciblant pas forcément l'évolution climatique : l'estuaire vu comme un paysage et un lieu de loisir, comme un pôle d'activités, comme un milieu pollué (qualité de l'eau et de l'air). Quelles représentations du changement climatique priment en estuaire de la Seine ? Quel regard porte la population sur les politiques environnementales ? Quel regard a-t-elle sur les médias et sur leur façon de représenter le changement climatique ?...

Une première constatation ressort de ces entretiens : il existe une tendance assez forte à la relativisation du risque et des nuisances engendrés par les zones industrielles. Les aspects positifs tels que la création d'emploi prennent le pas sur les inconvénients (pollution et autres risques industriels) et viennent confirmer une culture industrielle plutôt bien ancrée. La même logique s'observe au niveau paysager puisque la population conserve une bonne capacité à occulter le « mauvais » et à s'appuyer sur d'autres éléments pour se reconstruire un paysage « acceptable ».

Concernant les questions relatives au changement climatique, on constate que même au sein des « experts » interrogés, le phénomène n'est pas clairement identifié et de grandes incertitudes persistent sur les causes et les conséquences que l'on peut lui attribuer. L'acceptation de cette évolution est encore plus difficile de la part des non spécialistes, principalement du fait d'un décalage d'échelles : ils ne croient pas réellement au changement puisque cela échappe à leurs perceptions sensorielles et que les conséquences sont peu observables. L'évolution s'opérant sur une échelle de temps de l'ordre des dizaines d'années voire du siècle, ils ont de grandes difficultés à se représenter le phénomène.

Au-delà de la réalité du changement, cette question de perception et de représentation des risques liés au changement climatique est un point important à approfondir car de manière

générale, une véritable et efficace gestion des risques environnementaux nécessite qu'il y ait de la concertation, du dialogue entre experts et « profanes », de la co-construction de solutions acceptables par le plus grand nombre. Il est donc essentiel de mettre en évidence l'existence d'un décalage potentiel entre le risque tel qu'il est reconnu et mesuré par les scientifiques, et le risque dit subjectif, c'est-à-dire tel qu'il est perçu par la population, et de tenter de l'expliquer.

De plus, certains sociologues et géographes s'accordent à dire que la perception des risques est l'un des éléments qui définit la vulnérabilité d'un territoire. Selon eux, la vulnérabilité repose sur la conjugaison de quatre facteurs : l'aléa, l'enjeu, la perception des risques et la gestion des risques, et peut être représentée comme sur la figure 11.

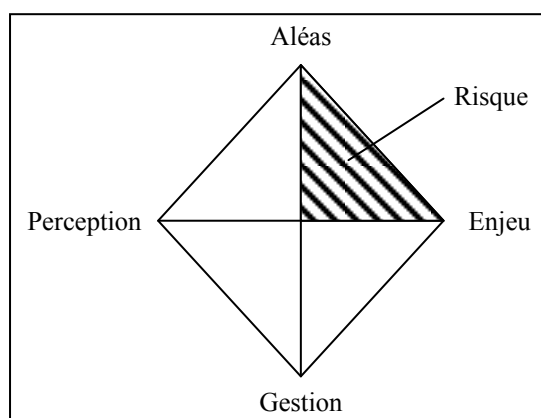


Figure 11 : représentation de la vulnérabilité globale d'un territoire

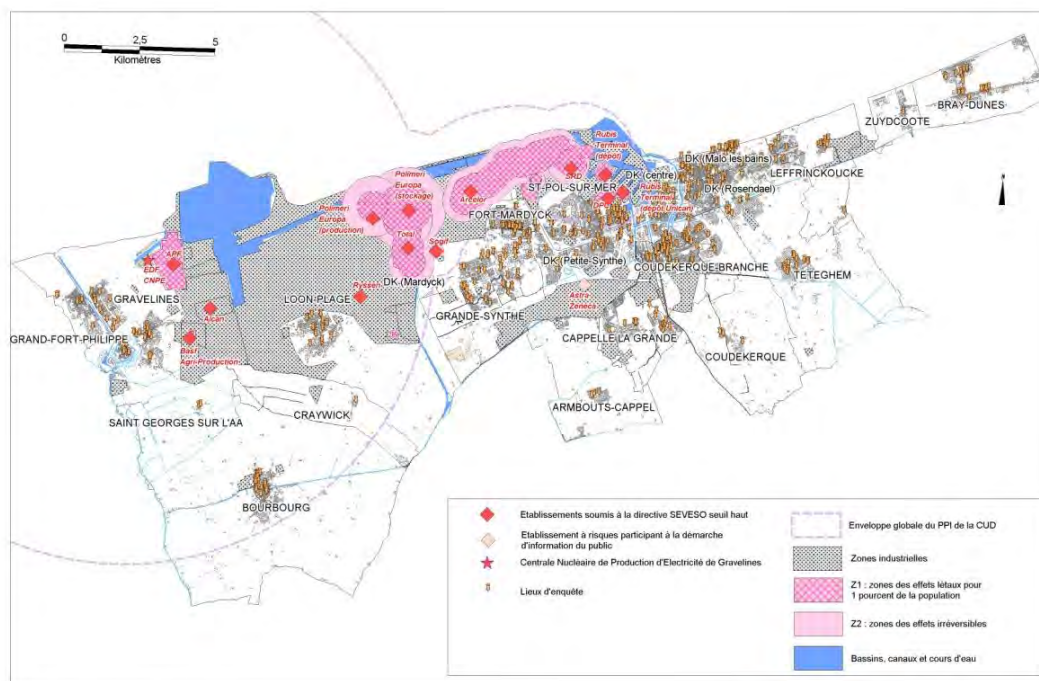
En fonction du risque, défini lui-même par des aléas et des enjeux, et selon la manière dont celui-ci est pris en compte par les gestionnaires (anticipation du risque) et perçu par les habitants, la vulnérabilité d'un territoire est plus ou moins grande. Autrement dit, pour ce qui est de la perception, si les habitants n'ont pas conscience qu'un risque existe ou s'ils l'évaluent mal, la vulnérabilité sera plus importante.

Ainsi, une meilleure connaissance de la perception et de la représentation qu'ont les habitants du changement climatique permettrait de réduire cette vulnérabilité, dans un premier temps en aidant les pouvoirs publics locaux et nationaux à prendre les décisions/mesures adéquates, qui doivent nécessairement être basées sur des constats pour être acceptables et acceptées par le plus grand nombre. La mise en exergue d'un éventuel décalage entre le risque objectif et le risque subjectif devrait également indiquer sur quels points l'information est déficiente et donc quel type d'information donner au public pour que sa perception du risque se rapproche davantage de la réalité. De cette façon, on pourrait aboutir à la naissance ou à l'entretien d'une culture du risque, favorisant à long terme une meilleure gestion du territoire.

