

La montée du niveau de la mer d'ici 2100

Scénarios et conséquences

D. Lacroix, O. Mora, N. de Menthère, A. Béthinger



La montée du niveau de la mer d'ici 2100

Scénarios et conséquences

*Denis Lacroix, Olivier Mora, Nicolas de Menhière,
Audrey Béthinger*

Éditions Quæ

Collection Matière à débattre et décider

Filière forêt-bois et atténuation du changement climatique.
Entre séquestration du carbone en forêt et développement de la bioéconomie

A. Roux, A. Colin, J.-F. Dhôte, B. Schmitt, coord.

2020, 170 p.

Quelle politique agricole commune demain ?

C. Détang-Dessendre, H. Guyomard, coord.

2020, 306 p.

Quelles agricultures irriguées demain ?

S. Bouarfa, F. Brelle, C. Coulon, coord.

2020, 212 p.

Les sols urbains sont-ils cultivables ?

C. Mougin, F. Douay, M. Canavese, T. Lebeau, E. Rémy, coord.

2020, 228 p.

Stocker du carbone dans les sols français. Quel potentiel et à quel coût ?

S. Pellerin, L. Bamière, I. Savini, O. Réchaudière, coord.

2021, 232 p.

En couverture : vue aérienne de la plage de Lacanau
© 2016 Observatoire de la Côte aquitaine/Com'by AVM

© Éditions Quæ, 2021

ISBN papier : 978-2-7592-3307-6

ISBN PDF : 978-2-7592-3308-3

ISBN ePub : 978-2-7592-3309-0

Éditions Quæ

RD 10

78026 Versailles Cedex, France

www.quae.com

www.quae-open.com

Le Code de la propriété intellectuelle interdit la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Le non-respect de cette disposition met en danger l'édition, notamment scientifique, et est sanctionné pénalement. Toute reproduction, même partielle, du présent ouvrage est interdite sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20 rue des Grands-Augustins, Paris 6^e.

Table des matières

Préface	5
La prospective pour éclairer l'orientation des recherches environnementales	5
La montée du niveau de la mer : effet du dérèglement climatique, défi sociétal majeur et objet scientifique interdisciplinaire	6
Introduction	9
La montée du niveau de la mer	11
Le développement des régions côtières	11
La problématique	12
Les enjeux d'une approche prospective	14
La méthode	15
Partie I - Les scénarios d'évolution	17
1. Les contextes physiques d'élévation du niveau de la mer	18
2. Les trois familles de scénarios	22
Le processus d'élaboration	22
3. Schéma de positionnement des scénarios	35
Famille du « Dénî »	36
Famille « Fragmentation persistante »	37
Famille « Adaptation littorale »	38
Partie II - Focus territoriaux	41
4. La région Nouvelle-Aquitaine	45
Le littoral en Nouvelle-Aquitaine : diversifié, dynamique et attractif	45
Trois scénarios plausibles	49
5. Les Pays-Bas	53
Un pays de terres basses et d'eau	53
Les scénarios possibles : quelles trajectoires d'adaptation pour le « <i>Dutch Delta</i> » à 2100 ?	59
6. Le Vietnam	61
L'importance des deltas au Vietnam	61
Synthèse d'études récentes	63
Conclusion	66

Partie III - Conséquences potentielles des scénarios	69
7. Pour l'environnement et les ressources naturelles	76
Les écosystèmes littoraux	77
8. Pour l'agriculture et l'usage des terres dans les zones littorales	81
Les tendances actuelles dans les zones littorales	81
L'évolution de la disponibilité des terres agricoles littorales	82
Conséquences potentielles sur la place de la pêche et de l'aquaculture	84
Conséquences potentielles sur la sécurité alimentaire	85
9. Pour les populations et les villes littorales	88
Une littoralisation des populations à l'échelle mondiale	88
Conséquences potentielles sur les zones urbaines littorales	91
Les stratégies d'adaptation et de protection des zones urbaines littorales	94
10. Pour la vie économique	96
Un enjeu complexe et multiforme	96
La difficile répartition des responsabilités	98
Conclusion	101
11. Pour la géopolitique	102
La géopolitique est très tôt liée à la mer	102
Vulnérabilité des populations et migrations	105
Enseignements à l'échelle de la France comme du monde	108
Conclusion	109
Des tendances lourdes et des scénarios inquiétants	109
Des marges de manœuvre	110
S'adapter, action nécessaire mais pas suffisante	111
Des raisons d'espérer	113
Remerciements	115
Annexe :	
Méthodologie	116
Équipe projet et organisation des travaux	116
Les étapes de la construction du système	118
Structuration des visions d'avenir et schéma de positionnement des scénarios sur un plan	119
Les composantes du système	119
Le tableau morphologique	121
Construction des scénarios	121
Glossaire	122
Bibliographie	123

Préface

La prospective pour éclairer l'orientation des recherches environnementales

CRÉÉE EN 2010, AllEnvi, l'alliance nationale de recherche pour l'environnement, rassemble les différents organismes et établissements français qui mènent des recherches environnementales. L'une de ses missions est d'orienter la programmation de la recherche sur les grands défis sociétaux relatifs à l'alimentation, à la biodiversité, au climat, à l'eau, à l'océan ou encore aux territoires ruraux ou urbains, et qui sont au cœur de la transition écologique.

