

Chapitre 1. Les zones côtières face à la montée des risques

Ce chapitre donne un aperçu des risques grandissants qui pèsent sur les zones côtières du fait de la hausse du niveau des mers, des coûts économiques que cela occasionne et des implications pour l'action des pouvoirs publics. Il passe en revue l'état des connaissances scientifiques sur la hausse du niveau des mers et les aléas d'inondation dans les zones côtières. Il examine ensuite les coûts et les avantages de l'adaptation dans le contexte de la hausse future du niveau des mers, en s'intéressant tout particulièrement aux mesures de protection du littoral. Puis, l'adaptation des zones côtières dans l'optique d'un processus décisionnel robuste est analysée. Pour finir, le chapitre examine les implications pour l'action des pouvoirs publics des connaissances aujourd'hui disponibles sur les coûts et les avantages de cette adaptation, ainsi que les priorités qui devront être celles des travaux de recherche futurs afin d'étayer les politiques en la matière.

Ce chapitre a été rédigé par Alexander Bisaro, Jochen Hinkel et Daniel Lincke, du Global Climate Forum (Berlin) et du Département d'Économie des ressources naturelles, Université Humboldt (Berlin).

1.1. L'évolution des risques dans les zones côtières

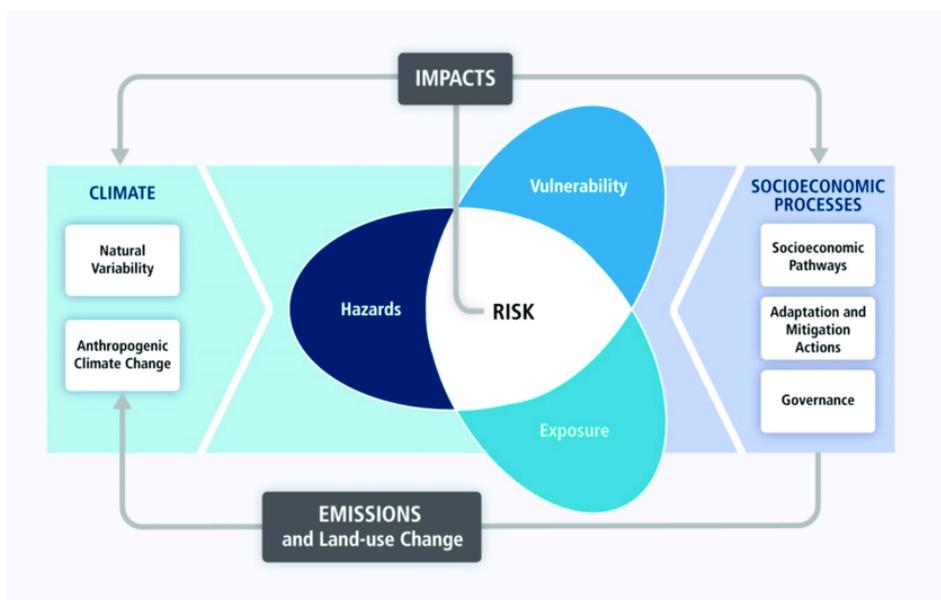
La hausse du niveau des mers (HNM) imputable au changement climatique se répercutera sur les côtes du globe en augmentant les risques d'inondation et d'érosion et éventuellement en inondant entièrement certains secteurs. L'augmentation des risques ira de pair avec une hausse des coûts économiques et humains occasionnés par les événements extrêmes et les changements qui se manifestent lentement. La capacité de la société à maintenir les risques pour un coût raisonnable à un niveau acceptable dans les zones côtières sera ainsi mise à rude épreuve.

Le défi de l'adaptation des zones côtières tient fondamentalement au fait que les décisions doivent faire entrer en ligne de compte des changements qui sont en cours et entourés d'importantes incertitudes sur fond de contestation des priorités des parties prenantes. Les choix faits dans ce contexte impliquent des arbitrages difficiles entre des objectifs et des intérêts divergents et ne peuvent pas s'affranchir des dispositifs institutionnels en place ni des décisions antérieures.

Dans ce rapport, la description des risques se fonde sur le cadre exposé dans le 5e rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC)¹. Les risques sont fonction de l'éventail des résultats possibles et des probabilités de concrétisation de ces résultats au cours d'une période donnée. En l'occurrence, les risques découlent de l'interaction entre aléas, exposition et vulnérabilité.

- **L'aléa** désigne l'éventualité d'un phénomène ou d'une tendance physique (inondation, érosion) susceptible d'entraîner des pertes en vies humaines, des blessures ainsi que des dégâts et des pertes touchant les biens, les infrastructures, les moyens de subsistance, la fourniture de services, les écosystèmes et les ressources environnementales.
- **L'exposition** renvoie à la présence de populations, d'éléments d'infrastructure, d'habitations ou d'autres actifs corporels dans un lieu soumis à un aléa. Elle peut se mesurer à l'aune du nombre de personnes ou des types d'actifs présents dans une zone côtière inondable, par exemple.
- **La vulnérabilité** est le degré auquel un système naturel ou social est sensible – ou incapable de faire face – à l'exposition à un aléa.

Graphique 1.1. Cadre théorique fondé sur le risque



IMPACTS	IMPACTS
CLIMATE	CLIMAT
Natural Variability	Variabilité naturelle
Anthropogenic Climate Change	Changement climatique d'origine anthropique
Vulnerability	Vulnérabilité
Exposure	Exposition
Hazards	Aléas
RISK	RISQUE
SOCIOECONOMIC PROCESSES	PROCESSUS SOCIO-ÉCONOMIQUES
Socioeconomic Pathways	Trajectoires socio-économiques
Adaptation and Mitigation Actions	Mesures d'adaptation et d'atténuation
Governance	Gouvernance
EMISSIONS and Land-use Change	ÉMISSIONS et changement d'affectation des terres

Source : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (2014^[1]) « Glossary, Acronyms and Chemical Symbols », <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9781107415416.023>

Parmi les risques découlant de la HNM, il y a des événements de forte probabilité qui ont de faibles conséquences (inondations liées aux marées, par exemple) et des événements de forte probabilité qui ont des conséquences importantes (ondes de tempête, par exemple). Il est établi que les ondes de tempête pénètrent à présent plus profondément dans les terres qu'il y a quelques décennies, ce qui a des effets dommageables sur les collectivités et les écosystèmes côtiers (Hoegh-Guldberg et al., 2018^[2]).

1.1.1. Changement climatique et hausse du niveau des mers

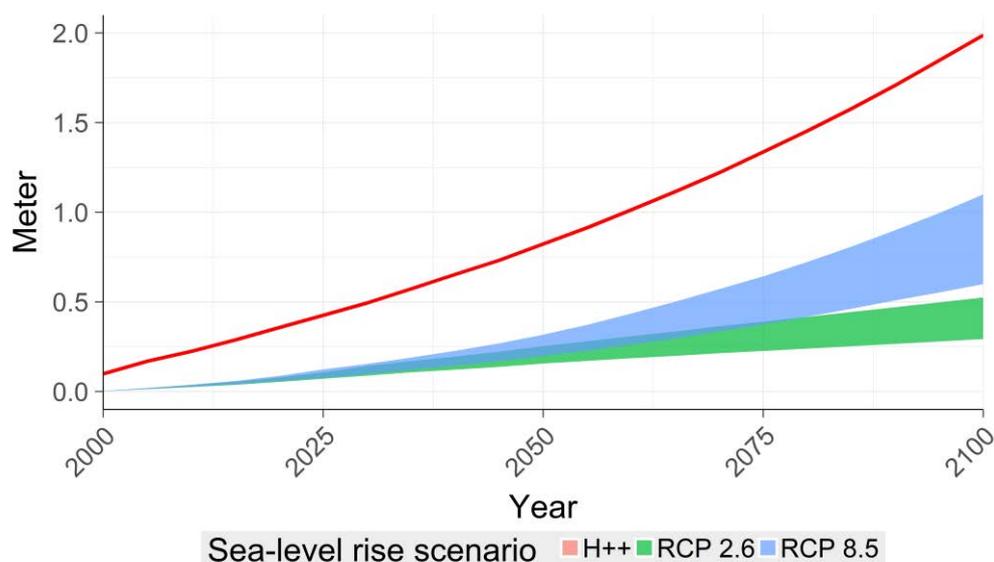
La hausse du niveau des mers provoquée par le changement climatique accroît les risques dans les zones côtières en augmentant la probabilité d'inondations et en entraînant la submersion de terres jusqu'alors émergées. En règle générale, elle résulte de la modification de la température moyenne mondiale, qui est elle-même la conséquence des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Établir des projections des niveaux futurs des mers exige donc de définir des scénarios de HNM à partir de différents profils

d'évolution de la concentration de gaz à effet de serre. Les profils représentatifs d'évolution de concentration (ou RCP pour *representative concentration pathways*) recouvrent un large éventail de profils de ce type jusqu'en 2100.