Dans cette perspective, la méthode d'enquête par questionnaire semble être la plus adaptée aux objectifs décrits précédemment. Cette méthode, recommandée pour traiter de larges échantillons, devrait en effet permettre d'obtenir des informations quantitatives relativement précises sur l'image de l'estuaire à un moment donné et sur les raisons possibles de cette représentation. Grâce à la méthode des tris croisés, l'influence de la catégorie socio-professionnelle, de l'âge, du genre, de la situation familiale, etc., sur leur façon de voir l'estuaire et de se représenter les risques et autres conséquences engendrés par le changement climatique sur cet espace, pourra être déterminée. Par ailleurs, les résultats pourront être cartographiés, ce qui devrait permettre de déterminer à la fois l'influence de la localisation géographique sur la perception des personnes interrogées, mais aussi les endroits où la perception des risques est la plus altérée vis-à-vis de la réalité. A titre d'exemple, les cartes

suivantes illustrent le type de représentation cartographique possible. Issues d'une enquête en cours, ces cartes représentent la perception du risque et des nuisances industriels par les habitants dans l'agglomération de Dunkerque.

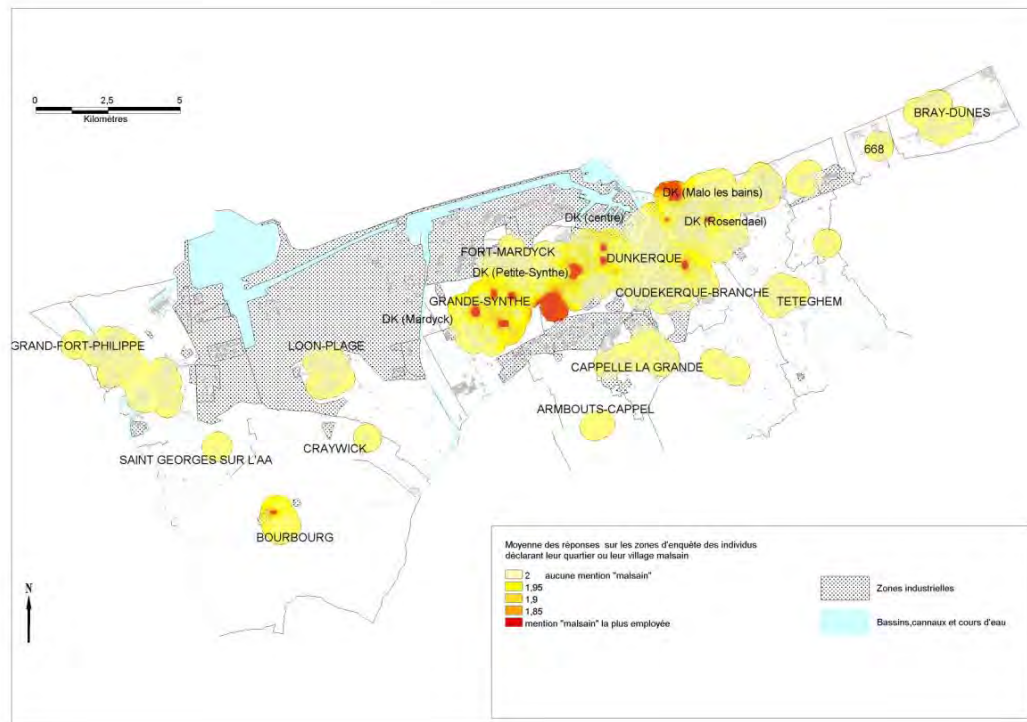
Carte 2 : Sites Seveso du Dunkerquois et lieux de passation des questionnaires



ENQUETE FONCSI - IMN 2009

Source : données cartographiques SPPI 2006 et AGUR 2004

Carte 3 : La perception du caractère malsain de l'environnement sur l'agglomération dunkerquoise



Afin d'obtenir une vision large et réelle des multiples enjeux face au changement climatique, le questionnaire et la méthode proposée devraient être validés par une équipe pluridisciplinaire regroupant à la fois des chercheurs en sciences humaines et sociales (notamment sociologues, économistes, géographes ou encore psychologues sociaux), mais aussi des chercheurs des « sciences exactes » (hydrologues, biologistes, physiciens, chimistes,...) pour vérifier l'exactitude des termes, chiffres, etc., employés pour parler du phénomène. A titre d'exemple, des questions d'évaluation contingente (sur la valeur donnée à telle ou telle aménité*) ou de consentement à payer pourraient être intégrées dans les enquêtes afin de préciser la perception des enjeux économiques des habitants. Par ailleurs, il pourrait également être envisagé de travailler par la méthode des « focus group » et de comparer les réponses au questionnaire d'un groupe à l'autre, dans le but de mieux comprendre les différences de perception qui peuvent exister. Par exemple, en interrogeant des personnes ayant reçu de l'information précise autour de la thématique du changement climatique et d'autres personnes a priori peu ou pas informées, l'impact de la diffusion d'informations sur la représentation des risques et effets du changement climatique sur l'estuaire pourrait être évalué. Les résultats pourraient ensuite se traduire de manière concrète dans la définition de stratégies de communication ou de sensibilisation efficaces.

A long terme, il serait par ailleurs intéressant de réitérer la démarche régulièrement pour observer l'évolution des perceptions du changement climatique et de ses effets dans l'estuaire de la Seine. Certains événements (inondations, décisions politiques...) et la couverture par les médias des avancées en matière de recherche ou des conséquences visibles du changement climatique devraient changer la représentation de la population. En réalisant l'opération de manière régulière, les décideurs pourraient prendre en compte ces nouvelles informations dans leurs politiques de communication relatives à la gestion de l'espace estuarien.

2. Quelles transformations socio-économiques, liées ou non aux évolutions climatiques, peut-on anticiper ?

a) Exemple d'un modèle économique pour simuler la réponse de l'économie du territoire au changement climatique

Les conséquences du changement climatiques étant multiples, les secteurs d'activité socio-économiques affectés sont et seront nombreux. La littérature économique relative à la problématique du changement climatique traduit correctement ce constat, au travers d'études nombreuses et variées abordant la problématique suivant plusieurs approches méthodologiques. Pour la plupart, l'objectif est d'analyser les interactions et impacts de l'évolution du climat sur les activités humaines, afin d'orienter dans un deuxième temps les décideurs publics dans leurs choix de planification, d'investissement... Les travaux publiés se concentrent essentiellement sur les incidences du réchauffement climatique sur l'eau, l'agriculture, la pêche, l'énergie et l'urbanisme.

A titre d'exemple, voici un panel non exhaustif des sujets abordés en économie en matière d'incidence du réchauffement climatique :

- conséquences de la variabilité climatique sur les rendements agricoles et effets des augmentations des phénomènes extrêmes de températures sur l'agriculture
- conséquences des modifications de courants sur le secteur de la pêche
- évolution de la consommation d'électricité selon les différents scénarii de changement climatique et de développement économique, et conséquences sur les politiques énergétiques et les secteurs d'activité correspondants
- conséquences des phénomènes extrêmes (inondations, coulées de boue, tempêtes, etc.) sur l'aménagement du territoire, l'urbanisation et l'habitat, en termes de dommages et de coûts économiques

Dans le contexte d'étude présent, l'estuaire de la Seine, il a été fait le choix délibéré d'aborder la problématique autour de la ressource en eau et donc autour de tous les secteurs d'activité de l'estuaire qui lui sont liés, à savoir, principalement l'agriculture, et sur un second plan l'industrie et les usagers domestiques. D'après un rapport de l'ONU, « *la capacité à fournir une eau saine aux générations futures est compromise* » et de plus en plus de pays vont être confrontés à une pénurie d'eau, en partie du fait d'une demande en expansion (croissance démographique et développement économique) et des modifications hydrologiques liées au changement climatique. Au regard des résultats de l'enquête sociologique menée auprès des acteurs publics et gestionnaires de l'estuaire, il semblerait que ces derniers soulèvent des questions justifiées. L'émergence régulière de nouvelles lois/directives autour de l'eau (gestion, qualité, etc.) traduit également cette préoccupation et l'importance d'une meilleure gestion de cette ressource.