La caractérisation de ces défis et des questions scientifiques qui leur sont liées repose naturellement sur une analyse de l'état de l'environnement et de ses multiples interactions avec la société : les pressions exercées par les activités humaines et leurs impacts, les services rendus par les écosystèmes, les perceptions et comportements individuels et collectifs... Cette analyse se décline à différentes échelles, du local au global ; elle considère la situation actuelle de l'environnement aussi bien que sa dynamique, son histoire et sa trajectoire future. La programmation de la recherche intègre ainsi, plus ou moins implicitement, une vision du futur qui lie les verrous méthodologiques ou technologiques à lever et les connaissances attendues aux risques à éviter, aux impacts à limiter ou aux bénéfices prévus...

Cette vision du futur s'appuie le plus souvent sur le prolongement de tendances déjà observées dans des registres différents : celui de la science, de ses concepts, méthodes ou infrastructures, comme celui des évolutions qui affectent la société et les systèmes naturels. Par exemple, la transition numérique, le dérèglement climatique, la croissance démographique, la fragmentation des paysages, l'intensification des activités humaines extractives... À l'horizon de quelques décennies, ces tendances sont cependant susceptibles de s'infléchir, de bifurquer ou de s'inverser : tout l'enjeu des transitions appelées par les objectifs du développement durable est d'ailleurs de modifier profondément certaines de ces tendances. En outre, les systèmes considérés sont si complexes qu'il serait vain de prétendre que ceux-ci vont se prolonger tels quels.

Il est donc aussi utile de développer d'autres méthodes pour explorer le futur et anticiper les conséquences de scénarios alternatifs, en vue d'identifier ou de prioriser les questions de recherche afin d'éviter des catastrophes ou de dessiner un avenir souhaitable — avenir qu'il n'appartient pas aux chercheurs de choisir, mais d'éclairer. Cette démarche est, par exemple, celle du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), dont les différents scénarios dessinent des futurs climatiques contrastés, sur la base desquels des choix politiques sont réalisés.

Avant même la création d'AllEnvi, plusieurs de ses membres s'étaient ainsi déjà dotés d'une capacité prospective dans leur domaine spécifique de compétences. C'est ainsi que le Cirad et l'Inra ont exploré le devenir des systèmes agricoles et alimentaires à l'horizon 2050 (AgriMonde, 2009, puis AgriMonde Terra, 2016)¹. Autre exemple : en 2008, l'Ifremer s'est intéressé au futur des énergies marines renouvelables à l'horizon 2030². D'autres exercices portent plutôt sur « le mouvement interne » de la science et des technologies : cette démarche est solidement ancrée au CNRS, dans les différentes disciplines, ou encore au Cnes pour ce qui concerne l'espace.

Au sein d'AllEnvi, il est apparu utile de partager ces pratiques de la prospective et de créer un groupe de travail transversal dédié. Le premier projet de ce groupe, ScénEnvi³, a porté sur l'analyse synthétique des grandes perspectives internationales sur l'environnement, aux échelles du monde ou des grands continents et aux horizons 2030, 2050 ou 2100 : l'examen des 99 études repérées et jugées pertinentes a permis d'identifier plus de 300 scénarios qui ont été regroupés en 11 grandes familles. Sans surprise, le dérèglement climatique est souvent présent dans ces scénarios, soit comme une conséquence de priorités d'une autre nature, par exemple économique, soit comme l'un des moteurs mêmes de l'évolution du monde. En revanche, l'océan — tout comme la forêt, d'ailleurs — s'avère être l'un des grands absents des scénarios ainsi repérés.

La montée du niveau de la mer : effet du dérèglement climatique, défi sociétal majeur et objet scientifique interdisciplinaire

SANS QU'IL N'Y AIT DE RELATION causale explicite avec le constat précédent, le conseil des membres d'AllEnvi a décidé en 2017 que le deuxième projet collectif du groupe transversal « Prospective » porterait sur la montée du niveau de la mer : le présent ouvrage est le fruit de ce travail collectif.