Le Graphique 1.2 présente une série de scénarios de HNM établis sur la base d'études récentes des répercussions de l'élévation du niveau des mers dans le monde (Hinkel et al., 2014^[3]). Toutes les valeurs de HNM sont exprimées par rapport au niveau moyen de la mer au cours de la période de référence 1985-2005. Les projections de HNM comprises entre 0.3 m et 1.3 m au cours du XXI^e siècle reposent sur des scénarios correspondant à trois profils représentatifs d'évolution de concentration (RCP 2.6, RCP 4.5 et RCP 8.5), quatre modèles de circulation générale (HadGEM2-ES, IPSLCM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM et NorESM1-M) et des scénarios bas, médian et haut concernant la glace terrestre (Hinkel et al., 2014^[3] ; Lincke et Hinkel, 2018^[4]). Cependant, une valeur de HNM extérieure à cette fourchette est également possible. Ainsi, le Graphique 1.2 représente aussi un scénario haut de HNM de 2.0 m à l'horizon 2100 (H++) (Nicholls et al., 2013^[5]). Ce scénario haut se situe dans la queue de la distribution des HNM possibles au XXI^e siècle, qui correspond à des hausses de faible probabilité et à fort impact.

Graphique 1.2. Scénarios de hausse du niveau des mers jusqu'en 2100

Toutes les valeurs de HNM sont exprimées par rapport au niveau moyen des mers au cours de la période de référence 1985-2005.



Meter	Mètres
Year	Année
Sea-level rise scenario	Scénario de hausse du niveau des mers
H++	H++
RCP 2.6	RCP 2.6
RCP 8.5	RCP 8.5

Source : Lincke, D. et J. Hinkel (2018^[4]) « Economically robust protection against 21st century sea-level rise », <http://dx.doi.org/10.1016/J.GLOENVCHA.2018.05.003>.

La hausse du niveau moyen mondial des mers est imputable à différents phénomènes, dont les quatre plus importants sont la dilatation thermique des océans (Taylor et al., 2012^[6]), la

fonte des glaciers (Marzeion, Jarosch et Hofer, 2012^[7]), la fonte de la nappe glaciaire du Groenland (Fettweis et al., 2013^[8]) et celle des nappes glaciaires de l'Antarctique (Levermann et al., 2014^[9]). Il ressort d'analyses comparant le poids relatif de ces phénomènes au moyen de différents modèles de circulation générale (MCG) et profils d'évolution de la concentration que c'est la dilatation thermique des océans qui contribue le plus à la HNM moyenne dans le monde. La fonte des glaciers et celle des nappes glaciaires jouent également un rôle non négligeable, mais moins important. Cela étant, la fonte de la glace terrestre considérée dans son ensemble devrait contribuer le plus à l'élévation du niveau des mers à l'avenir (Hinkel et al., 2014^[3])

En outre, les effets de gravitation et de rotation liés à la modification des masses de glace (Farrell et Clark, 2007^[10]) et la circulation océanique (Hinkel et al., 2014^[3]) influencent également la répartition régionale de la hausse du niveau des mers, et font que cette hausse est plus forte sous les tropiques que sous des latitudes plus élevées (Perrette et al., 2013^[11]).

De tous ces processus, la fonte des nappes glaciaires est celui dont la contribution est entourée des plus grandes incertitudes, et c'est le rôle des nappes glaciaires de l'Antarctique qui le plus incertain, avec une distribution des risques caractérisée par une longue queue du côté des risques de très forte hausse du niveau des mers. Selon des études récentes, le 5^e centile correspond à une contribution d'environ 2 cm des nappes glaciaires de l'Antarctique à la hausse du niveau des mers, et le 50^e centile, à une contribution de 10 cm. En revanche, le 95^e centile correspond à une contribution de pas moins de 41 cm dans le scénario RCP 8.5 (Hinkel et al., 2014^[3]). Une autre incertitude découle des différences entre les modèles. Ainsi, Hinkel et al. (2014^[3]) constatent que les projections médianes du niveau des mers à l'horizon 2100 peuvent varier de 20 cm en fonction du MCG utilisé. Les distributions de probabilité représentées dans le Graphique 1.2 tiennent compte de ces différentes incertitudes découlant des processus physiques.

Cependant, la variation du niveau relatif de la mer localement peut être très différente de celle du niveau moyen des mers du globe. Le niveau local est influencé par des processus biophysiques et géologiques comme les mouvements verticaux du sol, la modification de la circulation océanique ou l'ajustement isostatique glaciaire. Par exemple, sur le littoral septentrional de la Finlande et de la Suède, le sol s'élève actuellement plus vite que le niveau de la mer sous l'effet du rebond post-glaciaire. Le niveau local de la mer est aussi influencé par les activités humaines comme l'extraction d'eau, de pétrole ou de minerais dans le sous-sol, ou encore la construction de barrages, qui peut modifier les apports de sédiments fluviaux. Par endroits, ces activités peuvent contribuer jusqu'à dix fois plus à la HNM que le changement climatique (Ericson et al., 2006^[12]).

Les deltas densément peuplés, dans lesquels vivent au total plus de 500 millions de personnes, sont particulièrement sujets aux phénomènes d'affaissement des sols d'origine humaine du fait de leurs caractéristiques géologiques (Woodroffe et al., 2006^[13]). Parmi les mégapoles côtières de la planète, beaucoup sont situées dans des deltas, et des affaissements de plusieurs mètres imputables aux activités humaines y ont été observés au cours du XX^e siècle (Nicholls, 1995^[14] ; Banque mondiale, 2010^[15]). La ville de Jakarta, par exemple, s'affaisse au rythme de 3 à 10 cm par an depuis une trentaine d'années (Abidin et al., 2015^[16]). Les régions rurales ne sont pas à l'abri, puisqu'on a aussi enregistré des affaissements de 250 mm par an dans certaines zones où l'aquaculture intensive puise dans les nappes souterraines pour rafraîchir l'eau des bassins d'élevage (Higgins et al., 2013^[17]).

Par conséquent, les modifications locales du niveau de la mer imputables aux activités humaines peuvent être un important facteur d'incertitude concernant les risques qui pèsent

sur les zones côtières (Hinkel et al., 2014^[3]). Une modélisation ciblée géographiquement s'impose donc pour cerner les incidences possibles dans les différentes zones. Il existe des modèles mondiaux de l'ajustement isostatique glaciaire naturel (Douglas, Kearney et Leatherman, 2000^[18]), mais les informations disponibles sur le rythme annuel de l'affaissement des sols d'origine humaine sont très limitées, et comme aussi bien les déterminants que les réponses sont circonscrits, les modélisations sont extrêmement difficiles (Hanson et al., 2011^[19]).

Cela étant, la HNM imputable au changement climatique se poursuivra après 2100, et ce pendant des milliers ou dizaines de milliers d'années, même dans l'hypothèse d'une stabilisation des concentrations de gaz à effet de serre au cours du XXI^e siècle (Levermann et al., 2013^[20]). C'est un phénomène irréversible (Church et al., 2001^[21]). Le rythme et l'ampleur de la HNM sur des périodes aussi longues sont toutefois très incertains et quelque peu controversés. Par exemple, dans son 5^e rapport d'évaluation, le GIEC estime que la HNM atteindra entre 1.5 et 6.6 m en l'an 2500 dans le cadre des scénarios tablant sur des concentrations élevées (> 700 ppm éq. CO₂). En revanche, selon les estimations de (Clark et al., 2016^[22]), elle s'établira entre 25 et 52 m au cours des 10 000 prochaines années dans l'hypothèse d'une sensibilité du climat à l'équilibre de 3.5 °C. Pour leur part, Levermann et al. (2013^[20]) estiment la HNM rendue inévitable par l'élévation des températures à environ 2.3 m par degré Celsius. Par conséquent, la HNM à long terme pourrait s'échelonner de plusieurs dizaines de centimètres à plusieurs mètres. Il est aussi possible que la HNM prenne une ampleur nettement supérieure à ce que l'on peut envisager aujourd'hui. Ces évolutions possibles déboucheraient sur des situations radicalement différentes au cours des siècles à venir.

1.1.2. Éléments attestant d'une diminution de la résilience des écosystèmes et liens avec les activités humaines

Les écosystèmes estuariens et côtiers font partie des systèmes naturels les plus exploités et les plus menacés dans le monde et voient leur état se détériorer sensiblement sous l'effet des activités humaines. À titre d'exemple, au niveau mondial, 50 % des marais salés, 35 % des mangroves, 30 % des récifs coralliens et 29 % des herbiers marins ont disparu ou subi des dégradations (Barbier et al., 2011^[23]). Murray et al. (2014^[24]) ont constaté que 28 % des vasières bordant la mer Jaune ont disparu entre 1980 et 2000, au rythme de 1.2 % par an.