L'estuaire de la Seine a déjà fait l'objet d'une étude économique réalisée récemment, à l'issue de laquelle un modèle input/output a été proposé afin d'estimer les conséquences en termes d'emploi d'une modification de la ressource en eau, considérée ici aussi comme un élément clé de la structure socio-économique de l'estuaire.

A travers la littérature internationale et nationale, de nombreuses méthodes ont été testées afin de déterminer la manière la plus réaliste et la plus exacte possible, pour estimer les impacts de l'évolution du climat sur l'économie. L'intérêt d'une Modélisation en Equilibre Général Calculable (MEGC) est illustré dans de nombreux cas et cette méthode apparaît comme la plus pertinente dans la mesure des impacts économiques du changement climatique (à travers la variabilité de la ressource en eau). Ce type de modèle présente l'avantage de coupler la microéconomie (intégration des ménages) et la macroéconomie (représentation de l'Etat à travers la fiscalité). Il va au-delà des modèles input/output car il permet d'intégrer l'ensemble

des prix de l'économie, à travers notamment l'Etat et la fiscalité, et tous les marchés économiques (marché des biens et services, marché du travail, marché du capital, etc.). Toutes les activités sont prises en compte, ainsi que l'ensemble des facteurs de production et des agents économiques (ménages, firmes, autorité publique, échanges extérieurs), et toutes les composantes macroéconomiques sont modélisées (investissement, épargne des différents agents, balance des paiements, budget du gouvernement).

Un modèle basé sur ces mêmes principes a été développé dans le but de simuler les conséquences locales de la variabilité de la disponibilité de la ressource en eau sur l'économie estuarienne. L'outil repose sur une base de données appelée Matrice de Comptabilité Sociale (MCS), construite elle-même à partir d'un ensemble de données économiques relatives aux secteurs socio-économiques et au territoire concernés. Cette matrice schématise l'équilibre initial de l'économie à un moment donné. Dans notre cas, il s'agit de l'année 2007. L'essentiel des données recueillies concerne l'eau, l'agriculture et la terre. Ces informations se présentent sous la forme de statistiques et d'agrégats économiques (PIB, valeur ajoutée régionale, structure de la fiscalité départementale, revenu des ménages...). De par le manque de certaines données et l'hétérogénéité des échelles spatiales (Haute-Normandie, Seine-Maritime, estuaire de la Seine, bassin versant Seine-Normandie...), la matrice proposée peut-être considérée comme une matrice simplifiée et nécessitera donc d'être complétée pour aboutir à des résultats quantitatifs plus fiables. Néanmoins, la matrice permet déjà de quantifier la demande de facteurs en eau (souterraine et de surface) par les différents secteurs économiques de l'estuaire de la Seine, et la consommation des ménages et des industries en volume et en valeur par secteur d'activité. D'autres paramètres connus permettent également d'affiner le modèle, comme l'impact de la quantité de nitrates présents dans la terre et donc les conséquences en termes de besoins de régulation économique et environnementale, ou encore les changements de pratiques agricoles au regard des variations climatiques.

Deux scénarii ont été testés à l'aide du MEGC pour simuler des impacts potentiels liés au changement climatique : une baisse (-60%) puis une hausse (+60%) de la disponibilité en eau primaire. Les résultats issus du modèle peuvent être présentés de la manière suivante :

Paramètres étudiés	Baisse	Hausse
Chômage involontaire*	0.420	-0.220
Salaire	-0.310	0.163
r1 (rémunération du capital agricole)	1.804	-0.994
r2 (rémunération du capital non agricole)	-0.372	0.197
Rémunération de la terre (prix du facteur de production « terre »)	0.556	-0.318
Prix de la ressource en eau dans l'agriculture intensive en eau	162.698	-39.229
Prix de la ressource en eau dans l'industrie intensive en eau	148.761	-37.336
Prix de la ressource en eau dans l'industrie non intensive en eau	149.851	-37.478
Investissement total	-0.866	0.448
Epargne des ménages	-0.288	0.150
Epargne des entreprises	-0.255	0.132
Epargne publique régionale	-4.041	2.100
Indice du prix du PIB (déflateur du PIB)	-0.108	0.057

Tableau 3 : résultats macroéconomiques partiels suite à la baisse ou à la hausse de la disponibilité en eau primaire. Les résultats sont exprimés en % de variation par rapport à l'année de référence, 2007.

Ces résultats montrent que globalement, face à une diminution de la ressource en eau, l'économie estuarienne connaîtrait un ralentissement illustré notamment par une baisse du PIB, une baisse de l'investissement ou encore des épargnes. Par ailleurs, une diminution de la

ressource se traduirait logiquement par une très forte hausse de son prix quels que soient les secteurs l'utilisant comme facteur de production. Le paysage socio-économique se modifierait : l'agriculture intensive en eau, l'industrie non intensive en eau et les services marchands se développeraient via la mobilisation de davantage de main d'œuvre et de capital, au détriment des autres secteurs dont la production reculerait. Face à une hausse du chômage et à une diminution du revenu des ménages (-0,288%), la demande totale serait en baisse pour presque la totalité des biens et services, malgré la diminution des prix dans certains secteurs.

Une hausse de la disponibilité en eau suivrait globalement le schéma inverse. L'économie estuarienne serait en pleine croissance, générant des salaires plus importants et un taux de chômage moindre, et les bienfaits seraient répartis de manière non homogène entre les secteurs. Les secteurs agricoles intensifs en eau et industriels non intensifs en eau verraient leur production ralentir tandis que l'agriculture non intensive en eau, l'industrie intensive en eau et les services marchands seraient en expansion, en partie du fait de leur accaparement des facteurs de production autres que l'eau (main d'œuvre, capital, terre). Avec l'augmentation du revenu des ménages, la consommation de l'ensemble des biens et des services serait à la hausse de manière générale, à l'exception des biens agricoles intensifs en eau.

L'exercice réalisé met en évidence l'utilité d'un tel outil d'analyse et les potentialités offertes. En appliquant un « choc » comme une variation de la disponibilité de la ressource en eau, il permet d'identifier les secteurs (agricoles, industriels et service) et agents (ménages, entreprises, administration publique) qui pourraient être affectés de manière positive ou négative par ce changement. Bien qu'il représente une économie estuarienne simplifiée, ce modèle montre déjà les imbrications entre les différents secteurs et agents de l'estuaire, et illustre des effets non intuitifs. Afin d'évaluer l'impact sur l'économie estuarienne globale, il serait pertinent de déterminer si les secteurs d'activité les plus atteints sont des secteurs structurants de cette économie. En proposant d'autres scénarii, centrés par exemple sur le facteur « ressource carbone », il est possible de la même manière d'identifier les secteurs les plus vulnérables face à une diminution de cette ressource ou à une décision politique imposant une réduction de sa consommation.