Comme l'ont montré le rapport spécial du GIEC sur l'océan et la cryosphère⁴, le deuxième rapport des Nations Unies sur l'état mondial de l'océan⁵, ou encore le récent rapport du Conseil économique, social et environnemental sur la pêche durable en mer face au

1. <https://www6.paris.inrae.fr/depe/Presentation/La-prospective>

2. https://www.ifremer.fr/cop/content/download/15287/file/Ifremer_synthese-etude-prospective-EnRM.pdf

3. De Menthère N., Lacroix D., Schmitt B., Béthinger A. (coordinateurs). 2016. Visions du futur et environnement. Les grandes familles de scénarios analyse de prospectives internationales relatives à l'environnement. <https://www.allenvi.fr/allenvi/actualites/actualites-2013-2018/2017/scenenvi-futurs-pour-la-planete>

4. IPCC. 2019. The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. A Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/12/SROCC_FullReport_FINAL.pdf

5. United Nations. 2021. The Second World Ocean Assessment. 2 volumes : Vol. 1 : <https://www.un.org/regularprocess/sites/www.un.org.regularprocess/files/2011859-e-woa-ii-vol-i.pdf> Vol. 2 : <https://www.un.org/regularprocess/sites/www.un.org.regularprocess/files/2011859-e-woa-ii-vol-ii.pdf>

changement climatique⁶, les interactions entre l’océan et le climat sont nombreuses. La montée du niveau de la mer n’est donc qu’un aspect des effets du dérèglement climatique sur l’océan et sur les activités humaines qui lui sont plus ou moins directement liées. Ce phénomène et ses conséquences sont cependant particulièrement intéressants à étudier dans une démarche prospective :

- D’abord parce que l’élévation moyenne du niveau de la mer est inexorable à l’échelle de ce siècle et que les projections issues de multiples travaux scientifiques internationaux la réévaluent régulièrement et montrent qu’elle a même tendance à s’accélérer : on sait maintenant qu’il est ainsi possible qu’elle dépasse un mètre avant 2100, et ce même si la hausse de la température moyenne parvenait à être limitée à 1,5 ou 2 degrés par des politiques vigoureuses de réduction des émissions de gaz à effet de serre ;
- ensuite, parce que les zones littorales directement affectées par cette élévation du niveau de la mer sont de plus en plus peuplées, si bien que ses effets physiques et écologiques directs (recul du trait de côte, salinisation des nappes phréatiques, submersions temporaires ou permanentes de terres basses, pollutions liées à ces submersions...) auront des conséquences considérables pour les populations et les sociétés concernées (dommages aux infrastructures et aux villes côtières, accroissement des risques et des coûts de protection, d’assurance et de réparation, déplacements de populations...) : les projections, selon diverses hypothèses, des scénarios et de leurs impacts conduisent ainsi à une majorité de situations graves ou extrêmes à l’horizon 2100 ;
- enfin, parce que la conjonction de l’inévitabilité du phénomène, de son irréversibilité — du moins à l’échelle de quelques générations humaines — et de l’ampleur de ses conséquences invite à anticiper les menaces, à s’y préparer, à renforcer les politiques d’atténuation du dérèglement climatique et à initier des politiques d’adaptation dont l’enjeu est de réduire les risques de catastrophes et les coûts humains et économiques afférents. Ce besoin est d’autant plus grand que la montée du niveau de la mer et ses effets sont variables selon les régions du monde et qu’ils appellent donc des réponses différenciées. Le travail mené par le groupe Prospective d’AllEnvi illustre ainsi la diversité des scénarios possibles, selon l’efficacité des politiques d’atténuation globale du dérèglement climatique, d’après la nature des territoires littoraux concernés et en fonction de la vigueur et de la précocité des politiques d’adaptation. Il ne prétend pas prédire l’avenir mais éclairer les choix : il invite tous les acteurs concernés à la lucidité, à l’anticipation et à la mobilisation collective.

Pour ce qui concerne l’orientation des recherches, l’ouvrage conclut naturellement à l’intérêt d’approches interdisciplinaires, qui soient à la mesure de la complexité du phénomène. Il propose ainsi quelques grands domaines prioritaires qui s’inscrivent dans le développement de la « science de la durabilité » qu’AllEnvi et ses membres appellent de leurs vœux :

6. CESE. 2021. Quelle pêche durable en mer face au changement climatique ? <https://www.lecese.fr/travaux-publies/quelle-peche-durable-en-mer-face-au-changement-climatique>

- La poursuite de l'étude du phénomène « naturel » considéré dans toute sa complexité : ses déterminants, sa vitesse, son ampleur et ses variations spatiales, ses impacts physiques et écologiques, ou encore ses interactions avec d'autres phénomènes naturels (la subsidence de certains littoraux, les liens avec l'hydrologie continentale) ;
- les perceptions et représentations individuelles et collectives de la montée du niveau de la mer. En appréhender la diversité, par exemple culturelle, est essentiel pour la construction de « solutions » qui conviennent aux populations concernées ;
- la gouvernance des territoires, considérée à différentes échelles spatiales et à différents horizons temporels, et selon leur nature rurale ou urbaine. De nombreuses disciplines des sciences sociales et humaines sont ici nécessaires pour comparer les coûts respectifs de l'action et de l'inaction ;
- l'étude des options et leviers envisageables dans le cadre de politiques d'adaptation, dont la conception, le suivi et l'évaluation supposent de mobiliser les sciences de l'ingénieur, les sciences humaines et sociales et les sciences de la nature.

