



PIANC

L'association mondiale pour les infrastructures
de transport maritimes et fluviales

Gérer les incertitudes liées au changement climatique dans la sélection, la conception et l'évaluation des options pour des infrastructures de navigation résilientes



Groupe de travail permanent sur le changement climatique

Note technique n° 1 - 2022

NOTE TECHNIQUE N° 1

GROUPE DE TRAVAIL PERMANENT SUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

Gérer les incertitudes liées au changement climatique dans la sélection, la conception et l'évaluation des options pour des infrastructures de navigation résilientes

L'AIPCN compte des commissions techniques qui s'occupent des voies navigables et des ports intérieurs (InCom), de la navigation côtière et océanique (y compris les ports maritimes) (MarCom), des aspects environnementaux (EnviCom) et de la navigation sportive et de plaisance (RecCom).

Cette note technique a été produite par le Groupe de Travail Permanent sur le Changement Climatique (PTGCC), un groupe d'experts de l'AIPCN, représentant plusieurs pays et des organisations de parties prenantes.

L'objectif de cette note est de fournir des informations et des recommandations sur les bonnes pratiques. La conformité à cette note n'est pas obligatoire et il convient de faire preuve de discernement dans son application, notamment dans des circonstances particulières. La note doit être considérée comme un guide d'experts et un état de l'art sur ce sujet particulier. L'AIPCN décline toute responsabilité dans le cas où elle serait présentée comme une norme officielle.

SIÈGE DE L'AIPCN
Boulevard du Roi Albert II 20 B. 3
1000 Bruxelles | Belgique

<http://www.pianc.org> <http://aipcn.fr>

VAT BE 408-287-945

ISBN 978-2-87223-016-7

Tous droits réservés

CONTENU

RÉSUMÉ	5
REMERCIEMENTS	5
GLOSSAIRE	6
1 INTRODUCTION	8
2 UTILISER DES SCÉNARIOS POUR COMPRENDRE L'EVENTAIL DES FUTURS CLIMATIQUES POSSIBLES	8
2.1 CARACTÉRISTIQUES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE.....	8
2.2 SELECTION DES SCENARIOS DE CHANGEMENT CLIMATIQUE.....	12
2.3 SCÉNARIOS IMPROBABLES MAIS PLAUSIBLES.....	13
2.4 UTILISATION DE CONDITIONS REPRÉSENTATIVES	14
3 SE PRÉPARER AU SANS PRÉCÉDENT	16
4 ADOPTER DES SOLUTIONS ADAPTATIVES ET FLEXIBLES	18
5 ENVISAGER DES OPTIONS D'ADAPTATION ET DE RESILIENCE STRUCTURELLES ET NON STRUCTURELLES	20
6 UTILISER LES DONNEES DE SUIVI POUR ECLAIRER LA PRISE DE DECISION	24
7 CHOISIR DES METHODES D'EVALUATION QUI RECONNAISSENT ET PRENNENT EN COMPTE L'INCERTITUDE	24
8 MESSAGES CLÉS	26
8.1 COMPRENDRE LES INCERTITUDES DES DONNEES CLIMATIQUES	26
8.2 SELECTION ET APPLICATION DES SCENARIOS DE CHANGEMENT CLIMATIQUE.....	26
8.3 RECHERCHE DE SOLUTIONS ADAPTATIVES	27
8.4 PRISE EN COMPTE DES COMPLEXITES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS L'EVALUATION DES OPTIONS	27
8.5 FOURNIR DES SOLUTIONS RÉSILIENTES.....	27
9 RÉFÉRENCES	28

RÉSUMÉ

Le changement climatique est désormais généralisé, rapide et s'intensifie [GIEC, 2021]. Les impacts varieront selon les régions, mais pour certains ports et voies navigables, les changements induits par le climat auront une importance fondamentale, voire existentielle. Cependant, de nombreuses incertitudes subsistent, notamment en ce qui concerne la vitesse à laquelle se produiront les changements de température, de précipitations, de niveau de la mer, de vent, de vagues et de processus physiques associés ; leur ampleur et l'éventualité de franchissement de seuils critiques.

Ces incertitudes ont des implications pour tous ceux qui participent à la conception, à l'évaluation et à l'investissement dans les infrastructures de navigation, y compris l'entretien et la modification des ouvrages existants. Le changement climatique accentue les incertitudes existantes et en introduit de nouvelles.