De nombreuses améliorations apportées au modèle, nécessitant des données complémentaires, permettraient de simuler d'autres impacts sur des secteurs plus désagrégés si la finesse des données le permet, et sur un horizon dynamique. En particulier, l'image socio-économique de l'estuaire à laquelle on aboutit est une représentation statique, qui ne permet pas de prendre en compte les réorientations politiques éventuelles (actions environnementales, politique énergétique, progrès technologique...) qui pourtant sont susceptibles de modifier de façon importante les résultats obtenus. De plus, les forçages extérieurs globaux n'interviennent pas, et il serait pertinent d'intégrer notamment les orientations politiques globales comme celle vis-à-vis du carbone, à travers par exemple l'utilisation d'outils de prospective. Par ailleurs, les données recueillies concernent essentiellement la Seine-Maritime, et à défaut de considérer l'ensemble du bassin versant, les recherches pourraient être étendues à l'Eure.

Enfin, le changement climatique a été simulé par simplification comme une modification de la disponibilité de la ressource en eau. La problématique est abordée en termes de volume et ne traduit donc pas la complexité liée à l'élévation du niveau marin (notamment la qualité de l'eau face aux pollutions diffuses ou à l'avancée du front de salinité) ou encore liée à l'évolution de la nappe et des fleuves. Une collaboration avec les experts des sciences « exactes » permettrait de sophistiquer ces hypothèses, en expliquant en amont, les facteurs à l'origine de cette modification de la disponibilité de la ressource (pluviométrie, température etc.) et en complexifiant le schéma hydrographique proposé (intégration du ruissellement par exemple). De même, une collaboration avec les sociologues contribuerait à mieux cerner le comportement des ménages et des autres acteurs (entreprises et administration publique) et à

aboutir à une modélisation plus réaliste de leurs choix (selon la perception du risque), de les décisions d'investissement et de planification. Des enquêtes de terrain auprès des ménages et des entretiens qualitatifs permettraient de collecter ces informations cruciales.

b) Des scénarii de transformation à long terme pour identifier les vulnérabilités principales et les ruptures possibles

Tandis que la matrice économique présentée précédemment s'attache à examiner les conséquences locales que pourrait engendrer le changement climatique, à travers notamment la variation de la ressource en eau, l'approche prospective replace l'estuaire dans un contexte plus global et permet d'intégrer les forçages extérieurs, en particulier les orientations politiques et économiques, dans un contexte général d'évolution du climat.

La plupart des rapports internationaux mettent en exergue l'importance d'agir rapidement. Certains insistent sur le coût macro-économique potentiel des impacts du changement climatique, dans une perspective de sensibilisation et d'implication des acteurs. Les principales approches préconisées suivent la logique de mitigation, c'est-à-dire d'atténuation du changement climatique via la réduction des émissions de gaz à effet de serre, et bénéficient d'outils incitatifs comme la fiscalité énergétique ou les marchés de quotas de GES. Sur un territoire dynamique comme l'estuaire de la Seine, tourné vers l'échange extérieur, où le transport multimodal tient une part essentielle dans l'économie à travers notamment les activités portuaires, logistiques et industrielles (pétrochimie, construction automobile,...), il apparaît indispensable d'intégrer les répercussions des politiques de réduction des émissions de GES lorsqu'on se projette à moyen/long terme.

La démarche d'étude prospective propose de réfléchir à la façon dont l'estuaire peut être représenté de manière à traduire correctement sa complexité interne (ce qui est fait de façon plus précise avec les matrices de comptabilité sociale présentées dans la section précédente), mais aussi vis-à-vis des forçages extérieurs. Cette représentation doit permettre de tenir compte de changements structurels majeurs dans la socio-économie du territoire. L'estuaire est ici considéré comme un système organisé en différents secteurs, eux-mêmes décrits par des variables définies selon des facteurs externes et/ou internes (influence inter et intrasectorielle).

Ainsi, 6 grands secteurs d'activité socio-économiques ont été recensés : l'agriculture, la pêche, le secteur industrie et services, le secteur portuaire, la logistique et l'organisation des transports et le tourisme (cf. figure 1). Pour parfaire cette représentation, il convient de considérer d'autres domaines qui ne sont pas à proprement parler des secteurs, mais qui constituent des facteurs structurants de l'estuaire. Il s'agit du mode d'urbanisme, du patrimoine naturel qui permet d'intégrer les « aspects écosystèmes » (état de la biodiversité, qualité des milieux, services écosystémiques,...) et du fonctionnement physique, élément clé de la structuration géographique du territoire (dépendance des secteurs pour leur implantation physique et vis-à-vis de leur utilisation de l'eau). L'ensemble de ces compartiments interagissent entre eux en particulier à l'échelle de l'estuaire (facteurs internes), et dépendent par ailleurs de facteurs externes, définis ici selon trois échelles spatiales : l'échelle mondiale, l'échelle européenne (échelle clé en matière de législation liée à l'environnement), et une échelle plus fine, regroupant l'échelle nationale et celle du bassin versant. En matière d'effets du changement climatique, ces facteurs peuvent être des impacts physiques de l'évolution climatique, des mesures d'atténuation ou des mesures d'adaptation. Selon l'objectif visé, ces facteurs peuvent également être classés en fonction de leur secteur (influence intra-sectorielle ou non) et de leur lien avec le changement climatique.