*François Houllier
P-DG de l'Ifremer
Président d'AllEnvi*

Introduction

LE CHANGEMENT CLIMATIQUE est maintenant une réalité reconnue par la majorité des décideurs et de l'opinion publique. Si certaines de ses conséquences, comme les vagues de chaleur ou la fonte des glaciers, apparaissent clairement associées à ce changement, un autre de ses effets, la montée du niveau de la mer, n'est pas toujours considérée comme liée à ce changement. Pourtant, cette élévation apparaît aujourd'hui comme l'une des conséquences majeures du changement climatique, même si son ampleur et ses impacts à terme restent encore difficiles à quantifier et à positionner dans le temps. Il apparaît donc utile de tenter de clarifier les données de cet enjeu car, si les impacts de cette élévation sont encore faibles aujourd'hui, la majorité des projections portent à croire que la hausse du niveau de la mer va s'accélérer au cours des décennies, voire des siècles à venir. Même si l'on reste dans des projections moyennes de cette hausse à l'horizon du siècle, les conséquences risquent d'être considérables en zone côtière, voire catastrophiques dans certaines régions, dans de nombreux domaines comme le trait de côte lui-même, les écosystèmes littoraux, l'habitat humain, les infrastructures industrielles et portuaires, l'agriculture, le tourisme... De fait, l'interface terre-mer, pris au sens large, est un espace d'autant plus fragile qu'il est dépendant du niveau de la mer. Or le développement des activités humaines dans cet espace est facilité par l'accessibilité à la mer et par la disponibilité de zones planes constructibles. Les premiers ports étaient sur des côtes rocheuses offrant des rades naturelles faciles à défendre avec des fortifications élevées (Marseille, Gênes, Constantinople, Alger...). Mais la maritimisation de l'économie à partir du ^{xvii}^e siècle a conduit à développer les ports à grande échelle et à localiser les activités associées dans des zones côtières basses. Aujourd'hui, cet avantage est devenu une vulnérabilité. De nombreux grands ports dans le monde, et les grandes villes qui se sont développées autour, ont déjà entrepris des travaux de protection contre la submersion et les inondations (Londres, Rotterdam, Bangkok...) et certains pourraient même être relocalisés dans leur ensemble, comme Djakarta. Par ailleurs, le thalassotropisme de l'habitat, notamment celui lié au tourisme, a pris des proportions considérables après 1945, avec une préférence pour un accès facile à la mer, créant ainsi une nouvelle source de vulnérabilité. L'attractivité de la « vue sur la mer » a éclipsé toute considération rationnelle de vue sur l'avenir.

Le croisement de ces deux dynamiques, celle de la hausse inexorable du niveau de la mer et celle de la croissance continue des activités humaines dans les zones basses côtières constitue donc un enjeu majeur avant même la fin de ce siècle et encore plus au-delà (Bonneil et Fressoz, 2013).

La montée des eaux ignore les frontières et, si elle peut être différente selon les mers ou les régions océaniques, elle sera indépendante des efforts locaux pour la ralentir, voire pour tenter de la juguler, si ceux-ci ne restent le fait que de quelques États. C'est donc

une question de portée mondiale qui demande des actions internationales concertées ou au moins convergentes pour aboutir à des résultats dès lors que l'on veut faire plus que se protéger localement contre les risques de submersion.