Afin de gérer les risques liés aux incertitudes du changement climatique et notamment d'éviter les conséquences involontaires appelées "maladaptation", cette note technique de l'AIPCN explique comment les concepteurs, les financeurs et les maîtres d'ouvrage peuvent réduire les risques liés au changement climatique, en :

- se référant à une série de **scénarios** de changement climatique pour comprendre la variation entre les différentes projections climatiques pertinentes pour le site du projet,
- réduisant la dépendance à l'égard de l'utilisation de **données passées** pour prédire des événements futurs à faible probabilité,
- envisageant des scénarios **improbables mais plausibles** lors d'investissements majeurs à long terme,
- en se préparant à des événements **sans précédent**, y compris avec des **occurrences conjointes** et des **défaillances en cascade**,
- adoptant des **solutions adaptatives** et **flexibles** ; envisageant des interventions **non structurelles** (par exemple opérationnelles, institutionnelles) ainsi que **structurelles** ; explorant les "**options sans regret**",
- utilisant le **suivi** pour éclairer la prise de décision (gestion adaptative),
- sélectionnant des **méthodes d'évaluation** qui reconnaissent et prennent en compte l'incertitude.

REMERCIEMENTS

Cette note technique a été préparée par Jan Brooke (présidente du PTGCC) et Laure Herbert (représentante des jeunes professionnels de la section française du PTGCC) avec le soutien et la contribution des membres du PTGCC: Monica A. Altamirano, Oivind Arntsen, Katherine Chambers, Ron Cox, Travis Dahl, Renske De Winter, Jeremy Giovando, Olli Holm, Brian Joyner, Ingrid Lambert, Enrico Lucca, Kate Panayotou et Daan Rijks.

Les membres du PTGCC expriment également leur gratitude aux relecteurs des commissions techniques de l'AIPCN (EnviCom, InCom, MarCom et RecCom) et de la section française de l'AIPCN, ainsi qu'à nos relecteurs externes Tim Fox, consultant indépendant, et Lena Lankenau, membre du GT 178.

Merci également au siège de l'AIPCN pour l'édition finale et la publication de cette note technique. Merci à la section française qui a confié à Paul Scherrer, à Geoffroy Caude et à Laure Herbert la traduction en français de cette note technique.

GLOSSAIRE

Les Trajectoires d'adaptation: comprennent des routes alternatives vers un objectif défini, ou des directions générales de changement pour différents résultats stratégiques. Elles peuvent être centrées sur des seuils de performance ou des objectifs de transformation. Les trajectoires *d'adaptation définissent* des séquences d'actions (mesures, modifications, investissements, etc.) qui peuvent être mises en œuvre progressivement, en fonction de l'évolution de l'avenir et du développement des connaissances. Elles répondent particulièrement bien aux besoins d'adaptation au changement climatique, car leur réalisation est fondée sur le suivi des résultats et l'apprentissage.

Capacité d'adaptation: décrit l'aptitude (la capacité) à s'adapter aux changements futurs, à éviter des dommages potentiels, à tirer parti des opportunités, à gérer les risques supplémentaires ou à répondre aux conséquences. Les systèmes ou les ouvrages dotés d'une *capacité d'adaptation* élevée peuvent être reconfigurés sans que les fonctions essentielles ne subissent de changements significatifs (déclins ou pertes).

Prête à s'adapter : décrit une infrastructure capable d'être modifiée à l'avenir en fonction de l'évolution des conditions ; les incertitudes sont généralement prises en compte par l'introduction d'une plus grande flexibilité et d'une *capacité d'adaptation*.

Défaillances en cascade : elles se produisent dans des systèmes et sous-systèmes naturels et socio-économiques complexes et interconnectés lorsque de multiples risques climatiques se produisent simultanément ou que des risques climatiques et non climatiques interagissent, provoquant des réactions en chaîne qui peuvent s'étendre à plusieurs secteurs ou au-delà du lieu de la vulnérabilité initiale, voire les deux [GIEC, 2022]. Par exemple, les interruptions dues à une météo violente prolongée affectant les opérations portuaires peuvent rapidement dégénérer en problèmes de chaîne d'approvisionnement, avec un impact potentiel sur les plus pauvres de la société. Une prise en compte inadéquate des *défaillances en cascade* peut entraîner des lacunes dans la planification de l'adaptation.

Seuils critiques : au sens de la présente note technique, ils sont définis comme des seuils au-delà desquels un ouvrage ou une opération subit de graves dommages ou perturbations, devenant dans certains cas non viable. Certains de ces changements peuvent être irréversibles. Les seuils critiques doivent être déterminés à l'aide d'un processus analytique tenant compte de considérations systémiques lorsque des effets en cascade sont possibles.

Incertitude profonde : elle existe lorsque les parties prenantes à une décision ne savent pas, ou ne peuvent pas se mettre d'accord sur le modèle de système qui relie l'action aux conséquences, sur les distributions de probabilité à placer aux entrées de ces modèles, sur les conséquences à prendre en compte et/ou sur leur importance relative. Dans le contexte du changement climatique, il peut s'agir d'une connaissance ou d'une compréhension scientifique insuffisante. L'incertitude profonde affecte souvent des décisions qui sont prises au fil du temps, en interaction dynamique avec le système.