L'aménagement du littoral peut être une cause de dégradation des écosystèmes côtiers, notamment le remblaiement sur la mer et la mise en place d'ouvrages de défense (Hoegh-Guldberg et al., 2018^[2]). Le remblaiement sur la mer a été largement pratiqué par le passé dans des zones densément peuplées qui manquaient de ressources foncières, par exemple dans les pays bordant le sud de la mer du Nord et en République populaire de Chine (ci-après la « Chine ») (Bisaro et Hinkel, 2018^[25]). Depuis 30 ans, quelque 33 700 km² de terres ont ainsi été gagnés sur la mer (soit 50 % de plus environ que la superficie perdue), principalement dans des pays comme Dubaï, Singapour et la Chine (Donchyts et al., 2016^[26] ; Ma et al., 2014^[27]). La disparition ou la dégradation des zones humides imputable à cette pratique a pour conséquence de réduire les zones de stockage de l'eau. Les ondes de tempête peuvent alors déferler à plus grande vitesse sur le littoral et atteindre des hauteurs plus importantes (Wong et al., 2014^[28]). En outre, le remblaiement sur la mer peut perturber les écosystèmes côtiers, avoir des effets dommageables sur les récifs coralliens, les mangroves ou les herbiers marins (Li et al., 2013^[29]) et perturber des processus morphologiques naturels, favorisant l'érosion du littoral et augmentant le risque d'inondation (Murray et al., 2014^[24]). Enfin, comme déjà évoqué, l'aménagement du

littoral entraîne souvent une hausse des prélèvements d'eau souterraine, ce qui peut provoquer des affaissements des sols et amplifier les risques pesant sur les zones côtières (Wong et al., 2014^[28]).

Les pertes de biodiversité, de fonctions écosystémiques et de végétation côtière font que les zones littorales sont moins bien protégées des inondations et des tempêtes (Liquete et al., 2013^[30]). Les zones humides, les mangroves, les récifs coralliens proches du rivage et les dunes sont autant d'éléments qui peuvent atténuer les ondes de tempête et stabiliser la ligne de rivage (Spalding et al., 2014^[31]). Cette protection possède une grande valeur. À titre d'exemple, on estime que les récifs coralliens protègent plus de 100 millions de personnes dans le monde des inondations imputables aux vagues et évitent des dégâts importants, évalués à 400 millions USD par an pour les seuls Cuba, Indonésie, Malaisie, Mexique et Philippines (Beck et al., 2018^[32]). En plus de protéger le littoral, des écosystèmes sains fournissent de nombreux autres services de grande valeur (services écosystémiques) indispensables aux populations, notamment des habitats nourriciers pour les poissons et d'autres espèces marines, la filtration de l'eau, le stockage du carbone et des possibilités d'activités de loisirs (Mehvar et al., 2018^[33]).

La HNM est en soi une menace pour les écosystèmes côtiers, et selon les estimations de (Spencer et al., 2016^[34]), jusqu'à 78 % de la superficie mondiale des zones humides pourrait disparaître dans le cadre d'un scénario haut de HNM. En outre, la modification des écosystèmes provoquée par la HNM risque fort de réduire les avantages procurés par leurs services et d'avoir ainsi des répercussions négatives sur les populations qui en sont tributaires (Mehvar et al., 2018^[33]).

1.2. Le coût économique de la hausse du niveau des mers

La montée des risques liés à la HNM ira de pair avec une augmentation des coûts économiques et humains occasionnés par les événements extrêmes et par les changements qui se manifestent lentement. Cette section s'appuie sur de nouvelles modélisations pour présenter des estimations économiques des répercussions de la HNM sur les actifs côtiers, ainsi que des coûts d'adaptation liés aux mesures de protection.

Pour évaluer les coûts induits par la HNM, il faut prendre en compte les risques d'inondation et les coûts d'adaptation, c'est-à-dire les coûts de mise en œuvre de mesures de protection, d'accommodation ou de repli (examinées plus en détail dans le chapitre 2). Les coûts et les avantages de l'adaptation ont été évalués à l'échelle de pays particuliers dans le cadre d'une première génération d'études, dans lesquelles le recul progressif des terres émergées était considéré comme le principal impact de la hausse du niveau des mers (Fankhauser, 1995^[35] ; Nicholls, Tol et Vafeidis, 2008^[36] ; Sugiyama, Nicholls et Vafeidis, 2008^[37] ; Yohe, Neumann et Ameden, 1995^[38]). Comme évoqué plus haut, ces études ignoraient généralement les effets dommageables d'événements entraînant une élévation extrême du niveau des mers, lesquels sont plus nombreux avec la hausse du niveau moyen des mers et se manifestent avant même que des terres soient définitivement englouties par la mer (Wong et al., 2014^[28]). Une deuxième génération d'études a tenté de corriger ce défaut en examinant les dommages attendus en cas de niveau extrême atteint par la mer, et en procédant à des analyses plus fines au niveau infranational grâce au découpage des côtes en segments (Diaz, 2016^[39] ; Hinkel et al., 2014^[40] ; Nicholls et al., 2011^[41] ; Vafeidis, 2008^[42]).

Le modèle DIVA sert à modéliser les impacts de la HNM sur les côtes de la planète ; il offre l'une des représentations les plus complètes et les plus perfectionnées des processus

à prendre en compte pour évaluer les risques d'inondations côtières et les coûts d'adaptation, en s'appuyant sur le découpage des zones côtières mondiales en 12 148 segments défini dans la base de données DINAS-COAST (Vafeidis et al., 2008^[43]). Le recours à DIVA permet d'évaluer les coûts associés à la HNM au XXI^e siècle dans le cadre de différents scénarios d'adaptation. Les dommages causés par les inondations sont calculés en mettant en rapport l'exposition de la population en fonction de l'altitude et les hauteurs d'inondation découlant d'événements extrêmes, et en appliquant une fonction hauteur d'inondation-dommages. Les dommages annuels attendus correspondent à l'espérance mathématique de dommages sur la base de distributions des événements extrêmes et compte tenu des niveaux de protection (Hinkel et al., 2014^[3]). Dans DIVA, les coûts d'adaptation sont constitués de l'investissement dans les digues et des coûts d'entretien additionnels.

Pour évaluer les impacts d'une hausse des inondations côtières sur les populations et les actifs, il convient de recourir à un vaste échantillon de scénarios socio-économiques et de HNM de pointe. En l'occurrence, on applique un éventail de scénarios afin de répondre aux incertitudes déjà évoquées concernant l'évolution future des risques dans les zones côtières. S'agissant des scénarios socio-économiques, cinq scénarios de croissance de la population et du produit intérieur brut (PIB) fondés sur les « trajectoires socio-économiques partagées » (SSP) sont ainsi employés (Encadré 1.1).

Encadré 1.1. Trajectoires socio-économiques partagées et risques côtiers futurs

Les « trajectoires socio-économiques partagées » (ou SSP pour *shared socioeconomic pathways*) sont largement employées dans l'évaluation des incidences du changement climatique pour établir des scénarios d'évolution socio-économique future logiques et cohérents (IIASA, 2012^[44]; Lincke and Hinkel, 2018^[4]). Les résultats du modèle DIVA présentés dans cette section ont été obtenus en utilisant les SSP 1 à 5 décrites ci-dessous.

- La SSP 1 (durabilité) correspond à un monde progressant vers la durabilité, où l'intensité d'utilisation de ressources et la dépendance à l'égard des énergies fossiles diminuent. Elle débouche sur le PIB le plus élevé et la population la moins élevée.
- La SSP 2 (moyen terme) correspond à un monde dans lequel prévalent des hypothèses moyennes.
- La SSP 3 (éclatement) correspond à un monde divisé en régions pauvres où l'intensité d'utilisation de ressources est faible et en régions plutôt riches fortement tributaires des énergies fossiles. Elle débouche sur le PIB le plus faible et la population la plus élevée.
- La SSP 4 (inégalités) correspond à un monde marqué par de fortes inégalités à la fois à l'intérieur des pays et entre eux. Le PIB et la population évoluent comme dans la SSP 3, mais de façon moins prononcée.
- La SSP 5 (développement classique) correspond à un monde tourné vers un développement rapide et équitable tributaire des énergies fossiles.

Tableau 1.1. Population planétaire et PIB mondial en 2050 et en 2100 dans le cadre de différentes trajectoires socio-économiques partagées

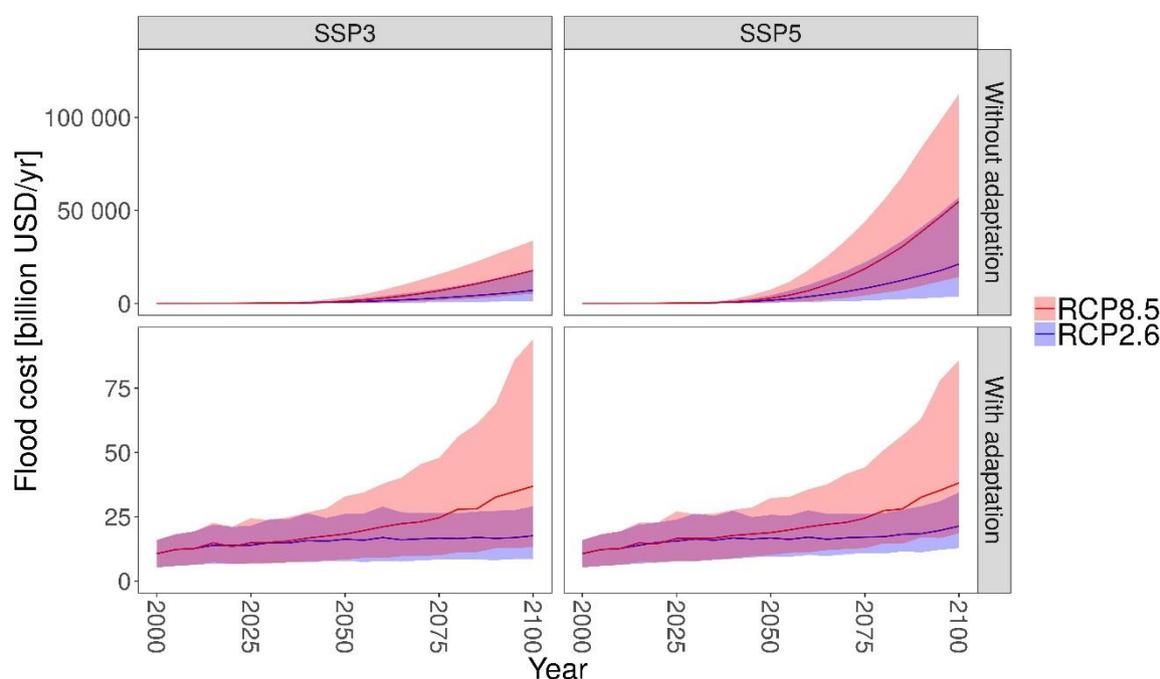
	Population (millions)		PIB (milliards USD/an)	
	2050	2100	2050	2100
SSP 1	8 400	7 200	295 000	771 000
SSP 2	9 300	9 800	260 000	685 000
SSP 3	10 300	14 100	334 000	667 000
SSP 4	9 400	11 800	242 000	462 000
SSP 5	8 500	7 700	348 000	1 207 000