L'imprécision actuelle des projections justifie le recours à la prospective pour ouvrir dans ce domaine des perspectives de réflexion et d'action. Même si la tendance est incontestable, les projections sur la hausse du niveau de la mer à divers horizons temporels sont imprécises pour deux raisons. La première est que les mécanismes physiques, chimiques et biologiques mis en jeu ne sont pas totalement explicités et, par conséquent, leur modélisation et leurs projections dans le temps restent peu précises. La seconde raison est que la cause de cette hausse est le changement climatique, phénomène dont l'ampleur et la vitesse sont directement liées aux activités anthropiques et aux choix politiques, industriels et comportementaux de milliards d'individus. Sur la durée d'une décennie, *a fortiori* sur un siècle, les évolutions des choix de gouvernance climatique, industrielle, technologique, économique et sociétale, à l'échelle régionale ou mondiale, restent largement conjecturales. Dans cette configuration, l'approche prospective offre l'intérêt de proposer des scénarios d'évolution possible ou probable des systèmes côtiers, via des méthodes rigoureuses d'analyse et de synthèse, avec des hypothèses explicites et ouvertes à la discussion. Ces méthodes permettent de tracer un champ des chaînes de causalités possibles, et d'en tester la robustesse en modifiant le jeu des variables motrices et de la combinatoire de leurs hypothèses. Elles donnent aussi des matériaux de discussion pour une meilleure prise de conscience de cette évolution à l'échelle mondiale et pour les choix de priorités stratégiques en termes d'aménagement comme de programmes de recherche. C'est dans ce cadre que l'Alliance des sciences de l'environnement du ministère de la Recherche et de l'Innovation français (MESRI), via son conseil, a demandé en février 2017 à son groupe transversal de prospective (voir encadré), de réfléchir à cette problématique et de conduire une étude intitulée : « La montée du niveau de la mer : conséquences et anticipations ; l'éclairage de la prospective ».

L'Alliance nationale de recherche pour l'environnement (AllEnvi) fédère les forces de recherche publique pour programmer et coordonner la stratégie scientifique française dans le domaine de l'environnement. Réunissant vingt-huit partenaires, elle est gouvernée par un Conseil rassemblant autour des présidents ou directeurs généraux de ses douze membres fondateurs (a), deux représentants de ses seize membres associés.

La mission d'AllEnvi est d'éclairer la recherche dans sa mission d'acquérir les connaissances et de construire les méthodes nécessaires pour répondre aux questions qui se poseront dans le futur. De fait, de nombreux programmes de recherche à l'échelle d'un laboratoire, d'un département, d'un institut ou d'un ministère intègrent une certaine vision du futur de ceux qui les définissent. Cependant, la tendance naturelle, au sein d'une structure de recherche, est de ne raisonner qu'en tendances dites « lourdes », donc peu contestables, sur des situations projetées dites « médianes », ce qui revient à éviter les scénarios pessimistes ou les

ruptures. Or, pour montrer l'intérêt d'un programme de recherche, il peut être utile de le resituer dans plusieurs visions de futurs possibles ou de référence à l'horizon 2030 ou 2050, car il n'est pas rare qu'une technique arrive à maturité en trente ans et plus (par exemple, l'informatique) dans un environnement économique et technologique mondialisé. Pour éclairer ses choix et ceux de ses membres, l'Alliance s'est donc dotée d'un groupe transversal de prospective constitué de représentants mandatés par chacun des organismes partenaires. (a) BRGM, CEA, Cirad, CNRS, CGE, Ifremer, Ifsttar, INRAE, IRD, Irstea, Météo France, MNHN

La montée du niveau de la mer

LA MESURE DE LA MONTÉE DU NIVEAU de la mer et l'étude des phénomènes qui sont impliqués dans son équilibre dynamique n'ont cessé de se perfectionner depuis un siècle, en complément des études sur la température. De nombreux capteurs ont été mis au point, des satellites aux flotteurs *in situ*, sur toutes les côtes du monde y compris en Antarctique. En parallèle, des programmes de traitement des données et de modélisation ont permis d'intégrer des masses croissantes d'informations et de faire des projections sur les décennies à venir avec des marges d'incertitude acceptables pour les décideurs. Cette mondialisation des efforts de compréhension de la machinerie climatique et océanique, avec une responsabilité particulière confiée au groupe international d'étude du climat (GIEC) créé en 1989, a permis d'actualiser régulièrement des projections possibles du niveau de la mer à divers horizons temporels. Ainsi, son dernier rapport donne une fourchette d'élévation du niveau moyen de la mer allant de 29 à 110 cm selon les hypothèses minimales ou maximales de réchauffement climatique (Oppenheimer *et al.*, 2019). Mais la valeur haute des projections (+ 110 cm) pourrait être dépassée, en particulier si la fonte des calottes glaciaires devait continuer à s'accélérer (Labeyrie, 2015 ; Bamber *et al.*, 2019). Ces projections ont longtemps été négligées par la plupart des pays pour des raisons d'inertie politique et d'opposition des intérêts économiques, mais elles sont peu à peu prises au sérieux au fil des conférences internationales sur le climat et des observations des dérèglements climatiques. Cet enjeu concerne directement l'Europe car nombre de plaines basses et grands deltas sont déjà affectés : Rhône, Pô, Rhin-Meuse, Tamise... (Chaumillon *et al.*, 2014).