<https://www.deepuncertainty.org/>

Approches d'ensemble ; les projections climatiques impliquent généralement l'utilisation d'un groupe de modèles climatiques différents, mais reconnus, pour fournir une gamme de simulations, plutôt que de s'appuyer sur les résultats d'un seul modèle. Étant donné que les différents modèles décrivent les processus climatiques de différentes manières, le fait de se référer à une combinaison de résultats pour définir une dispersion (et une moyenne) *d'ensemble* peut contribuer à garantir que tous les risques potentiels sont évalués. Les approches *d'ensemble* sont particulièrement pertinentes pour les projets à grande échelle ou à long terme dans des domaines où les projections donnent des résultats très variés.

Mauvaise adaptation ou "maladaptation" : désigne une action, ou une inaction, qui entraîne un risque accru de résultats négatifs liés au climat, tels qu'une vulnérabilité accrue, une augmentation des émissions de gaz à effet de serre ou une diminution du bien-être. Un exemple de *maladaptation des infrastructures* est une situation dans laquelle une réponse inadéquate ou inappropriée à un changement anticipé d'un paramètre lié au climat entraîne une conception insuffisante ou excessive d'un ouvrage, ce qui donne lieu à un *ouvrage obsolète ce qui revient à dire* que (une partie de)

l'investissement est gaspillé. Un autre cas est celui où une solution non flexible (par exemple, une conception qui ne peut pas être modifiée si les variables liées au climat n'évoluent pas de la manière initialement prévue) entraîne une augmentation de la vulnérabilité ou une réduction du bien-être physique ou matériel au fil du temps [rapport AIPCN 178-2020]. La maladaptation peut également se produire parce qu'une décision n'a pas pris en compte le contexte plus large du système, y compris dans ses dimensions spatiale ou temporelle. Les interventions qui augmentent la vulnérabilité à un autre endroit ou d'un autre secteur sont également considérées comme une *mauvaise adaptation* [Noble et al., 2014]. La *maladaptation* est généralement une conséquence involontaire [GIEC, 2022].

Solutions fondées sur la nature: l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN, <https://www.iucn.org/>) les définit comme des actions de protection, de gestion durable et de restauration d'écosystèmes naturels ou modifiés, qui permettent de relever les défis sociétaux de manière efficace et adaptable, tout en offrant des avantages en termes de bien-être humain et de biodiversité. Dans un contexte de changement climatique, les solutions fondées sur la nature peuvent contribuer à la capture et à la rétention du dioxyde de carbone dans des écosystèmes tels que les habitats marins et côtiers qui agissent comme des puits de carbone ("carbone bleu"). Elles peuvent également consister à améliorer et à exploiter la fonction naturelle d'écosystèmes sains (marais, mangroves et autres zones humides), notamment en tant que tampons contre l'énergie des vagues, offrant une résistance naturelle à l'élévation du niveau de la mer et aux tempêtes.

Solutions sans regret (ou à faible regret): elles offrent (certains) avantages dans tous les scénarios climatiques prévisibles, y compris le climat actuel. Les avantages de ces solutions se concrétiseront donc indépendamment de l'évolution dans le temps des paramètres climatiques ou des processus associés et de leur rapidité.

Résilience: désigne la capacité d'une infrastructure, d'une opération ou d'un système à faire face à un événement dangereux, une tendance ou une perturbation [GIEC, 2022]; à anticiper et à planifier de telles éventualités; à résister aux pertes et/ou à absorber l'impact des perturbations; à se rétablir rapidement par la suite; et à s'adapter aux facteurs de stress à court et à long terme, aux conditions changeantes et aux contraintes aussi rapidement que possible. Dans les systèmes naturels, la résilience permet de maintenir la structure et les fonctions essentielles des écosystèmes tout en conservant une *capacité d'adaptation*.

Mise à niveau (rétrofit): action d'ajouter ou d'installer quelque chose (par exemple, une pièce, une technologie ou une caractéristique nouvelle ou modifiée) à un ouvrage existant qui n'était pas disponible ou qui n'était pas considéré comme nécessaire au moment de sa construction ou de sa fabrication.

Changements à évolution lente: ils apparaissent et se produisent progressivement, sur une période de plusieurs années, voire de plusieurs décennies. En termes de changement climatique, les événements à évolution lente comprennent l'augmentation des températures et les processus physiques associés, le recul des glaciers et les impacts associés, l'élévation du niveau de la mer, l'acidification des océans et la salinisation.