Source : Hinkel, J. et al. (2014_[3]), « Coastal flood damage and adaptation costs under 21st century sea-level rise », <https://doi.org/10.1073/pnas.1222469111>.

DIVA peut prendre en compte différents scénarios d'adaptation venant s'ajouter au canevas des SSP, et un scénario d'adaptation « de référence » est nécessaire pour évaluer les répercussions de la hausse du niveau des mers et l'adaptation. La plupart des études retiennent une hypothèse « zéro adaptation », selon laquelle les défenses côtières ne sont pas renforcées alors que le niveau des mers s'élève, et le développement socio-économique se poursuit dans les plaines inondables. Cette stratégie de protection « constante » signifie que la hauteur des digues reste inchangée, si bien que le risque d'inondation augmente avec le temps à mesure que le niveau des mers progresse. Dans le cadre d'une stratégie de protection « renforcée », les digues sont en revanche surélevées à la suite du développement socio-économique et de la montée relative du niveau des mers (Hinkel et al., 2014_[3]).

Le Graphique 1.3 montre le coût des inondations côtières correspondant aux SSP 3 et SSP 5 et aux RCP bas et haut (2.6 et 8.5, respectivement), tel qu'il est présenté dans l'analyse de Hinkel et al. (2014_[3]). La SSP 3 et la SSP 5 ont une valeur indicative en ce qu'elles représentent respectivement les valeurs plancher et plafond du coût annuel des inondations au cours du XXI^e siècle. C'est dans la SSP 3, trajectoire correspondant au deuxième plus faible PIB (le plus faible étant celui de la SSP 4) et à la population la plus élevée, que l'exposition des zones côtières est la plus faible. Le Graphique 1.3 montre qu'en l'absence d'adaptation, le coût des dommages causés par les inondations atteindra un niveau très élevé d'ici à la fin du siècle. Dans le scénario haut de HNM (1.3 m selon le RCP 8.5), son niveau médian s'élève à environ 50 000 milliards USD par an, soit environ 4 % du PIB mondial. L'adaptation, en améliorant la protection, peut permettre de diviser par cent voire par mille ces coûts et se révèle bénéfique dans toutes les combinaisons de scénarios. Ainsi, il ressort de cette analyse que, pour une grande partie de la planète, la protection des zones côtières est bénéfique économiquement, quels que soient la HNM et le développement socio-économique à venir (voir Section 1.4).

Graphique 1.3. Coût annuel mondial des inondations dans le cadre de différents scénarios socio-économiques et climatiques avec et sans adaptation



Flood cost [billion US\$/yr]	Coût des inondations [milliards USD/an]
Without Adaptation	Sans adaptation
With Adaptation	Avec adaptation
Year	Année

Note : Pour chaque combinaison de scénarios, les courbes représentent la valeur médiane et les aires colorées représentent la plage de variation entre le 5e et le 95e centiles.

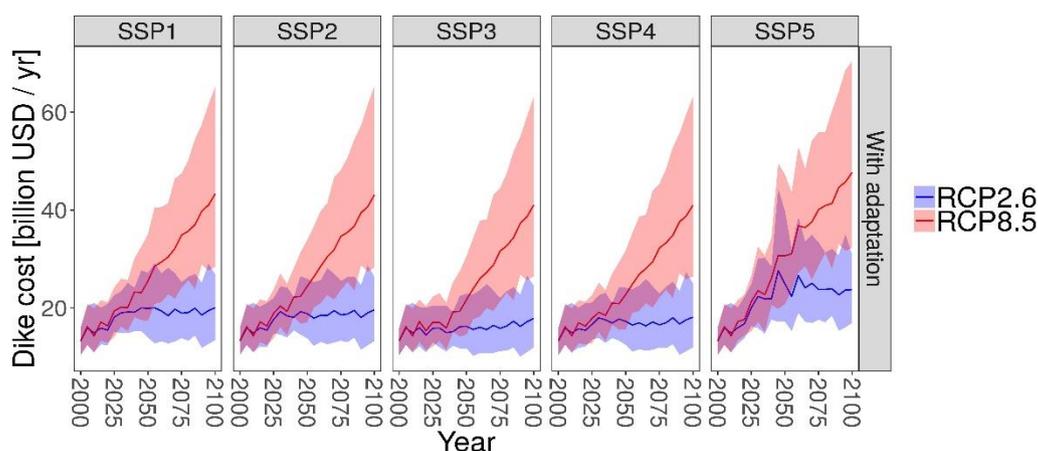
Source : Hinkel, J. et al. (2014_[40]), « Coastal flood damage and adaptation costs under 21st century sea-level rise. », <https://doi.org/10.1073/pnas.1222469111>.

Au niveau mondial, Hinkel et al. (2014_[3]) font état de dommages résiduels cumulés causés par les inondations au XXI^e siècle compris entre 300 milliards et 3 900 milliards USD de 2005. Si l'on retient les hypothèses hautes concernant la HNM, on obtient une fourchette plus élevée : Lincke et Hinkel (2018_[4]) estiment ainsi le coût des dommages résiduels au XXI^e siècle entre 1 700 milliards et 5 500 milliards USD de 2014 (non actualisés). Ces coûts plus élevés (aux deux extrémités de la fourchette) s'expliquent par le fait que Lincke et Hinkel (2018_[4]) prennent en considération des scénarios dans lesquels la HNM atteint jusqu'à 2.0 m, contre 1.3 m dans l'étude précédente. Pour les pays de l'OCDE seuls, les dommages résiduels causés par les inondations à l'horizon 2100 varient entre 2.5 milliards et 29.8 milliards USD de 2005. Quoique significatifs, ces coûts représentent une part relativement modeste des coûts mondiaux, ce qui tient au fait que les pays de l'OCDE sont davantage en mesure d'investir dans la protection des zones côtières.

Le Graphique 1.5 montre le coût mondial de l'adaptation dans l'hypothèse d'une stratégie de protection renforcée des zones côtières. En règle générale, les coûts de protection sont sensiblement supérieurs dans le cadre des scénarios de HNM élevée, indépendamment du développement socio-économique. Ils culminent dans la SSP 5, qui correspond à un monde riche fortement consommateur d'énergies fossiles, dans la mesure où la progression de la

richesse va de pair avec une hausse des actifs exposés et donc des coûts de protection. Hinkel et al. (2014^[3]) parviennent à une fourchette des coûts de protection pour le XXI^e siècle qui va de 1 900 milliards à 4 200 milliards USD de 2005, en tenant compte des scénarios de HNM jusqu'à 1.3 m. Si l'on prend en compte les scénarios hauts de HNM (jusqu'à 2.0 m), l'extrémité haute de la fourchette passe à 7 800 milliards USD de 2014 (non actualisés). Ces résultats sont du même ordre que ceux présentés dans des études mondiales antérieures. Ainsi, (Tol, 2002^[44]) faisait état de coûts de protection allant de 600 milliards à 1 060 milliards USD de 1995 pour une HNM d'un mètre, hors coûts d'entretien.