Le développement des régions côtières

DEPUIS 1945, LES ACTIVITÉS HUMAINES se sont développées plus rapidement en zone côtière qu'ailleurs et dans tous les domaines : l'habitat, l'exploitation de ressources vivantes, minérales et énergétiques, les infrastructures lourdes pour l'industrie (usines,

centrales d'énergie, raffineries...) et le transport (routes et ports), le commerce, les activités militaires, les loisirs... à de larges échelles et souvent avec une forte intensité. Ces espaces apparaissent aussi comme des opportunités de croissance dite « bleue » avec notamment la multiplication des parcs éoliens marins.

La première tendance lourde dans cet espace est l'accroissement continu de la population littorale. On estime que 20 % de la population mondiale vit à moins de 20 km d'une côte, cette proportion atteignant 50 % si l'on étend la zone côtière à une profondeur de 100 km (Wong *et al.*, 2014). Les risques d'exposition à des épisodes de submersion ou d'inondation affectent déjà plus de 625 millions de personnes habitant à moins de 10 m au-dessus de la mer. Ce chiffre devrait approcher du milliard vers 2050 (Neumann *et al.*, 2015). Les pays les plus vulnérables sont principalement situés en Asie, où cinq pays concentrent 50 % des populations les plus exposées. Les ports, interfaces vitales du commerce maritime mondial sont également menacés : 12 des 20 plus grands ports du monde sont devenus vulnérables, en Asie mais aussi en Europe (Londres et Rotterdam par exemple).

Au cours des 70 dernières années, l'artificialisation des côtes à des fins de développement économique a conduit à densifier le tissu urbain, touristique et industriel à proximité de la mer et donc à multiplier les risques d'impacts des événements météorologiques extrêmes. Les exemples des catastrophes de la ville de La Nouvelle-Orléans (1 850 morts lors du passage de l'ouragan Katrina en 2005), La Faute-sur-mer (29 morts lors de la tempête en 2010) et de Fukushima (tsunami en 2011) illustrent bien cette vulnérabilité croissante.

Ce développement rapide des zones côtières se traduit par une artificialisation souvent mal contrôlée des zones littorales, qui impacte l'activité agricole, et entraîne aussi des pressions croissantes sur les ressources, qu'elles soient minérales (l'extraction des granulats, par exemple), énergétiques (pétrole et gaz) ou vivantes (pêche, biodiversité). Or, la mer côtière et les zones humides fournissent une grande diversité de services écosystémiques non marchands (nurseries d'espèces marines, puits de carbone, filtration ou absorption de composés toxiques, recyclage...), ce qui contribue à la durabilité des écosystèmes productifs et à la qualité générale de l'environnement. Ces services sont vitaux pour nombre d'activités comme le tourisme, l'aquaculture (source de 16 % des protéines dans le monde, hors pêche), mais ils sont menacés et risquent de l'être encore plus à l'avenir. L'interface terre-mer, zone riche, active et peuplée, est donc « en première ligne » des changements climatiques globaux.

La problématique

CET ESPACE CÔTIER au sens large, caractérisé par une forte concentration de population et une croissance urbaine et économique rapide concentre aussi les incertitudes et les risques. Associée à la réduction des apports en eau douce, notamment dans de nombreux pays subtropicaux, la submersion des terres basses s'accompagne d'une salinisation

croissante des sols et des nappes phréatiques (Hereher, 2010). Ainsi, ce phénomène, observé depuis 30 ans dans le bas delta du Nil, en Égypte, comme dans la plupart des deltas d'Asie, notamment celui du Mékong, a fait disparaître de vastes zones de production agricole. *A contrario*, il a permis à l'aquaculture en eau saumâtre de se développer à grande échelle avec une production passée sur la période de cent mille à un million et demi de tonnes par an.

Les effets de l'élévation annoncée du niveau de la mer ne se limiteront pas à la frange littorale. Ils se feront de plus en plus sentir à l'intérieur des terres ; par exemple, par une difficulté accrue d'écoulement des eaux, augmentant les surfaces inondées et par conséquent les dégâts lors des crues ; ou une modification de l'hydromorphologie des fleuves, dont le profil en long sera recalé par des dépôts de sédiments modifiant les écosystèmes aquatiques et la sécurité de certains ouvrages hydrauliques. De même, l'apparition de vastes zones humides, voire de lagunes ou lacs saumâtres de plus en plus à l'intérieur des terres pourrait avoir des conséquences en termes de santé humaine, notamment par le développement des moustiques, vecteurs de maladies.

Si des risques environnementaux classiques, comme des feux de forêts, des tempêtes ou des pandémies, peuvent être à peu près maîtrisés *via* divers moyens technologiques et des mesures de gouvernance, le risque climatique et, avec lui, la montée de la mer présentent un caractère d'exception parce qu'ils sont globaux, irréversibles, et que leur maîtrise exigerait un « nouveau contrat social » à l'échelle mondiale (Beck, 1986).