Infrastructure obsolète (stranded asset): désigne une infrastructure qui doit être abandonnée, qui subit une dévaluation ou qui devient un passif (par exemple, parce qu'il nécessite une conversion ou une modification imprévue ou parce qu'il ne peut plus remplir sa fonction). Cela peut se produire si sa conception n'a pas tenu compte des incertitudes liées aux conditions futures possibles (ou à l'éventail de celles-ci) en raison du changement climatique.

Point de basculement: en science du climat [GIEC, 2021], cette notion désigne un *seuil critique* du système climatique au-delà duquel ce système se réorganise, souvent de manière abrupte et/ou irréversible. En ce qui concerne l'adaptation au changement climatique, un *point de basculement* existe au moment (ou dans les conditions) où les fonctions vitales ne peuvent plus être assurées (par exemple, un bien, une activité ou une opération n'est plus physiquement ou économiquement durable).

Changement évolutif ou disruptif: réponse à un défi fondamental ou existentiel, par exemple lorsqu'un *seuil critique* est dépassé et que les changements progressifs ne sont plus efficaces ou durables.

1 INTRODUCTION

Le changement climatique accentue les incertitudes existantes et en introduit de nouvelles, parmi lesquelles les incertitudes relatives aux scénarios d'émissions, celles liées aux projections des différents modèles climatiques globaux (MCG)¹ et les difficultés à distinguer la variabilité naturelle du climat du changement climatique.

Les processus de sélection des options, de conception et d'évaluation doivent pouvoir reconnaître et prendre en compte ces incertitudes pour permettre une conception sûre et rentable tout en évitant une maladaptation. Cette note technique explore les bonnes pratiques actuelles et offre quelques pistes sur la manière dont les incertitudes liées au changement climatique peuvent être gérées pour réduire les risques lors de la conception et de l'exploitation des infrastructures de navigation.

La note vise à fournir une approche pratique pour permettre une prise de décision éclairée et faciliter la réalisation de conceptions et d'opérations plus résilientes et moins sujettes aux défaillances, dommages ou temps d'arrêt catastrophiques. Le contenu de la note est donc pertinent non seulement pour les concepteurs d'infrastructures ou les maîtres d'ouvrage, mais aussi pour ceux qui autorisent, financent, assurent ou exploitent ces ouvrages.

2 UTILISER DES SCÉNARIOS POUR COMPRENDRE L'EVENTAIL DES FUTURS CLIMATIQUES POSSIBLES

2.1 Caractéristiques du changement climatique

En dépit des preuves scientifiques de plus en plus nombreuses, de nombreuses incertitudes subsistent, notamment en ce qui concerne la *rapidité des* changements induits par le climat, leur *ampleur* et la question de savoir si, *quand* et à quelle fréquence des seuils critiques seront franchis. Les modèles qui simulent les changements du climat se sont considérablement améliorés ces dernières années, mais il reste des imprécisions inhérentes. Ces problèmes peuvent affecter la résolution, l'échelle et les niveaux de détail des modèles, leur représentation de certains processus et leur capacité de simulation, notamment en cas de réactions retardées, de points de basculement potentiels ou d'effets non linéaires. En outre, comme les effets du changement climatique varient selon les régions, les données mondiales doivent être transformées en modèles régionaux.

Outre les incertitudes liées aux modèles climatiques, il y a aussi:

- des incertitudes au niveau mondial quant à l'efficacité des mesures de réduction des émissions de gaz à effet de serre, et des questions sur la manière et le moment où ces mesures seront mises en œuvre,
- des inconnues concernant les changements socio-économiques et environnementaux qui pourraient survenir entre-temps, tant au niveau local qu'au niveau du système.

Le GIEC (2022) confirme que l'ampleur et le rythme du changement climatique et des risques associés dépendent fortement des mesures d'atténuation et d'adaptation à court terme. Les effets néfastes prévus et les pertes et dommages qui en découlent s'intensifient avec chaque augmentation du réchauffement de la planète.

¹ Bien que les modèles climatiques globaux (MCG) soient fondés sur des processus physiques, chaque MCG a une résolution spatiale finie. Le paramétrage des processus à des échelles plus petites que la résolution du modèle est donc nécessaire pour intégrer l'effet de ces processus et ce paramétrage est différent pour chaque MCG. Par conséquent, les MCG forcés avec le même scénario d'émission produiront des résultats différents [De Winter, 2014].

Ces incertitudes importantes (ou "incertitudes profondes", voir V.A.W.J. Marchau et al. (2019)) signifient que l'on ne sait toujours pas exactement dans quelle mesure et à quelle vitesse les températures vont augmenter jusqu'en 2050 et surtout au-delà, et s'il y aura des différences locales importantes.