Graphique 1.4. Coût mondial annuel de l'adaptation dans l'hypothèse d'une stratégie de protection renforcée des zones côtières selon différents scénarios socio-économiques et climatiques



Dike cost [billion US\$/yr]	Coût des digues [milliards USD/an]
With Adaptation	Avec adaptation
Year	Année

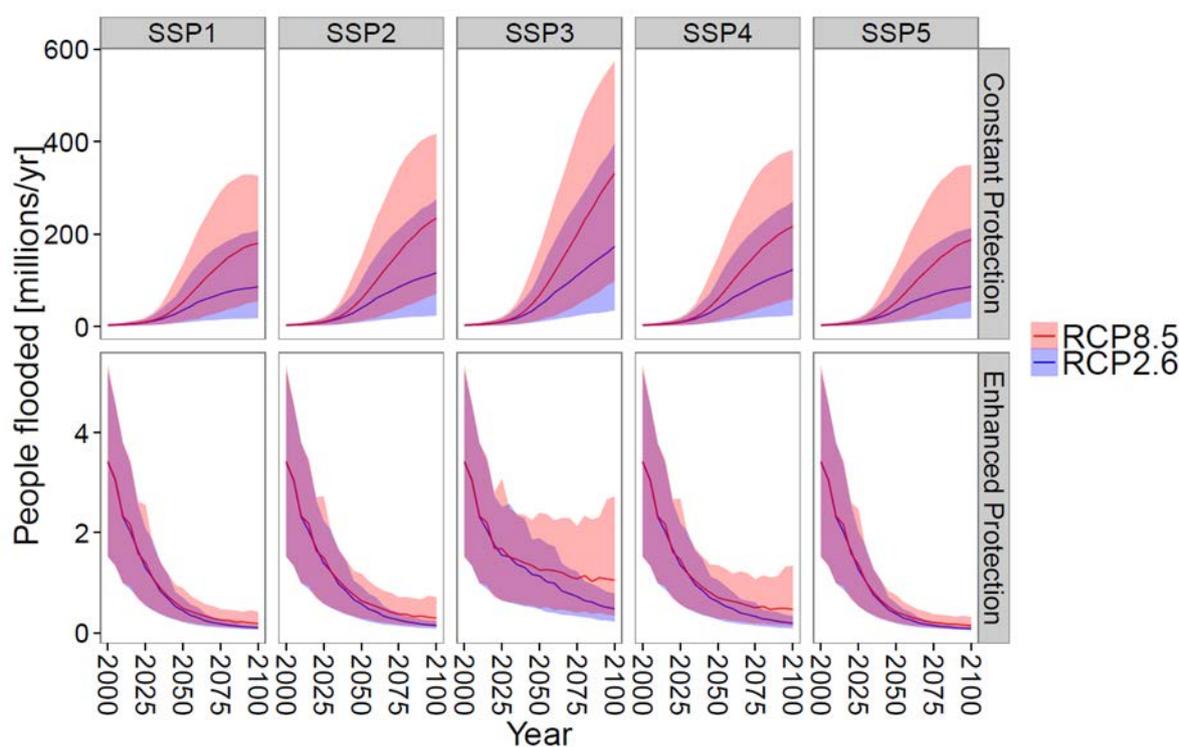
Source : Hinkel, J. et al. (2014^[40]), « Coastal flood damage and adaptation costs under 21st century sea-level rise. », <https://doi.org/10.1073/pnas.1222469111>.

Les coûts relatifs de la HNM sont également importants en ce qu'ils indiquent la charge que représenteront ces coûts pour un pays ou une région en particulier. Ils peuvent être définis comme la valeur actuelle des coûts de protection et des coûts des dommages résiduels en pourcentage de la valeur actuelle du PIB au cours du XXI^e siècle (Lincke et Hinkel, 2018^[4]). Dans l'hypothèse où une stratégie de protection optimale est appliquée, ils représentent une faible part du PIB mondial, mais ils entreront pour une part non négligeable dans le PIB de certains pays. En cas de stratégie d'adaptation optimale, les coûts relatifs de la HNM se situent entre 0.02 % du PIB mondial dans le cas de figure le plus favorable (HNM moyenne mondiale de 0.3 m et SSP 5, sans actualisation) et 0.07 % du PIB mondial dans le scénario le plus défavorable (HNM moyenne mondiale de 2.0 m et SSP 3, taux d'actualisation de 6 %). Si ces coûts ne sont généralement pas élevés pour les pays de l'OCDE, ils dépassent néanmoins 1 % dans la configuration la moins favorable pour certains d'entre eux, à savoir l'Islande (2.3 %), la Corée (1.8 %) et la Norvège (1.1 %). Au niveau mondial, les petites îles, en particulier, subiront des coûts relatifs élevés, notamment du fait du risque d'inondation. Au total, 41 pays sont confrontés à des coûts relatifs de la HNM supérieurs à 1 % du PIB dans la combinaison de scénarios la plus défavorable.

Le Graphique 1.5 montre le nombre de personnes inondées chaque année dans le monde selon différents scénarios socio-économiques et climatiques dans l'hypothèse d'une protection constante (« sans adaptation ») et dans celle d'une protection renforcée (« avec adaptation »). Dans la première hypothèse, ce nombre progresse tout au long du siècle dans tous les scénarios socio-économiques, y compris les SSP 1 et SSP 5 qui prévoient une diminution de la population mondiale à partir de 2050 (Hinkel et al., 2014^[3]). Le nombre annuel de personnes inondées culmine dans le scénario SSP 3 et enregistre son plus bas niveau dans le scénario SSP 1, ce qui cadre avec le fait qu'ils correspondent respectivement à la population mondiale la plus élevée et la moins élevée (voir Tableau 1.1).

Graphique 1.5. Nombre annuel de personnes inondées dans le monde selon deux scénarios de protection

Scénarios de protection constante (« sans adaptation ») et de protection renforcée (« avec adaptation »).



People flooded [millions/yr]	Personnes inondées [millions/an]
Constant Protection	Protection constante
Enhanced Protection	Protection renforcée
Year	Année

Source : Hinkel, J. et al. (2014^[40]), « Coastal flood damage and adaptation costs under 21st century sea-level rise. », <https://doi.org/10.1073/pnas.1222469111>.

Dans l'hypothèse d'une protection renforcée, le nombre de personnes inondées baisse au fil du siècle, à mesure que davantage de régions atteignent un niveau de prospérité qui leur permet de construire des digues. En outre, le développement socio-économique a moins d'influence sur le nombre de personnes inondées que dans l'hypothèse d'une protection constante. Le scénario extrême SSP 3, qui donne lieu au plus fort accroissement démographique, fait exception, mais c'est celui dans lequel le PIB et donc la hauteur des digues progressent le plus lentement.

On a vu que les coûts relatifs modélisés de la HNM pourraient représenter un faible pourcentage du PIB mondial en cas d'application d'une stratégie de protection optimale, mais d'autres aspects doivent être pris en compte. Tout d'abord, ces coûts ne seront pas répartis de façon égale, mais pèseront particulièrement lourd sur certaines régions, qui ne sont pas forcément parées pour y faire face. Ensuite, on suppose dans ces estimations qu'une stratégie de protection économiquement « optimale » est suivie ; les difficultés que cela soulève sont analysées dans le chapitre 2. Enfin, les coûts potentiels, et notamment les incidences non marchandes, ne sont pas tous pris en compte dans le modèle.

1.3. Adaptation robuste des zones côtières à la hausse du niveau des mers au XXI^e siècle

Dans les études mondiales examinées ci-dessus, différents scénarios de HNM et socio-économiques ont été appliqués. La méthode générale a consisté dans chacune à évaluer les impacts de la HNM et donc les décisions d'adaptation pour des combinaisons données de scénarios de HNM et socio-économiques. Cette démarche est parfaitement indiquée pour cerner l'éventail des incidences possibles de la HNM et comprendre les coûts et les avantages de l'adaptation dans le cadre d'un scénario donné. Cependant, elle ne correspond pas au cadre de décision qui est celui des responsables de l'aménagement des zones côtières aux niveaux national et infranational, qui eux doivent tenir compte de tous les scénarios.

La nécessité de prendre en compte l'ensemble des scénarios dans les décisions est admise dans les études sur l'adaptation côtière locale, et de nombreux travaux sont consacrés depuis peu à la prise de décision en matière d'adaptation côtière en situation d'« incertitude profonde ». Parmi les approches représentatives figurent la prise de décision robuste (Lempert et Schlesinger, 2001^[45]) et l'analyse des trajectoires d'adaptation (Haasnoot et al., 2013^[46]). Elles se caractérisent par la recherche de solutions qualifiées de « robustes » en ce sens qu'elles remplissent certains critères, comme assurer un niveau donné de protection contre les inondations, dans le cadre d'un échantillon de scénarios couvrant toutes les incertitudes pertinentes. L'étude sur l'estuaire de la Tamise en 2100 (*Thames Estuary 2100*) illustre bien cette approche et d'autres exemples sont présentés dans le chapitre 3.

L'incertitude profonde peut aussi être abordée dans une perspective mondiale, comme le font Lincke et Hinkel dans une première étude faisant appel au modèle DIVA décrit plus haut (Lincke et Hinkel, 2018^[4]). Sur la base des cinq scénarios déjà évoqués qui tablent sur une HNM moyenne mondiale comprise entre 0.3 m et 2.0 m et des cinq SSP (voir Encadré 1.1), les auteurs évaluent pour quelles zones côtières de la planète la protection est une décision économiquement robuste. La méthode est décrite plus en détail dans l'Encadré 1.2.