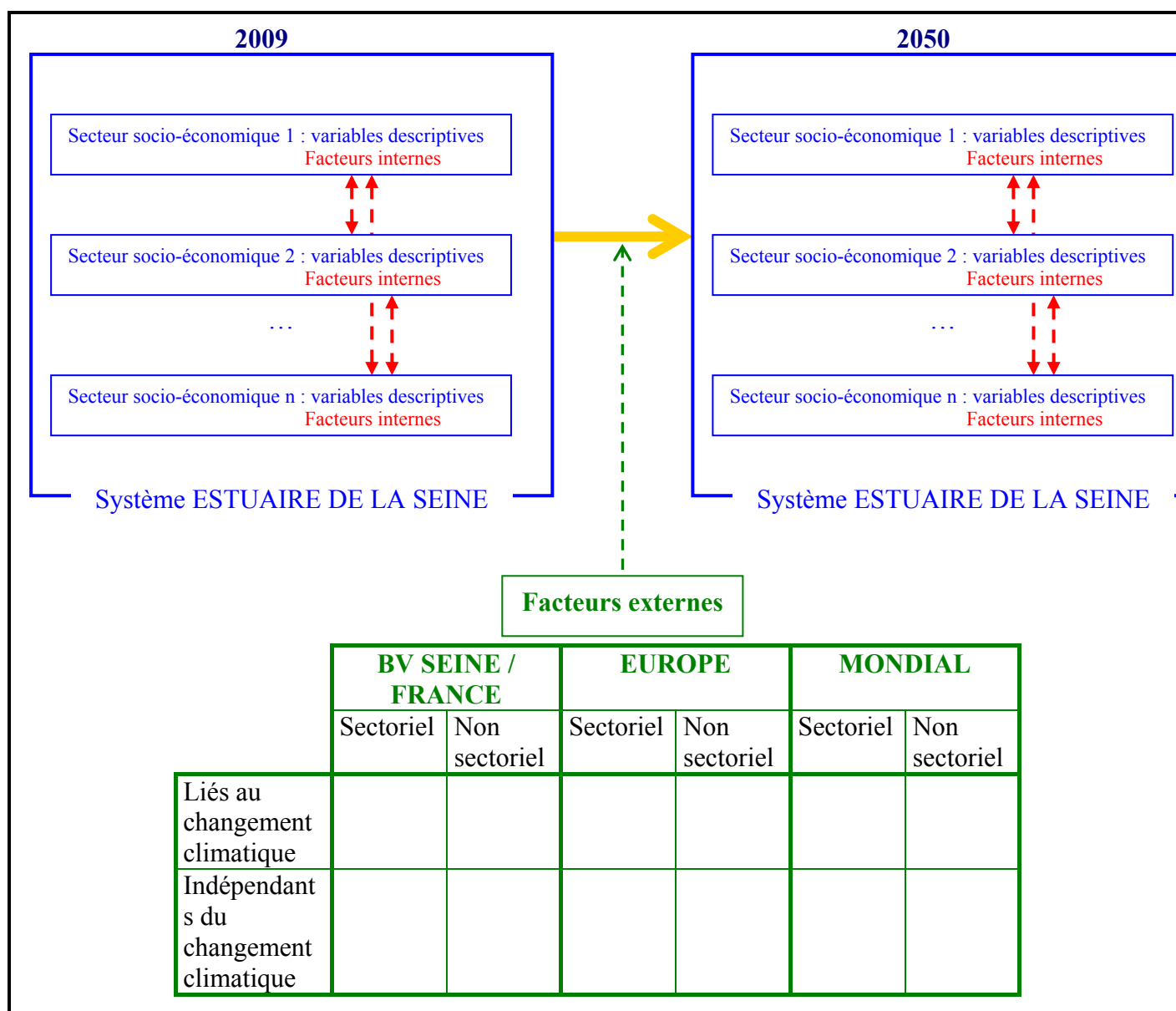


Figure 12 : Représentation du système estuarien suivant une approche systémique et proposition d'une classification des facteurs externes agissant sur l'évolution socio-économique du système

Dans un premier temps, l'ensemble des interactions décrites par la figure 12 ont été analysées, de manière à mettre en avant les facteurs d'influence les plus importants sur la structure socio-économique de l'estuaire de la Seine. Les postulats nécessaires à cette analyse et les résultats quantitatifs ne sont pas détaillés ici mais figurent dans le rapport de synthèse correspondant fourni en annexe.

L'étude de la dépendance et de l'influence des secteurs entre eux met en évidence que le patrimoine naturel constitue un maillon central du système. D'une part, ce domaine dépend fortement des autres secteurs d'activités, et d'autre part il influence lui-même la « santé socio-économique » de l'estuaire, au même niveau que les paramètres physiques structurants de l'estuaire. Concernant les facteurs externes, il semblerait que les secteurs portuaires, « industries et services » et « transports et logistiques », c'est-à-dire les secteurs dominants de l'économie estuarienne, dépendent fortement des forçages socio-économiques extérieurs, en particulier au niveau mondial. A l'inverse, le patrimoine naturel de l'estuaire de la Seine et

son milieu physique semblent peu influencés par la socio-économie des niveaux d'échelle supérieurs.

A partir de ces premiers constats, il devient plus aisé de proposer des évolutions possibles du système à l'horizon 2050, en se basant sur différentes tendances possibles d'évolution du contexte socio-économique global. En particulier, étant donné le rôle majeur du monde extérieur sur la structure socio-économique de l'estuaire à travers la dépendance de secteurs d'activité structurants, les orientations politiques globales en matière de lutte contre le changement climatique et les politiques environnementales liées par exemple au secteur pétrolier, apparaissent comme des facteurs déterminants dans l'évolution de l'estuaire. Le choix s'est donc porté sur des scénarii basés en partie sur ces caractéristiques et suffisamment contrastés pour proposer plusieurs images bien distinctes du territoire, en matière de changement structurel de la socio-économie de l'estuaire de la Seine :

- schéma 1 : politique de libéralisation des échanges mondiaux, politique publique environnementale limitée et engagement contre le changement climatique faible à l'échelle mondiale. Cette situation correspond à une **évolution tendancielle proche de la situation socio-économique actuelle**, sans réelle modification des orientations politiques vis-à-vis de l'environnement.
- schéma 2 : politique de libéralisation des échanges mondiaux, politique publique environnementale modérée et engagement contre le changement climatique fort à l'échelle mondiale. Ici, la **lutte contre le changement climatique est mise en avant** à travers le développement de nouvelles technologies moins dépendantes du carbone.
- schéma 3 : politique de régionalisation de la structure des échanges commerciaux mondiaux, politique publique environnementale forte et engagement contre le changement climatique modéré à l'échelle mondiale. Ce dernier scénario repose sur un **engagement mondial modéré vis-à-vis du changement climatique et des politiques environnementales fortes**.

A quelles images de l'estuaire pourraient conduire ces différents schémas d'évolution d'ici 2050 ?

Le patron d'évolution 1 implique une économie toujours basée sur la consommation d'énergie fossile, ce qui maintient une dépendance énergétique de la plupart des pays vis-à-vis des pays producteurs de pétrole. L'Europe et la France sont dans un premier temps pénalisées par leurs politiques de lutte contre le changement climatique, puis réajustent leur économie vis-à-vis du contexte global afin d'assurer un retour à la croissance. A l'échelle de l'estuaire, cela se traduit par un regain des activités portuaires et logistiques pour assurer la continuité des échanges mondiaux, et par un retour aux industries traditionnelles permettant de maintenir de l'emploi. Une compétition foncière croissante s'installe au détriment de la qualité de vie et de l'habitat et l'espace dédié aux zones naturelles ou à l'agriculture diminue nettement. Par ailleurs, l'urbanisation croissante et l'intensité industrielle affectent la qualité de la ressource en eau et des sols. Enfin, de par le manque voire l'absence de mesures d'atténuation du réchauffement global, les répercussions sur l'estuaire sont importantes notamment sur son hydromorphologie (montée du niveau marin, augmentation de l'intensité et de la fréquence des tempêtes,...), ce qui participe à l'accroissement de la vulnérabilité globale du territoire.

A travers le schéma d'évolution n°2, on suppose que les engagements pris en matière de lutte contre le réchauffement ont été tenus et que l'indépendance énergétique est quasiment atteinte grâce au développement et à la diffusion des technologies énergétiques non fossiles. L'estuaire de la Seine ne fait pas exception et réussit une reconversion industrielle tournée vers les technologies alternatives propres en s'appuyant en particulier sur le réseau de transport (développement du ferré et intensification des activités portuaires) et sur une

urbanisation durable (éco-constructions, développement des transports en commun, cadre de vie plus « vert »,...). Par ailleurs, on assiste à un fort développement du secteur tertiaire sur le territoire. Au niveau environnemental, la tendance générale à la croissance se traduit néanmoins par une anthropisation accrue de l'estuaire et ne permet pas d'améliorer ses fonctions biologiques et environnementales. En revanche, les efforts mondiaux d'atténuation se répercutent localement de manière positive : les conséquences de la modification du climat sont limitées et la vulnérabilité du territoire n'augmente pas.