La figure 1 ci-dessous illustre cette incertitude. Selon les différents "profils représentatifs des concentrations" (RCP)² du rapport AR5 du Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'évolution du climat (GIEC)³, les projections de température⁴ varient considérablement à partir de 2030 et surtout après 2050, entre le scénario RCP 2.6 à faibles émissions et le scénario RCP 8.5 à croissance continue des émissions⁵. En 2020, Schwalm et al. ont indiqué que les émissions cumulées de CO₂ suivaient le scénario RCP 8.5. Le PNUE (2020) a également conclu que, sans une augmentation significative des ambitions politiques, le réchauffement est en passe d'atteindre une augmentation de 3,4 à 3,9°C par rapport aux niveaux préindustriels d'ici la fin du siècle. Malgré les progrès réalisés et les accords conclus lors de la COP 26 en 2021⁶, il est clair que la trajectoire d'évolution des températures globales se situe aujourd'hui au-delà des 2° C prévus par l'accord de Paris.

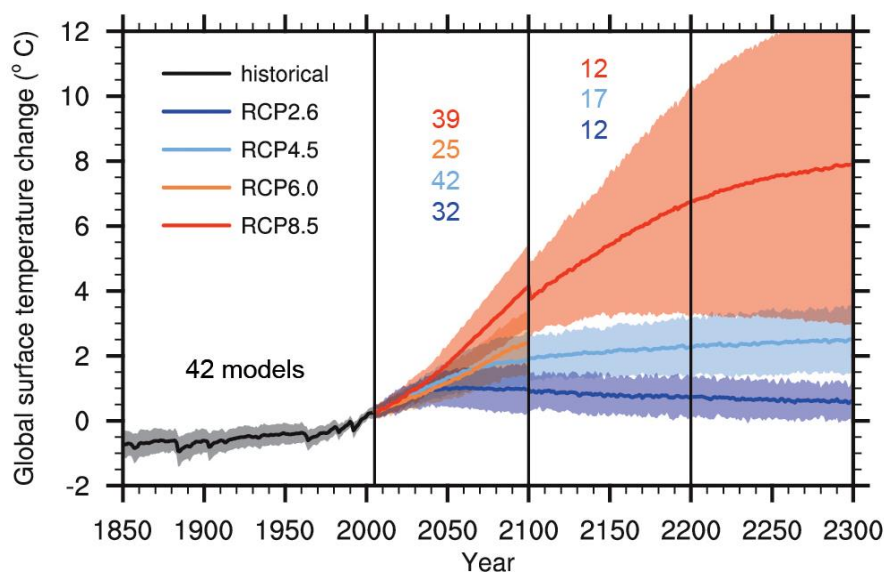


Figure 1: Projections de l'évolution de la température de surface globale selon le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat.⁷

² Sous réserve de la note de bas de page ci-dessous, les scénarios de changement climatique les plus largement utilisés restent ceux basés sur les scénarios d'évolution de concentration de gaz à effet de serre (GES) qui correspondent aux "profils représentatifs des concentrations" (RCP) élaborées par le GIEC. Quatre trajectoires décrivent quatre futurs climatiques différents, en fonction des quantités de GES émises dans les années à venir [GIEC, 2013]. Les RCP sont étiquetés en fonction d'une gamme de valeurs de forçage radiatif anthropique pour l'année 2100 (2,6, 4,5, 6,0 et 8,5 W/m² respectivement):

- RCP 2.6 est une trajectoire d'émissions conduisant à des niveaux de concentration de GES très faibles.
- RCP 4.5 est un scénario de stabilisation dans lequel les émissions anthropiques de CO₂ atteignent leur maximum en 2040 [Meinshausen et al., 2011].
- RCP 6.0 est un scénario de stabilisation dans lequel les émissions anthropiques de CO₂ atteignent leur maximum vers 2080 [Meinshausen et al., 2011].
- Le scénario RCP 8.5 représente une trajectoire où les émissions de GES continuent d'augmenter au fil du temps.

³ Le rapport AR6 du GIEC (2021), plus récent, utilise des processus et une terminologie différents pour décrire les scénarios, mais le résultat final est le même: des incertitudes importantes subsistent et il est recommandé d'envisager une série de scénarios.

⁴ Lorsqu'on se réfère aux changements futurs anticipés des paramètres et processus liés au climat, on utilise le terme "projection" plutôt que "prédiction". Les prédictions (c'est-à-dire les déclarations probabilistes selon lesquelles quelque chose va se produire sur la base de ce que l'on sait aujourd'hui) peuvent être utilisées pour les prévisions météorologiques, par exemple, mais la projection du climat futur est différente des prévisions météorologiques en raison des diverses incertitudes abordées dans ce document.