Encadré 1.2. Application de l'« incertitude profonde » dans le cadre d'une modélisation de la HNM mondiale

Dans leur étude publiée en 2018, Lincke et Hinkel s'appuient sur les cinq scénarios qui tablent sur une hausse du niveau de la mer (HNM) moyenne mondiale comprise entre 0.3 m et 2.0 m au cours du XXI^e siècle et sur les cinq trajectoires socio-économiques partagées (SSP). Ils évaluent pour quelles zones côtières de la planète la protection est une décision économiquement robuste en prenant en considération les 25 combinaisons possibles de HNM et de développement socio-économique, de façon à tenir compte de l'intégralité de la plage d'incertitude correspondant à toutes ces combinaisons. Cela étant, certaines combinaisons HNM-développement socio-économique sont moins susceptibles de devenir réalité (O'Neill et al., 2014^[47]). Les auteurs envisagent également cinq taux d'actualisation allant de 0.0 % à 6.0 %. Les taux d'actualisation constituent un important facteur d'incertitude dans les décisions de gestion des risques d'inondation, surtout à long terme (Hall et Solomatine, 2008^[48] ; Lempert et Schlesinger, 2001^[45]), mais ils ne sont pas abordés dans les études mondiales sur les incidences de la HNM.

Le niveau de protection optimal pour un tronçon de côtes donné dans chaque combinaison de scénarios est déterminé en minimisant la valeur actuelle nette de la somme des coûts de protection et des coûts des dommages résiduels (dommages imputables aux inondations évités). La protection d'un tronçon est considérée comme une décision robuste lorsqu'elle est économiquement souhaitable (c'est-à-dire lorsqu'elle produit une valeur actuelle nette positive) dans tous les scénarios.

Le principal résultat est le degré de robustesse de la décision de protéger un tronçon de côtes donné dans l'ensemble des combinaisons de scénarios possibles. L'étude analyse aussi pour quelle longueur de rivage et quelle exposition des plaines côtières (superficie, population, actifs) la protection est une décision robuste, c'est-à-dire souhaitable dans toutes les combinaisons de scénarios.

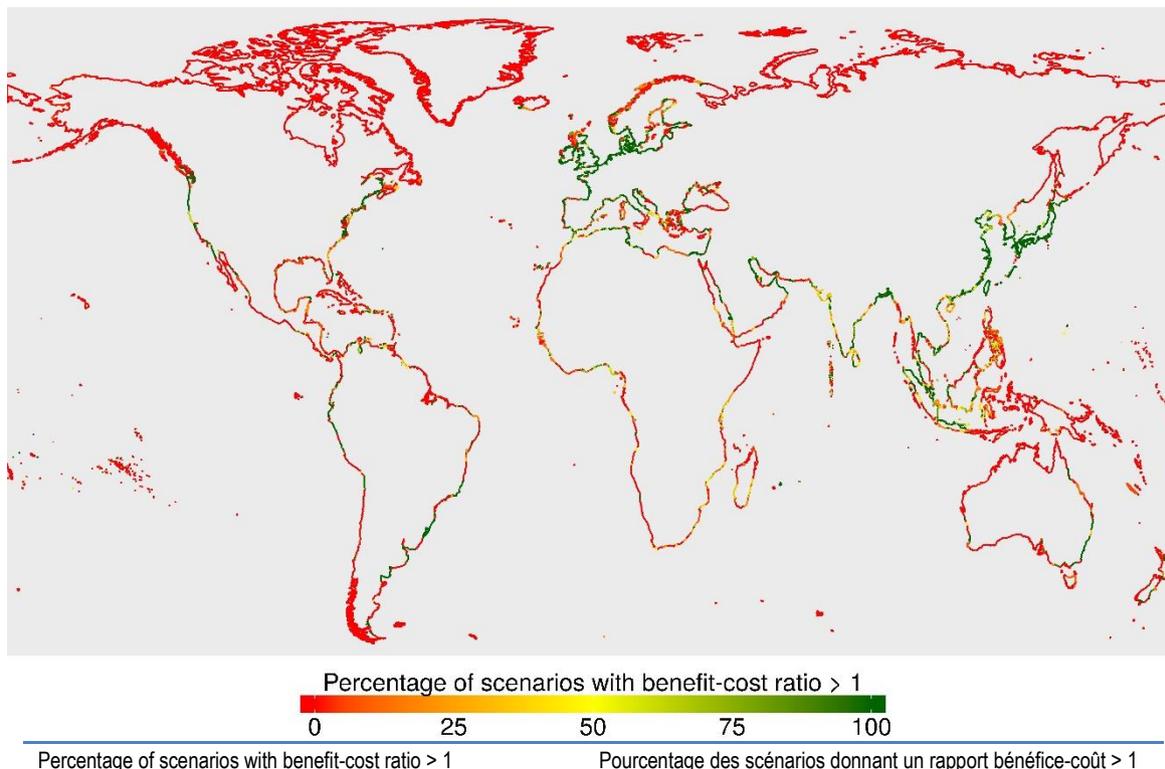
Source : Lincke, D. et J. Hinkel (2018^[4]), « Economically robust protection against 21st century sea-level rise », <http://dx.doi.org/10.1016/J.GLOENVCHA.2018.05.003>.

Les résultats montrent que la protection est une décision économiquement robuste dans toutes les combinaisons de scénarios pour 13 % des côtes de la planète. Ces côtes-là abritent 90 % des populations côtières et 96 % des actifs qui se trouvaient en 2015 dans des plaines inondables en cas d'événement centennal. À l'inverse, pour 65 % des côtes du globe, dont les plaines inondables abritent seulement 0.2 % des populations et une proportion équivalente des actifs, la décision robuste consiste à ne pas les protéger. En ce qui concerne les 22 % restants, la stratégie d'adaptation optimale varie selon les scénarios.

La plupart des côtes pour lesquelles la décision de protection est robuste se trouvent sur la façade est des États-Unis et en Europe, ainsi qu'en Chine, en Corée, au Japon et ailleurs en Asie (Graphique 1.6). Cela tient au fait que, dans ces régions, le littoral est fortement urbanisé et les normes nationales existantes de protection sont élevées. La protection des grandes villes australiennes est également une décision robuste en raison de leur forte densité de population. À l'inverse, en ce qui concerne les longues étendues côtières inhabitées que l'on trouve par exemple ailleurs en Australie, ainsi qu'au Canada, au Chili ou en Norvège, la décision robuste consiste à ne pas les protéger.

Graphique 1.6. Pour quelles zones côtières de la planète la protection constitue-t-elle une décision économiquement robuste ?

Pour les tronçons de zones côtières : pourcentage des scénarios donnant un rapport bénéfice-coût > 1.
Pour les pays : proportion des zones côtières du pays où le rapport bénéfice-coût > 1 dans tous les scénarios étudiés.



Source : Lincke, D. et J. Hinkel (2018^[4]), « Economically robust protection against 21st century sea-level rise », <http://dx.doi.org/10.1016/J.GLOENVCHA.2018.05.003>

En règle générale, pour les pays qui possèdent un littoral très court mais densément peuplé, la protection de l'ensemble des côtes peut constituer une décision robuste. D'après les modélisations effectuées, 18 pays sont dans ce cas, dont deux qui sont membres de l'OCDE (Belgique et Pologne). En revanche, on dénombre 30 pays pour lesquels la décision économiquement robuste consisterait à ne protéger aucune des zones côtières.

Si on examine les différentes combinaisons de scénarios, on constate que la part des côtes protégées est d'autant plus importante que la hausse du niveau des mers est forte, le PIB est élevé et le taux d'actualisation est faible. Par conséquent, elle culmine dans le cadre du scénario de HNM maximale (scénario H++), du scénario socio-économique de richesse maximale et d'un taux d'actualisation nul.

À l'évidence, le taux d'actualisation a une influence significative sur la robustesse d'une décision de protection, qui est plus forte lorsque le taux d'actualisation est bas. Les coûts de protection sont en grande partie imputables aux investissements de départ réalisés vers le début du siècle, alors que les coûts des dommages culminent vers la fin du siècle du fait de la montée du niveau des mers. Par conséquent, un taux d'actualisation élevé réduit davantage la valeur actuelle des coûts des dommages que celle des coûts de protection, rendant la protection moins attrayante économiquement.

En cas de fort développement socio-économique et de HNM élevée, il est économiquement robuste de protéger une plus grande part du littoral. Les coûts des dommages sont plus élevés dans les scénarios de développement socio-économique correspondant à un monde riche que dans ceux qui correspondent à un monde pauvre, car les actifs exposés sont plus nombreux dans le premier cas. Les coûts de protection, eux, ne sont pas influencés par le développement socio-économique. Aussi, la part du littoral protégée sera plus importante dans les scénarios correspondant à un monde riche, car les dommages imputables aux inondations que la protection permet de prévenir sont alors plus élevés. Dans le même ordre d'idées, les scénarios tablant sur une forte HNM débouchent également sur la protection d'une plus grande proportion du littoral, car la HNM fait augmenter plus rapidement les coûts des dommages que les coûts de protection ; en effet, les seconds augmentent linéairement avec la HNM, tandis que les premiers augmentent superlinéairement avec elle.