Enfin dans le troisième schéma, la tendance à la régionalisation et la demande sociétale forte de préservation de l'environnement (biodiversité et paysages en particulier) poussent l'Europe à favoriser son indépendance énergétique à travers l'utilisation de l'énergie nucléaire et des énergies renouvelables. A l'échelle européenne comme mondiale, la lutte contre le réchauffement climatique n'étant pas une priorité, les engagements pris en termes de réduction des émissions de GES ne sont pas respectés ce qui aggrave les impacts physiques déjà observés. L'estuaire de la Seine est de plus en plus vulnérable face à l'augmentation du risque d'inondation (hausse du niveau marin, augmentation des tempêtes et surcotes) et à la perte de disponibilité de la ressource en eau. Tandis que les mesures locales pour préserver l'environnement se multiplient (développement du ferroutage, industries plus « propres », classement des boucles de la Seine,...), les impacts du changement climatique se répercutent sur la biodiversité et sur la qualité des milieux : l'estuaire se salinise au détriment de la qualité des sols et de l'agriculture, et certaines espèces disparaissent du paysage estuarien faute d'habitat favorable. Néanmoins, les eaux retrouvent un bon état physico-chimique et écologique et l'essentiel des fonctionnalités environnementales est restauré. Le paysage socio-économique estuarien subit quelques mutations : les friches industrielles font place à des zones humides, les centrales nucléaires remplacent les raffineries et les industries pétrochimiques, et le Port de Rouen se concentre uniquement sur le transport fluvial tandis que le Port du Havre assure les échanges intra-européens.

Comment utiliser ce premier balayage des futurs possibles de l'estuaire sous contrainte des forçages socio-économiques ?

Tout d'abord, bien que certains aspects méritent d'être approfondis, cet exercice met en exergue la vulnérabilité du territoire face à des changements structurels profonds, liés davantage à la politique de lutte contre le changement climatique qu'à une véritable prise en compte de ses impacts potentiels sur le territoire de l'estuaire. De plus, ce type d'approche peut être utilisé comme un outil de sensibilisation et d'implication des responsables locaux. La mise en discussion de ces scénarii, voire même leur mise en critique avec les acteurs locaux, pourrait constituer une première étape du processus de dialogue chercheurs/acteurs au service d'une gestion adaptative (« adaptive co-management ») évoquée plus haut. S'interroger sur les évolutions propres des secteurs et comprendre les interactions qui régissent l'évolution du territoire à long terme, vis-à-vis de facteurs internes ou externes à l'estuaire, devrait permettre de mieux évaluer la vulnérabilité future de ces domaines face au changement climatique et leur capacité future d'adaptation.

Si cela reflète dans une certaine mesure le fort taux de dépendance de la région au monde extérieur et la faible influence des acteurs locaux sur la socio-économie de l'estuaire, cette vision des choses est certainement biaisée par une méconnaissance des leviers d'actions qui existent au niveau local. En effet, les entretiens réalisés n'ont pas permis d'aboutir à une image exhaustive du territoire et de s'assurer de la représentativité de l'échantillon et de l'objectivité des informations recueillies. De ce fait, il serait intéressant de proposer un autre schéma d'évolution, basé cette fois-ci sur des initiatives locales (économie post-carbone, adaptation au changement climatique...).

Par ailleurs, les modèles d'évolution hydro-climatologique de l'estuaire et les connaissances relatives à l'évolution supposée de la biodiversité et des habitats pourraient venir affiner les scénarii déjà proposés. Un tableau à double entrée, décrivant qualitativement et de manière non spatialisée, l'influence des transformations des secteurs socio-économiques sur les milieux naturels (habitats et peuplements, hydrologie...) sous forçage socio-économique, et l'influence de l'évolution de ces mêmes milieux sur les secteurs socio-économiques sous forçage climatique, pourrait permettre de préciser les impacts croisés des forçages climatiques et socio-économiques sur l'estuaire. Appliquée de manière progressive et systématique, cette démarche devrait aider les acteurs à préciser leurs connaissances des impacts réels du changement climatique sur l'avenir de leurs activités, et les amener ainsi à clarifier davantage les questions qu'ils souhaitent voir traiter ou approfondir par les experts scientifiques, de manière notamment à aboutir à une meilleure anticipation des changements à venir.

Enfin, les scénarii déjà construits ou de nouveaux plus pertinents, pourraient être approfondis, tant dans leur dimension spatiale qu'en matière de quantification.

Sur le plan spatial, la discipline de la géographie pourrait améliorer à deux niveaux les schémas d'évolution possible du territoire de l'estuaire, esquissés dans cette première analyse :

- en représentant les dynamiques spatiales et territoriales propres à l'estuaire décrivant son fonctionnement socio-économique, et en construisant ainsi des scénarii tenant davantage compte des initiatives impulsées au niveau local
- en proposant des représentations spatialisées des scénarii de manière à davantage localiser les activités humaines futures sur le territoire estuarien, sans nécessairement viser une géolocalisation précise par SIG inévitablement entachée de fortes incertitudes. Cette approche devrait à la fois participer à une meilleure représentation des acteurs des évolutions possibles de l'image socio-économique de l'estuaire, mais aussi permettre d'aborder de façon différente la question de la vulnérabilité face au changement climatique, notamment en intégrant dans la réflexion l'influence d'éléments géographiques (ex : proximité de la mer, proximité de l'estuaire...)

En parallèle, il serait aussi envisageable de développer une approche quantitative des transformations socio-économiques structurelles à long terme, en complément de l'approche présentée dans la section précédente qui joue essentiellement sur des chocs appliqués à la structure actuelle de l'économie du territoire. La Matrice de Comptabilité Sociale constituerait la base de données actuelle, et il serait utile de chercher à représenter les scénarios de forçage socio-économique dans le cadre de cohérence intersectorielle que fournit cette matrice.

Dans cette perspective, il serait intéressant de faire évoluer progressivement la structure économique du territoire représentée quantitativement par cette matrice, sous l'influence d'une part, de l'évolution du climat, et d'autre part des modifications de structures liées aux forçages socio-économiques (politiques publiques, innovations techniques, facteurs externes, etc.). Afin de répondre à ces objectifs, une telle modélisation économique devrait s'articuler au mieux avec les modèles hydrologiques et écologiques développés par ailleurs, pour représenter les évolutions structurelles dues à chaque type de forçage.

D'autres types de modélisation de type technico-économique pourraient également être mobilisés pour réussir à représenter les trajectoires de modification structurelle de la socio-économie de l'estuaire sous cette double influence.

IV. Conclusion

A l'heure actuelle, les scientifiques comprennent de mieux en mieux les mécanismes intervenant dans les changements globaux depuis plusieurs décennies, bien que des zones d'ombre persistent encore, notamment autour de la vitesse d'élévation du niveau marin et de la fréquence et des conditions d'apparition des événements extrêmes. Si les phénomènes sont généralement bien connus à une échelle globale, leur déclinaison à une échelle plus locale pose des difficultés. L'exercice s'avère encore plus délicat en ce qui concerne les estuaires, car il s'agit de zones dont le fonctionnement naturel est complexe, et sur lesquelles les pressions anthropiques sont multiples, ce qui rend d'autant plus difficile la déconvolution des facteurs influençant leur évolution.