⁵ Le RCP 6.0 est représenté sur la figure 1 ci-dessus jusqu'en 2100 uniquement; les bandes de projections de la figure 1 délimitent des probabilités de dépassement de 5 % à 95 %.

⁶ <https://ukcop26.org/wp-content/uploads/2021/11/COP26-Presidency-Outcomes-The-Climate-Pact.pdf>

⁷ Pour plus d'explications, voir https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter12_FINAL.pdf [Collins et al., 2013].

Les changements de température de l'air et de l'eau influencent directement ou indirectement de nombreux autres paramètres et processus physiques potentiellement pertinents pour ceux qui conçoivent ou exploitent les infrastructures de navigation⁸. Il s'agit notamment des changements dans les précipitations, le niveau moyen de la mer, les conditions de vent, la chimie de l'eau et, en retour, les caractéristiques des vagues, la glace et le givre, le brouillard, la dynamique des sédiments, la propagation des vagues, le débit des rivières, les inondations (par ruissellement ou fluviales), les submersions côtières, les charges du vent, l'intrusion saline, la corrosion, etc. Il y aura également des changements dans les caractéristiques biologiques associées. Les changements dans les caractéristiques des précipitations (intensité, distribution et totaux saisonniers ou annuels) seront de la plus haute importance pour de nombreuses voies navigables. L'élévation du niveau de la mer, ainsi que les changements dans les caractéristiques des tempêtes, notamment le vent, les vagues et les surcotes de tempête, auront un impact sur les ports et le transport maritime. Si l'on veut éviter toute maladaptation, il convient de prendre en compte la température de l'air et de l'eau *en tant que telle* ainsi que l'ensemble de tous les effets potentiels du changement climatique.

On peut s'attendre à des niveaux et des combinaisons de changement variables. Les différences régionales ainsi que les vitesses de changement variables peuvent être significatives pour les paramètres et processus concernés. En voici quelques exemples:

- (i) Changements progressifs (ou "à évolution lente") de la température de l'air ambiant et de l'eau, du niveau de la mer, du régime des précipitations saisonnières et de facteurs similaires affectant les opérations quotidiennes [CCNUCC convention cadre des Nations-Unies sur les changements climatiques, 2012].
- (ii) Augmentation, dans de nombreuses régions, de la fréquence et de l'intensité prévues des conditions hydro-météorologiques ou océanographiques extrêmes [GIEC, 2012].
- (iii) La combinaison de ces changements, par exemple une surcote de tempête, des précipitations intenses et une marée de vive-eau (c'est-à-dire associée à une nouvelle ou pleine lune), le tout superposé à une augmentation du niveau de la mer.

Les nombreuses interrelations et les effets consécutifs, y compris le potentiel de changements au niveau d'un système (comme la disparition des glaciers dans les zones montagneuses), signifient qu'il existe une incertitude inévitable quant au taux et à l'ampleur du changement pour un large éventail de paramètres de conception et d'exploitation.

Figure 2 illustre la manière dont les différents aspects de l'infrastructure de navigation pourraient être affectés par les changements des paramètres et processus liés au climat.

⁸ Outre les projections du changement climatique mondial, par exemple disponibles auprès du GIEC <https://www.ipcc.ch/> ou de la Banque mondiale <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/>, un large éventail de ressources régionales ou nationales sont disponibles pour aider à comprendre la gamme des conditions climatiques futures. Parmi les exemples d'outils pouvant être utilisés pour quantifier la gamme d'incertitudes, citons en particulier le Corps des ingénieurs de l'armée américaine (https://www.usace.army.mil/corpsclimate/Public_Tools_Dev_by_USACE/), le MetOffice britannique (<https://www.metoffice.gov.uk/research/approach/collaboration/ukcp/download-data>) et l'outil norvégien d'élévation relative du niveau de la mer (<https://www.kartverket.no/en/at-sea/se-havniva/se-havniva-i-kart>).