Enfin, il importe de noter que, dans le cadre de la stratégie d'adaptation fondée sur l'analyse coût-bénéfice et la prise de décision robuste décrite par Lincke et Hinkel (2018_[4]), la part du littoral protégée est nettement inférieure à celle avancée dans les études antérieures qui retenaient d'autres stratégies de protection. Ainsi, selon les calculs de Fankhauser (1995_[35]), dans le contexte d'une HNM comprise entre 0.2 et 2.0 m à l'horizon 2100, quelque 80 % des côtes ouvertes, 98 % des ports et 99 % des villes devaient être protégés dans le cadre d'une stratégie destinée à réduire au minimum les coûts des pertes en terres, des migrations forcées et de la protection au XXI^e siècle. Plus récemment, (Nicholls, Tol et Vafeidis, 2008_[36]) ont estimé entre 50 et 85 % la part des côtes planétaires à protéger dans l'hypothèse d'une HNM allant de 1.0 à 6.0 m d'ici à 2130. À l'inverse, Lincke et Hinkel (2018_[4]) parviennent à la conclusion que seulement 15 % du littoral des États-Unis est à protéger dans toutes les combinaisons de scénarios, et que la protection de 66 % n'est indiquée dans aucune combinaison de scénarios. Si les études antérieures avancent des tronçons de littoral à protéger beaucoup plus longs que Lincke et Hinkel (2018_[4]), c'est parce qu'elles ne permettent pas de déterminer les personnes et actifs exposés avec une résolution infranationale. Lorsqu'une décision de protection est prise à l'échelle d'un pays entier ou d'une région entière, cela conduit à protéger de nombreuses parties des côtes qui ne le seraient pas si on s'en remettait à une approche qui découpe davantage le littoral, car les moyennes nationales ont tendance à faire disparaître les écarts locaux d'exposition.

1.4. Implications pour l'action publique et les travaux de recherche futurs

Il importe de contextualiser les résultats qui précèdent en répétant que les études faisant appel au modèle DIVA (Hinkel et al., 2014_[3] ; Lincke et Hinkel, 2018_[4]), comme d'autres études mondiales évoquées dans ce qui précède, se focalisent sur la protection des zones côtières et n'envisagent pas d'autres formes d'adaptation. Dans le cadre de l'évaluation des incidences produites sur les zones côtières à tous les niveaux, il conviendrait aussi à l'avenir d'étudier d'autres solutions d'adaptation, y compris des mesures d'accommodation et de repli. Même si la prise en compte de ces mesures a peu de chances de modifier fondamentalement le constat général, il pourrait être plus efficace, par endroits, de se retirer du littoral. Par exemple, les pays pour qui, d'après Lincke et Hinkel (2018_[4]), le coût relatif de la HNM est élevé, possèdent tous une population clairsemée, mais principalement établie sur le littoral. Dans ces conditions, même si les infrastructures et les populations sont le cas échéant concentrées dans les zones côtières, les responsables de l'aménagement côtier et les décideurs devraient étudier d'autres solutions d'adaptation peut-être plus économiques que la protection (voir chapitre 2).

En particulier, les résultats mondiaux présentés dans le graphique 1.6 tiennent compte uniquement des ouvrages de protection, alors que d'autres solutions d'adaptation peuvent être plus efficaces et mieux préserver la santé des écosystèmes dans certains endroits. Ces résultats ne doivent pas être interprétés comme un plaidoyer en faveur d'une limitation de la protection aux seules zones où elle est économiquement viable. Ils montrent plutôt, à un niveau très agrégé, que la protection est viable dans le cadre de toute une série de scénarios en divers endroits. Ils fournissent un point de départ aux décideurs et responsables de l'aménagement du littoral dans les pays, à qui il appartient ensuite de décider des mesures d'adaptation, sachant que les paramètres temporels de l'adaptation et le choix de solutions flexibles (c'est-à-dire permettant un retour en arrière ou au contraire un élargissement du dispositif) sont essentiels à l'efficacité de l'adaptation, étant donné les incertitudes entourant les risques futurs dans les zones côtières (voir chapitre 3).

S'agissant des implications de l'analyse qui précède pour l'action des pouvoirs publics, deux points essentiels sont à retenir. Premièrement, au vu des résultats montrant que la décision de protéger la grande majorité des actifs mondiaux situés dans les zones côtières est économiquement robuste, il est probable que les zones côtières connaîtront un avenir contrasté. La grande majorité des habitants du littoral vivent dans des secteurs densément peuplés et continueront vraisemblablement de se protéger même en cas de forte hausse du niveau des mers, car le rapport coût-bénéfice de cette démarche est très favorable. Il y aura toujours des risques résiduels de conséquences catastrophiques en cas de rupture de digues, mais il sera possible de les réduire en construisant des défenses plus vastes et plus solides (De Bruijn, Klijn et Knoeff, 2013^[49]). À cet égard, il est essentiel que les études sur la hausse du niveau des mers tiennent compte de l'adaptation pour donner une image réaliste de l'avenir des zones côtières. Plus que des dommages de grande ampleur, les parties du littoral où sont concentrés les actifs et les populations connaîtront sans doute un renforcement des protections. Il convient aussi de signaler qu'il importera d'étudier des solutions de substitution aux ouvrages de protection, comme les solutions fondées sur la nature, afin d'éviter une amplification des atteintes aux écosystèmes ou la perte de valeurs d'aménité que pourrait entraîner le recours exclusif à de tels ouvrages.

Deuxièmement, une autre implication concerne le financement de l'adaptation des zones côtières. D'après les études mondiales examinées, il est intéressant d'un point de vue économique de protéger quelque 90 % des populations côtières de la planète (Lincke et Hinkel, 2018^[4]). Dans la pratique, le financement et la mise en œuvre de cette protection soulèvent un certain nombre de problèmes qui tiennent au fait qu'elle a un caractère de bien public et que ses avantages sont stochastiques, se manifestent à long terme et sont répartis entre divers bénéficiaires (Bisaro et Hinkel, 2018^[25] ; Bisaro et Hinkel, 2016^[50] ; Moser, Jeffress Williams et Boesch, 2012^[51]) (Bisaro et Hinkel, 2016, 2018 ; Moser et al., 2012). Les enjeux de l'adaptation des zones côtières sur le plan de la gouvernance et du financement sont examinés dans le chapitre 2.

Note

¹ Comme la terminologie employée dans ce rapport a trait à l'adaptation au changement climatique, les définitions peuvent différer légèrement de celles retenues dans d'autres référentiels de risques.

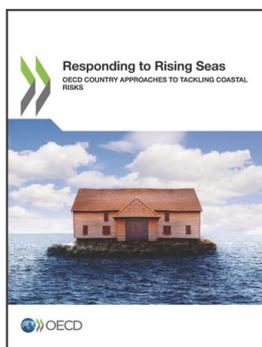
Références

- Abidin, H. et al. (2015), « On correlation between urban development, land subsidence and flooding phenomena in Jakarta », *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences* 370, pp. 15-20. [16]
- Banque mondiale (2010), « The Global Report on the Economics of Adaptation to Climate Change Study ». [15]
- Barbier, E. et al. (2011), « The value of estuarine and coastal ecosystem services », *Ecological Monographs*, vol. 81/2, pp. 169-193, <http://dx.doi.org/10.1890/10-1510.1>. [23]
- Beck, M. et al. (2018), « The global flood protection savings provided by coral reefs », *Nature Communications*, vol. 9/1, p. 2186, <http://dx.doi.org/10.1038/s41467-018-04568-z>. [32]
- Bisaro, A. et J. Hinkel (2018), « Mobilizing private finance for coastal adaptation: A literature review », *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, vol. 9/3, p. e514, <http://dx.doi.org/10.1002/wcc.514>. [25]
- Bisaro, A. et J. Hinkel (2016), « Governance of social dilemmas in climate change adaptation », *Nature Climate Change*, vol. 6/4, pp. 354-359, <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate2936>. [50]
- Church, J. et al. (2001), « Changes in sea level: Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change », dans J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., Linden, P.J. van der, Dai, X., Maskell, K., Johnson, C. (dir. pub.), *Climate Change 2001 : The Scientific Basis*, Cambridge University Press. [21]
- Clark, P. et al. (2016), « Consequences of twenty-first-century policy for multi-millennial climate and sea-level change », *Nature Climate Change*, vol. 6/4, pp. 360-369, <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate2923>. [22]
- De Bruijn, K., F. Klijn et J. Knoeff (2013), *Unbreachable embankments? In pursuit of the most effective stretches for reducing fatality risk*. [49]
- Diaz, D. (2016), « Estimating global damages from sea level rise with the Coastal Impact and Adaptation Model (CIAM) », *Climatic Change*, vol. 137/1-2, pp. 143-156, <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-016-1675-4>. [39]
- Donchyts, G. et al. (2016), « Earth's surface water change over the past 30 years », *Nature Climate Change*. [26]
- Douglas, B., M. Kearney et S. Leatherman (2000), « Sea level rise: History and consequences », Elsevier. [18]
- Ericson, J. et al. (2006), « Effective sea-level rise and deltas: Causes of change and human dimension implications », *Global and Planetary Change*, vol. 50, pp. 63-82, <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2005.07.004>. [12]