Des centaines de millions de personnes ainsi que toute l'économie littorale associée sont déjà concernées par la montée du niveau marin. Cependant, les contrastes sont forts entre des pays riches, comme les Pays-Bas capables d'investissements d'anticipation, et les pays pauvres, comme le Bangladesh, n'ayant d'autre choix que celui de la migration avec toutes les difficultés et tensions que cela engendrera. Il n'est cependant pas simple d'élaborer une stratégie cohérente de long terme face à ce phénomène, car toute la gamme des réactions humaines peut être observée dans les débats qui croisent des intérêts de court terme et des tendances de long terme : déni du problème, indifférence, acceptation fataliste, résistance au changement climatique, réaction pragmatique, volonté d'anticipation de long terme. Dans la pratique, le plus souvent, il ne s'agit pas de construire un mur mais de conserver une interface vivante avec la mer et de restructurer en profondeur les espaces côtiers. Que ce soit à l'échelle d'une commune, d'un État ou d'une organisation internationale, les décisions finales sont, le plus souvent, des compromis, avec une grande difficulté d'estimation du ratio coûts/bénéfices sur le long terme. De fait, même s'il existe déjà plusieurs conventions internationales traitant divers aspects de ce problème global (Ramsar 1971, Barcelone 1976, Ospar 1998...), les principes tendant à éviter les perturbations les plus graves, à réduire et à compenser leurs effets sont toujours difficiles à traduire en actions concrètes et efficaces (Aronson *et al.*, 2007).

De fait, il n'est pas aisé de proportionner l'échelle des travaux aux menaces car de nombreux paramètres interviennent, à commencer par l'horizon temporel de fiabilité de la protection. Faut-il de gros travaux pour être à l'abri pour un siècle ou une simple digue

pourrait-elle suffire pendant quelques décennies, le temps de s'adapter ? Les conséquences environnementales, sociales et économiques de la montée du niveau de la mer vont dépendre de l'ampleur de cette montée, des caractéristiques initiales et des usages actuels et futurs des espaces littoraux considérés, et surtout de la capacité de réaction et d'anticipation des instances de gouvernance. La combinaison de ces trois dimensions nécessite d'explorer plusieurs futurs possibles aux conséquences contrastées.

Les enjeux d'une approche prospective

COMMENT CONCEVOIR LE LITTORAL anthropisé sur le long terme face à la menace croissante de la montée du niveau de la mer, au moins jusqu'à 2100, en prenant en compte le risque de « tempête parfaite » (conjonction de toutes les menaces potentielles) sur au moins certains points du littoral ? Comment garder compatibles l'expansion des activités maritimes avec la sécurité et la pérennité des milieux ? Les échelles de perturbation de l'environnement liées à la montée de la mer sont si considérables qu'elles font apparaître de forts besoins en connaissances dans de nombreux domaines de recherche. Se projeter à 2100 est donc devenu nécessaire pour décider de manière pertinente à l'horizon 2030.

La prospective irrigue déjà la planification à moyen terme de diverses activités maritimes. Mais la gestion durable du littoral face à un changement aussi global que la montée du niveau de la mer ne pourra émerger sans démarche collaborative alliant sciences économiques et sociales, sciences biologiques, biotechniques et biophysiques, technologies et projection de choix de gouvernance dans de nombreux domaines : environnement, société, économie, urbanisation, industries, tourisme... De fait, l'adaptation au changement climatique global, y compris la dimension marine, constitue déjà parmi les plus importants thèmes de recherche à l'échelle européenne. Ce changement impose donc d'adapter les activités humaines sur les terres basses côtières à un horizon au moins de moyen terme. Cette restructuration, qui devra être co-construite avec les acteurs locaux, sera d'autant plus durable et sûre qu'elle sera anticipée, planifiée et accompagnée.

Outil assez récent au service de la gouvernance, avec l'intérêt d'une sorte de « modélisation » des choix stratégiques et d'estimation de leurs conséquences (Godet et Durance, 2008), l'analyse prospective contribue à faciliter les débats entre porteurs d'enjeux, à la sélection collective de mesures sans regret et, enfin, à l'appropriation par toutes les parties des actions nécessaires à mener à l'échelle régionale, quand ce n'est pas encore possible à l'échelle mondiale.

La méthode

LE LARGE ÉVENTAIL DES VITESSES de montée du niveau de la mer et la variété des conséquences et des réactions possibles justifient le recours à la méthode des scénarios. Cette méthode est une des mieux adaptée pour traiter une problématique complexe, avec de larges incertitudes sur les phénomènes en jeu et sur le temps long du siècle. Dans cette étude, le nombre élevé des variables motrices (23) et la large gamme de variation des hypothèses pour chaque variable ont permis de générer des scénarios robustes, plausibles et contrastés.