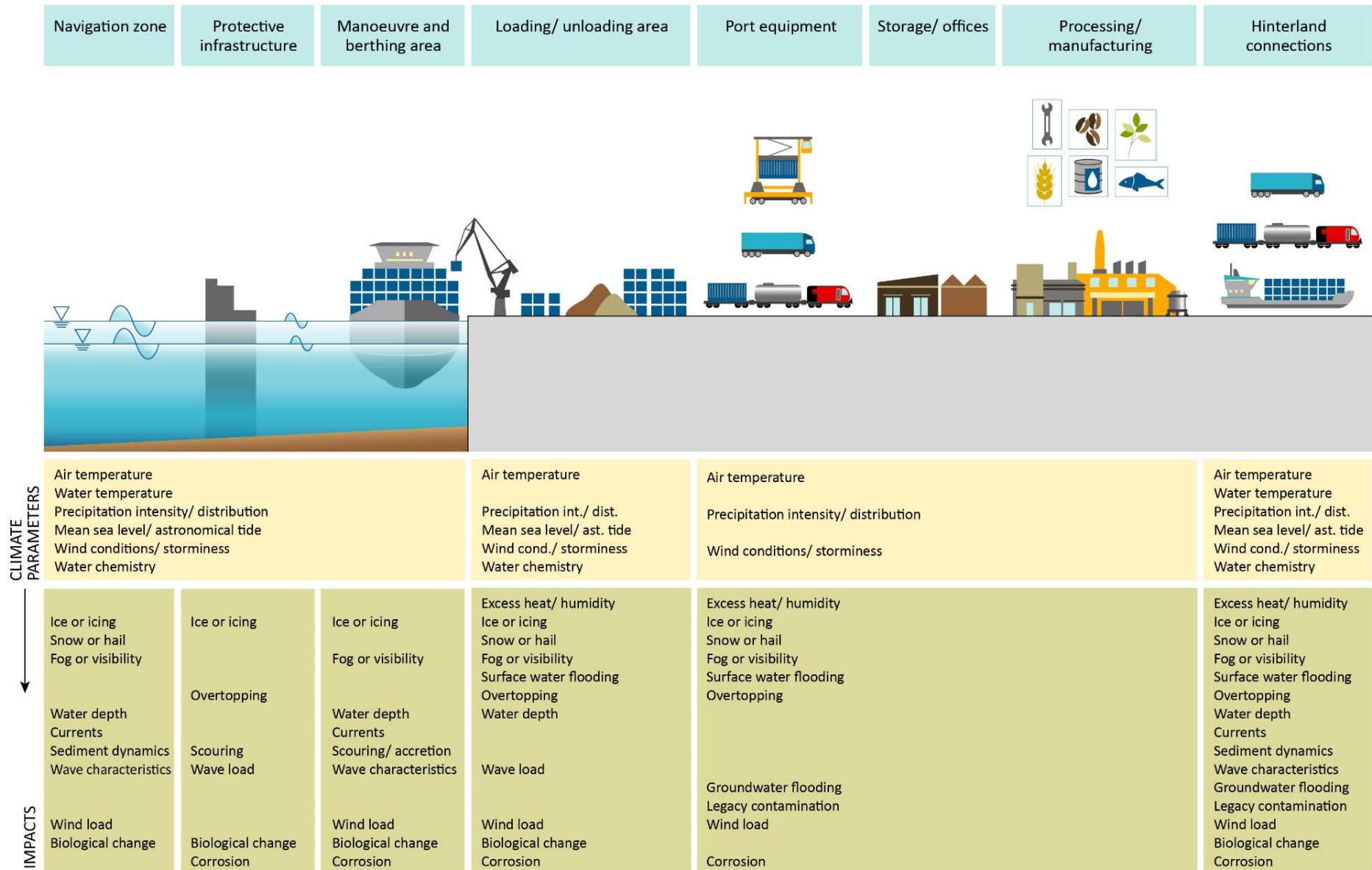


Figure 2 relations entre paramètres climatiques et leurs impacts sur les infrastructures/opérations portuaires (d'après le rapport AIPCN 178-2020)

2.2 Sélection des Scénarios de Changement Climatique

La Figure 1 montre que les RCP (profils représentatifs de concentration) et les changements associés de la température moyenne à la surface du globe sont indiscernables à court terme (jusqu'à 10 ans). Jusqu'en 2050 (c'est-à-dire environ 30 ans à partir de la date de préparation de la présente note technique), les trajectoires présentent une variation limitée, mais les différents scénarios divergent sensiblement à partir de 2050 environ.

Les écarts par rapport aux tendances historiques induits par le changement climatique peuvent donc représenter un défi important pour assurer la résilience des infrastructures ou des opérations dont la durée de vie nominale ou opérationnelle est supérieure à 10 ans [rapport AIPCN 178-2020]. C'est particulièrement le cas, lorsque, comme c'est souvent la norme, les données historiques sont utilisées pour prédire les conditions futures auxquelles les infrastructures portuaires, fluviales ou de protection côtière seront exposées pendant de nombreuses décennies.

L'exploration d'une série de scénarios de changement climatique (adaptés au lieu et à l'échelle) au cours des processus de planification et de conception permet de tester la sensibilité et la tolérance d'un ouvrage ou d'une opération aux climats futurs possibles. Il est important d'éviter les décisions qui enferment l'investisseur ou le maître d'ouvrage dans un seul scénario de changement climatique prédéterminé ou "présumé", et donc dans des risques d'investissement potentiellement importants (c'est-à-dire une éventuelle maladaptation).