- Fankhauser, S. (1995), « Protection versus Retreat: The Economic Costs of Sea-Level Rise », *Environment and Planning A*, vol. 27/2, pp. 299-319, <http://dx.doi.org/10.1068/a270299>. [35]
- Farrell, W. et J. Clark (2007), « On Postglacial Sea Level », *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, vol. 46/3, pp. 647-667, <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.1976.tb01252.x>. [10]
- Fettweis, X. et al. (2013), « Estimating the Greenland ice sheet surface mass balance contribution to future sea level rise using the regional atmospheric climate model MAR », *The Cryosphere*, vol. 7/2, pp. 469-489, <http://dx.doi.org/10.5194/tc-7-469-2013>. [8]
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (2014), « Glossary, Acronyms and Chemical Symbols », dans *Climate Change 2014 Mitigation of Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9781107415416.023>. [1]
- Haasnoot, M. et al. (2013), « Dynamic adaptive policy pathways: A method for crafting robust decisions for a deeply uncertain world », *Global Environmental Change*, vol. 23/2, pp. 485-498, <http://dx.doi.org/10.1016/J.GLOENVCHA.2012.12.006>. [46]
- Hall, J. et D. Solomatine (2008), « A framework for uncertainty analysis in flood risk management decisions », *International Journal of River Basin Management*, vol. 6/2, pp. 85-98, <http://dx.doi.org/10.1080/15715124.2008.9635339>. [48]
- Hanson, S. et al. (2011), « A global ranking of port cities with high exposure to climate extremes », *Climatic Change*, vol. 104/1, pp. 89-111, <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-010-9977-4>. [19]
- Higgins, S. et al. (2013), « Land subsidence at aquaculture facilities in the Yellow River delta, China », *Geophysical Research Letters*, vol. 40, pp. 3898-3902. [17]
- Hinkel, J. et al. (2014), « Coastal flood damage and adaptation costs under 21st century sea-level rise. », *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 111/9, pp. 3292-7, <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1222469111>. [3]
- Hinkel, J. et al. (2014), « Coastal flood damage and adaptation costs under 21st century sea-level rise. », *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 111/9, pp. 3292-7, <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1222469111>. [40]
- Hoegh-Guldberg, O. et al. (2018), *Impacts of 1.5°C global warming on natural and human systems*In: *Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*, GIEC, https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2018/11/SR15_Chapter3_Low_Res.pdf (consulté le 10 décembre 2018). [2]
- Lempert, R. et M. Schlesinger (2001), « Climate-change strategy needs to be robust », *Nature*, vol. 412/6845, pp. 375-375, <http://dx.doi.org/10.1038/35086617>. [45]

- Levermann, A. et al. (2013), « The multimillennial sea-level commitment of global warming. », [20]
Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,
vol. 110/34, pp. 13745-50, <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1219414110>.
- Levermann, A. et al. (2014), « Projecting Antarctic ice discharge using response functions from
SeaRISE ice-sheet models », *Earth System Dynamics*, vol. 5, pp. 271-293,
<http://dx.doi.org/10.5194/esd-5-271-2014>. [9]
- Lincke, D. et J. Hinkel (2018), « Economically robust protection against 21st century sea-level
rise », *Global Environmental Change*, vol. 51, pp. 67-73,
<http://dx.doi.org/10.1016/J.GLOENVCHA.2018.05.003>. [4]
- Liquete, C. et al. (2013), « Assessment of coastal protection as an ecosystem service in Europe », [30]
Ecological Indicators, vol. 30, pp. 205-217, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.02.013>.
- Li, Y. et al. (2013), « Coastal wetland loss and environmental change due to rapid urban [29]
expansion in Lianyungang, Jiangsu, China », *Regional Environmental Change*, vol. 14/3,
pp. 1175-1188, <http://dx.doi.org/10.1007/s10113-013-0552-1>.
- Marzeion, B., A. Jarosch et M. Hofer (2012), « The Cryosphere Past and future sea-level change [7]
from the surface mass balance of glaciers », *The Cryosphere*, vol. 6,
<http://dx.doi.org/10.5194/tc-6-1295-2012>.
- Ma, Z. et al. (2014), « Rethinking China's new great wall. », *Science*, vol. 346, pp. 912-914. [27]
- Mehvar, S. et al. (2018), « Quantifying Economic Value of Coastal Ecosystem Services: A [33]
Review », *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 6/1, p. 5,
<http://dx.doi.org/10.3390/jmse6010005>.
- Moser, S., S. Jeffress Williams et D. Boesch (2012), « Wicked challenges at Land's End: [51]
Managing coastal vulnerability under climate change », *Annual Review of Environment and
Resources*, vol. 37/1, pp. 51-78, <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-environ-021611-135158>.
- Murray, N. et al. (2014), « Tracking the rapid loss of tidal wetlands in the Yellow Sea », [24]
Frontiers in Ecology and the Environment, vol. 12/5, pp. 267-272,
<http://dx.doi.org/10.1890/130260>.
- Nicholls, R. (1995), « Coastal mega-cities and climate change. », *GeoJournal*, vol. 37, pp. 369- [14]
379.
- Nicholls, R. et al. (2013), « Sea-level scenarios for evaluating coastal impacts », [5]
Interdisciplinary Reviews: Climate Change, vol. 5/1, pp. 129-150,
<http://dx.doi.org/10.1002/wcc.253>.
- Nicholls, R. et al. (2011), « Sea-level rise and its possible impacts given a 'beyond 4 C world' in [41]
the twenty-first century », *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical,
Physical and Engineering Sciences*, vol. 369/1934, pp. 161-181,
<http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2010.0291>.

- Nicholls, R., R. Tol et A. Vafeidis (2008), « Global estimates of the impact of a collapse of the West Antarctic ice sheet: An application of FUND », *Climatic Change*, vol. 91/1-2, pp. 171-191, <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-008-9424-y>. [36]
- O'Neill, B. et al. (2014), « A new scenario framework for climate change research: The concept of shared socioeconomic pathways », *Climatic Change*, vol. 122, pp. 387-400, <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0905-2>. [47]
- Perrette, M. et al. (2013), « A scaling approach to project regional sea level rise and its uncertainties », *Earth System Dynamics*, vol. 4/1, pp. 11-29, <http://dx.doi.org/10.5194/esd-4-11-2013>. [11]
- Spalding, M. et al. (2014), « The role of ecosystems in coastal protection: Adapting to climate change and coastal hazards », *Ocean & Coastal Management*, vol. 90, pp. 50-57, <http://dx.doi.org/10.1016/J.OCECOAMAN.2013.09.007>. [31]
- Spencer, T. et al. (2016), « Global coastal wetland change under sea-level rise and related stresses: The DIVA Wetland Change Model », *Global and Planetary Change*, vol. 139, pp. 15-30. [34]
- Sugiyama, M., R. Nicholls et A. Vafeidis (2008), « Estimating the Economic Cost of Sea-Level Rise », <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/41522> (consulté le 29 novembre 2018). [37]
- Taylor, K. et al. (2012), « An Overview of CMIP5 and the Experiment Design », *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 93/4, pp. 485-498, <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>. [6]
- Tol, R. (2002), « Estimates of the damage costs of climate change. Part 1: Benchmark estimates », *Environmental and Resource Economics*, vol. 21/1, pp. 47-72, <https://doi.org/10.1023/A:1014500930521>. [44]
- Vafeidis, A. (2008), « A new global coastal database for impact and vulnerability analysis to sea-level rise », *J. Coast. Res.*, <http://dx.doi.org/10.2112/06-0725.1>. [42]
- Vafeidis, A. et al. (2008), « A New Global Coastal Database for Impact and Vulnerability Analysis to Sea-Level Rise », *Journal of Coastal Research*, vol. 244/4, pp. 917-924, <http://dx.doi.org/10.2112/06-0725.1>. [43]
- Wong, P. et al. (2014), *Coastal Systems and Low-Lying Areas*, GIEC, https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/WGIIAR5-Chap5_FINAL.pdf (consulté le 17 août 2017). [28]
- Woodroffe, C. et al. (2006), « Landscape variability and the response of Asian megadeltas to environmental change », *Global Change and Integrated Coastal Management*, pp. 277-314. [13]
- Yohe, G., J. Neumann et H. Ameden (1995), « Assessing the Economic Cost of Greenhouse-Induced Sea Level Rise: Methods and Application in Support of a National Survey », *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 29/3, pp. S78-S97, <http://dx.doi.org/10.1006/jeem.1995.1062>. [38]



Extrait de :

Responding to Rising Seas

OECD Country Approaches to Tackling Coastal Risks

Accéder à cette publication :

<https://doi.org/10.1787/9789264312487-en>

Merci de citer ce chapitre comme suit :

OCDE (2019), « Les zones côtières face à la montée des risques », dans *Responding to Rising Seas : OECD Country Approaches to Tackling Coastal Risks*, Éditions OCDE, Paris.

DOI: <https://doi.org/10.1787/15e0af5e-fr>

Cet ouvrage est publié sous la responsabilité du Secrétaire général de l'OCDE. Les opinions et les arguments exprimés ici ne reflètent pas nécessairement les vues officielles des pays membres de l'OCDE.

Ce document, ainsi que les données et cartes qu'il peut comprendre, sont sans préjudice du statut de tout territoire, de la souveraineté s'exerçant sur ce dernier, du tracé des frontières et limites internationales, et du nom de tout territoire, ville ou région. Des extraits de publications sont susceptibles de faire l'objet d'avertissements supplémentaires, qui sont inclus dans la version complète de la publication, disponible sous le lien fourni à cet effet.

L'utilisation de ce contenu, qu'il soit numérique ou imprimé, est régie par les conditions d'utilisation suivantes :

<http://www.oecd.org/fr/conditionsdutilisation>.