Il est donc proposé de mener une prospective à horizon éloigné (2100), visant à élaborer des représentations contrastées des futurs possibles, en articulant l'échelle mondiale à laquelle se déroule le phénomène étudié, et l'échelle régionale avec des cas-types locaux. Ces illustrations, par une diversité de territoires impactés, permettent de montrer diverses configurations littorales dans leur contexte géopolitique, économique et social, et de mesurer les conséquences de différentes politiques. Les trois illustrations d'exposition d'un territoire à la montée de la mer concernent une première situation-type en Asie, au Vietnam, une deuxième dans le pays européen le plus menacé, les Pays-Bas et une troisième dans une région française vulnérable, la Nouvelle-Aquitaine.

Les résultats devraient aider tout décideur à prendre la mesure des enjeux à l'échelle mondiale comme dans son périmètre de responsabilité. Il s'agit d'abord d'éclairer les besoins en concertation, en acquisition complémentaire de connaissances et en financement. Ensuite, cette approche de prospective facilite la programmation des actions à mener et la mobilisation des partenariats nécessaires à toute échelle, à court, moyen et long terme.

Le groupe d'experts :

- Bernardot Marc (Université du Havre)
- Bertin Xavier (CNRS/GT Mer AllEnvi)
- Carnus François (BRL Ingénierie)
- Cattaneo Antonio (Ifremer/GT Risques AllEnvi)
- Devès Maud (AFPCN/IPGP)
- Dörfliger Nathalie (BRGM)
- Durand Gaël (CNRS)
- Duval Anne-Marie (Cerema)
- Guedon Sylvine (IFSTTAR)
- Hérivaux Cécile (BRGM)
- Le Cozannet Gonéri (BRGM)
- Lobry Jérémy (IRSTEA)
- Meerpoel Matthieu (ICL)
- Meyssignac Benoît (LEGOS)
- Petitet Sylvain (Cerema)
- Rocle Nicolas (INRAE)
- de Rouw Anneke (IRD)
- Salas y Melia David (Météo France)
- Vagner Marie (CNRS)
- Valentin Christian (IRD/GT Sols AllEnvi)

Partie I

Les scénarios d'évolution



1. Les contextes physiques d'élévation du niveau de la mer

CETTE ÉTUDE PROSPECTIVE ne porte pas sur le phénomène d'élévation du niveau de la mer lui-même, mais sur les conséquences de cette élévation. Cependant, ce phénomène physique est un élément structurant de la construction des scénarios. Il convient donc de bien le comprendre afin de pouvoir en analyser les conséquences à 2100. Il faut commencer par définir les contextes physiques possibles d'élévation de la mer à l'horizon 2100 les plus représentatifs et les plus plausibles. Bien des questions doivent être traitées. Quelle amplitude ? Quelle vitesse d'évolution ? Quelles causes et quelle variabilité selon les différentes localisations géographiques ?

La problématique de la projection du niveau de la mer à moyen et long terme mobilise de nombreuses disciplines comme la paléoclimatologie, la glaciologie, la physique de l'atmosphère, l'océanographie physique, chimique et biologique, l'hydrologie, l'écologie, la géomorphologie..., et aussi diverses sciences sociales et économiques comme la géopolitique, la sociologie, l'économie, etc. Ce phénomène de hausse de la mer est étudié depuis des décennies et les moyens alloués à la recherche ont été accrus depuis que les estimations ont donné des chiffres inquiétants en termes de conséquences sur les activités humaines (Church *et al.*, 2011, Clark *et al.*, 2013).

Les connaissances accumulées à ce jour permettent d'établir plusieurs assertions bien documentées même si des controverses subsistent sur certains points notamment en matière de vitesse d'évolution et de chaînes de causalité :

- La mer monte en moyenne de 3 mm/an depuis 1993 ;
- ce phénomène est en accélération ;
- ce mouvement n'est pas uniforme, ni dans le temps, ni dans l'espace ;
- on identifie assez bien les causes et leur importance respective ;
- mais on ne sait pas bien ce qui se passe à l'échelle locale.

L'analyse des composantes de la montée du niveau de la mer actuelle établit que trois facteurs jouent un rôle majeur dans la montée des eaux (Church *et al.*, 2019). Ce sont :

- la fonte des glaces des calottes polaires, notamment au Groenland (contribution multipliée par 3 en 20 ans) ;
- le gonflement dû à la dilatation de l'eau des océans sous l'effet du réchauffement (effet stérique) ;
- la fonte des glaciers terrestres dans les régions montagneuses.

Ces trois facteurs contribuent *grosso modo* à parts égales à l'élévation du niveau de la mer.