De manière générale, le changement climatique peut être abordé suivant deux angles différents : l'analyse des données historiques qui permet de confirmer la réalité d'un phénomène et de comprendre les mécanismes mis en jeu ; la construction de modèles décrivant le fonctionnement d'un système et permettant de décrire les tendances d'évolution probables des paramètres considérés. Ainsi, les travaux de modélisation réalisés dans le cadre du projet RExHySS ont abouti à proposer des **hypothèses d'évolution des paramètres hydroclimatiques** sur l'estuaire de la Seine à l'horizon 2100 :

- augmentation de la température atmosphérique de 2 à 4°C
- diminution des précipitations moyennes annuelles de -12%
- diminution du débit moyen annuel de la Seine de -26% en moyenne (-16 à -36% en fonction des caractéristiques naturelles locales et des activités anthropiques)
- diminution générale de la ressource en eau, à hauteur de -2700 Mm³/an concernant les aquifères

Concernant l'impact du réchauffement climatique sur le niveau des océans, bien qu'une tendance ait été dégagée à l'échelle du globe, l'estimation quantitative de la hausse probable du niveau marin à une échelle régionale diffère en fonction des auteurs. Néanmoins, un intervalle peut-être défini sur l'estuaire de la Seine au regard des différentes estimations :

- valeur minimale à partir des tendances observées grâce aux mesures : +18 à +27 cm
- valeur haute déterminée par le GIEC : +60 cm
- valeur haute du GIEC + effet des surcotes marines : +1 m

A partir de ces récentes projections, les prédictions de l'évolution de certains paramètres vont pouvoir être affinées. En particulier, ces nouvelles estimations vont permettre de mieux décrire **l'évolution hydro-sédimentaire** de l'estuaire et de mieux appréhender les conséquences potentielles en termes de **risque d'inondation** et d'évolution de la **qualité de l'eau** (dynamique du bouchon vaseux, progression du front de salinité,...). Par ailleurs, il est important de considérer la Seine dans l'ensemble de son bassin hydrographique afin de mieux cerner les interactions entre le niveau marin, les débits de la Seine et de ses affluents et l'aquifère de la craie, et de prévoir l'évolution générale du fonctionnement hydrographique de l'estuaire.

L'amélioration de ces modèles pourra apporter des éléments de réponse aux questions formulées par les acteurs décisionnaires de l'estuaire, et ainsi orienter certaines de leurs décisions en matière de gestion, d'aménagement, d'orientation politique à moyen terme. En effet, malgré une volonté commune d'agir dans une logique de développement durable et de prendre en considération le changement climatique et ses conséquences dans leurs plans d'action, la majorité des structures porteuses d'enjeux se trouve démunie de par une **mauvaise connaissance du phénomène**.

De ce fait, l'instauration d'un **dialogue permanent** entre la communauté scientifique d'une

part et l'ensemble des parties prenantes de l'estuaire de la Seine d'autre part, par le biais de dispositifs de médiation, permettrait de réduire l'écart entre la façon dont les « profanes » perçoivent le changement climatique et la réalité du phénomène telle qu'elle est expliquée au travers des programmes de recherche. Au-delà d'un partage des connaissances, une réflexion pourrait également s'engager autour de la question de l'adaptation afin de fournir une aide à la décision et d'anticiper les changements à venir dans une réelle perspective de gestion durable, en s'appuyant notamment sur des problèmes et des menaces déjà identifiés susceptibles de s'aggraver sous les forçages climatiques actuels et futurs.

Par ailleurs, la **modélisation** doit être fortement encouragée car elle représente un outil particulièrement intéressant pour schématiser le fonctionnement d'un système dans sa globalité comme le montrent les différents travaux recensés, et elle constitue de plus un outil pédagogique permettant de sensibiliser la population en rendant plus concrètes les modifications auxquelles la société devra faire face.

De manière à considérer l'ensemble des compartiments socio-économiques de l'estuaire de la Seine, comme définis par la prospective et donc intégrant le milieu naturel et les paramètres physiques structurants de l'estuaire, il est indispensable de suivre une **logique intégrée** et d'accentuer les **travaux pluridisciplinaires**. Ainsi, le renforcement des suivis des peuplements de l'estuaire devra par exemple s'organiser suivant une stratégie d'observation commune à long terme, avec des objectifs bien définis et des méthodologies homogènes ou à défaut compatibles et comparables. Les chercheurs des « sciences exactes » et les chercheurs en sciences humaines et sociales devront également travailler en étroite collaboration, car comme le suggère l'expertise à l'échelle de l'estuaire de la Seine, le milieu naturel et les secteurs d'activités socio-économiques interagissent fortement (cf. figure 13).

Tandis que la plupart des transformations du territoire résultant du changement climatique sont considérées comme une menace potentielle, il est envisageable pour certaines de réfléchir à la façon de « tirer partie » de ces modifications. En particulier, l'importance de considérer dès maintenant les effets du changement climatique et de les intégrer dans une démarche de restauration a été soulignée à plusieurs reprises. En considérant d'ores et déjà la réponse des milieux, des mesures adaptées au changement pourraient ainsi émerger et s'inscrire dans les actions de gestion des zones humides, de gestion hydraulique des affluents, d'amélioration de la mobilité latérale du fleuve, d'amélioration de la fonction de frayère de certaines zones,...

A l'image des outils économiques et prospectifs développés dans l'expertise, mais à un degré de précision différent, il existe une démarche co-pilotée par l'ONERC (Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique) qui propose d'évaluer la vulnérabilité globale du territoire français en estimant les coûts et dommages imputables au changement climatique dans sept secteurs différents : la santé, l'énergie, l'urbanisme/cadre bâti/infrastructures de transport, le tourisme, les risques naturels et assurances, l'agriculture/forêt/ressource en eau, et enfin les territoires et la biodiversité²¹. Un certain nombre d'indicateurs variés ont été définis pour mettre en évidence l'impact du changement climatique sur l'atmosphère, les océans, les activités humaines et la biodiversité. En abordant la problématique suivant une logique économique, le gouvernement espère faire prendre conscience aux décideurs que malgré leur implication à des degrés différents dans la politique de mitigation (i.e. dont l'objectif est de réduire l'émission de gaz à effet de serre), une gestion durable passe également par des mesures d'anticipation face à certaines conséquences inévitables.

Au delà des politiques environnementales nationales, la question de l'intégration du changement climatique et de ses conséquences se pose également au niveau européen. Tandis que des efforts de réduction de l'émission des gaz à effet de serre ont clairement été inscrits

²¹ cf. synthèse ONERC/décideurs

sur le plan national, le changement climatique n'apparaît pas dans d'autres orientations ou plans d'action. Ainsi, la France s'est engagée vis-à-vis de l'Europe à protéger des milieux et des espèces dans un contexte plus général de préservation de l'environnement, comme c'est le cas pour de nombreuses espèces d'oiseaux, mais le changement climatique et ses conséquences probables ne sont pour l'instant pas intégrés. Pourtant, au regard des modifications déjà observées et attendues du milieu, la gestion d'un territoire ne pourra se faire sans prendre en compte ces facteurs d'évolution.

A travers l'état des lieux des connaissances des effets du changement climatique réalisé dans cette expertise, l'hétérogénéité des travaux existants a clairement été mise en évidence, à la fois au sein d'une même discipline entre différentes régions du globe, et à la fois entre des domaines d'étude différents. Bien que les comparaisons entre estuaires soient fortement encouragées, le manque de cohérence (méthodologique ou autre) des données d'un estuaire à l'autre et le fonctionnement propre de chaque système ne rend pas forcément ces comparaisons possibles ou pertinentes. Néanmoins, il devrait être envisageable de comparer les vitesses d'évolution de systèmes au fonctionnement sensiblement similaires.

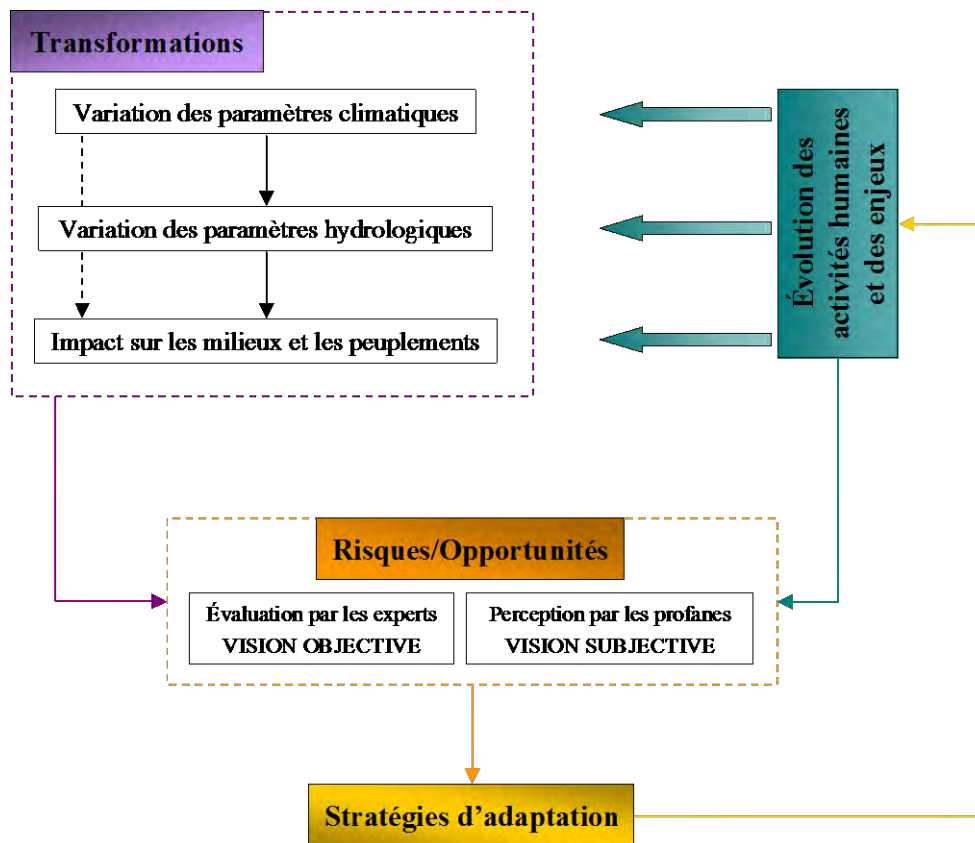


Figure 13 : vision synthétique de la démarche intégrative proposée

Références

Les références bibliographiques utilisées sont celles des synthèses disciplinaires et sont listées dans ces dernières.

La synthèse a été rédigée par Claire Bertolone, recruté en CDD comme IE dans le cadre du projet d'expertise collective.

Liste des experts ayant participé à la synthèse :

Benoit LAIGNEL (PR, Coordinateur, Hydroclimat, Qualité de l'eau), UMR CNRS 6143 « Morphodynamique Continentale et Côtière », Université de Rouen, benoit.laignel@univ-rouen.fr

Nicolas MASSEI (MCF, Hydroclimat, Qualité de l'eau), UMR CNRS 6143 « Morphodynamique Continentale et Côtière », Université de Rouen, nicolas.massei@univ-rouen.fr

Josselin BODILIS (MCF, Microbiologie), UMR CNRS 6143 « Morphodynamique Continentale et Côtière », Université de Rouen, josselin.bodiliss@univ-rouen.fr

Agnès DUCHARNE (CR, Hydroclimat, Qualité de l'eau), UMR Sisyphe 7619 CNRS, Université Pierre et Marie Curie, agnes.ducharne@ccr.jussieu.fr

Anniet LAVERMAN (CR, Qualité de l'eau), UMR Sisyphe 7619 CNRS, Université Pierre et Marie Curie, Anniet.Laverman@ccr.jussieu.fr

Henri ETCHEBER, (CR, Qualité de l'eau), UMR EPOC 5805 CNRS, Université de Bordeaux 1, h.etcheber@epoc.u-bordeaux1.fr

Eric ROCHARD (DR, Hydrobiologie), CEMAGREF, Ecosystème estuarien et poisson migrateur, eric.rochard@cemagref.fr

Jean-Paul DUCROTOY (Reader Emeritus, Hydrobiologie), Université de Hull, Angleterre, j-p.duc@wanadoo.fr

Sami SOUISSI (PR, Coordinateur Hydrobiologie), Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, UMR CNRS 8187 LOG, Université de Lille 1, Sami.Souissi@univ-lille1.fr

Franck MOREL (Avifaune), Groupe Ornithologique Normand, franck.morel2@club-internet.fr

Thierry CORNIER (Chef de service, Flore), Conservatoire Botanique de Bailleul, t.cornier@cbnbl.org

Anne BRIAND (MCF, Economie), CARE, Université de Rouen, anne.briand@univ-rouen.fr

Valérie DELDREVE (MCF, Sociologie), CLERSE/IFRESI/USTL (Université de Lille 1) Valerie.Deldreve@univ-lille1.fr

Remplacée par Hervé FLANQUART et Sophie ALAIN

Hervé FLANQUART, (MCF, Sociologie) Université du Littoral-Côte d'Opale,
hflanquart@yahoo.fr

Sophie ALLAIN (Chercheur) INRA, allain.sophie@gmail.com

Sébastien TREYER (IGREF, Prospective), ENGREF Groupe Recherche en gestion sur les
territoires et Environnement, treyer@engref.fr

Correspondant GIP Seine-aval

Nicolas BACQ, [nbacq\(a\)seine-aval.fr](mailto:nbacq(a)seine-aval.fr)

Crédit photo couverture : GIP Seine-Aval, C. Dégremont
Pour tout renseignement, veuillez contacter la coordination scientifique : cdegremont@seine-aval.fr

Le GIP Seine-Aval ne saurait être tenu responsable d'évènements pouvant résulter de l'utilisation et de l'interprétation des informations mises à disposition.

Le GIP Seine-Aval est financé par :