Les exemples suivants illustrent des situations susceptibles de conduire à une maladaptation et indiquent comment les risques associés peuvent être minimisés et atténués:

- Un changement dans les précipitations saisonnières pourrait conduire à l'inondation de la route d'accès à d'une nouvelle installation de stockage envisagée, suite à une montée des eaux de surface ou de rivières. Si l'on ne considère qu'un seul scénario de changement climatique, le risque d'inondation pourrait être jugé acceptable. Toutefois, cette conclusion pourrait changer lorsque l'on examine une série de scénarios différents, si d'autres scénarios montrent des inondations plus fréquentes. Bien que l'on ne sache pas quel scénario de changement climatique se produira réellement, l'évaluation des autres scénarios pourrait amener le promoteur du projet à étudier d'autres emplacements, soit pour la voie d'accès, soit pour la nouvelle installation elle-même.
- Si un seul scénario de changement du niveau de la mer est évalué (par exemple, en supposant que le niveau moyen de la mer augmentera de 0,2 m au cours des 30 prochaines années), la hauteur d'un mur de quai sera fixée en conséquence. L'examen d'une série de scénarios de changement du niveau de la mer - au lieu du seul scénario jugé très probable - peut montrer qu'il est plus rentable de construire un mur légèrement plus haut maintenant pour faire face à une élévation potentielle du niveau de la mer de 0,5 m, plutôt que de risquer de devoir modifier la structure à une date ultérieure⁹. En outre, certains scénarios d'élévation du niveau de la mer peuvent conduire à s'interroger sur la viabilité à long terme du port en raison de la propagation accrue des vagues, ce qui pourrait influencer la décision d'investir ou non.
- La hausse des températures entraîne la fonte des glaciers de montagne et donc l'augmentation du débit des rivières. Il convient toutefois de réagir avec prudence à cette situation. Pour éviter une éventuelle inadaptation sous la forme d'ouvrages obsolètes, la conception des nouvelles infrastructures doit tenir compte à la fois des débits supplémentaires (en été) à court et moyen terme **et** des scénarios de changement climatique qui prévoient la disparition des glaciers dans la seconde moitié de ce siècle. En fonction de la durée de vie de l'actif concerné, il peut être nécessaire d'intégrer la flexibilité et l'adaptabilité dans la conception.

La sélection des scénarios de changement climatique (combien ? lesquels ?) est déterminée par l'exposition et la vulnérabilité relatives de l'ouvrage ou de l'opération. En général, plus l'ouvrage ou

⁹ Les sections suivantes de cette note technique examinent des approches telles que les voies d'adaptation et la gestion adaptative pour faciliter cette prise de décision.

l'opération est susceptible d'être endommagé ou perturbé par le temps ou le climat, plus l'investissement est important et plus la durée de vie prévue est longue, plus il est important d'explorer une gamme complète de scénarios.

À moins que l'infrastructure en question ne soit explicitement destinée à être temporaire, déplaçable ou sacrificielle, la logique recommandée pour la planification de l'adaptation dans le rapport AIPCN 178-2020¹⁰ suggère ce qui suit:

- Si un projet a une durée de vie nominale ou opérationnelle de dix ans ou moins **et que** des données historiques adéquates sont disponibles pour comprendre les tendances récentes des paramètres climatiques, l'application de scénarios de changement climatique peut ne pas être nécessaire.
- Si la durée de vie nominale ou opérationnelle de l'infrastructure est inférieure à environ 30 ans (c'est-à-dire un futur proche), différents scénarios climatiques doivent être utilisés pour les tests de sensibilité et pour éclairer les décisions de conception, mais le nombre de scénarios peut être réduit, par exemple en utilisant un groupement ou une combinaison de projections sélectionnés.
- Si la durée de vie nominale ou opérationnelle de l'infrastructure prévue s'étend au-delà de 2050 (futur moyen à lointain) ou si l'ouvrage ou l'exploitation est particulièrement sensible aux dommages ou aux perturbations liés au temps ou au climat, ou encore pour les investissements de grande valeur, il convient d'envisager un large éventail de scénarios climatiques futurs possibles.

2.3 Scénarios improbables mais plausibles

En cas d'investissement majeur à long terme, il convient également d'accorder une attention particulière à la manière dont sont définis les scénarios à faible probabilité et à fort impact. Le GIEC (et d'autres projections de changement climatique) fournit généralement une fourchette "probable". Les évolutions et les réactions climatologiques ou physiques en dehors de cette fourchette ne sont pas incluses, par exemple lorsque la compréhension actuelle du système est limitée. Il est préoccupant de constater que la perte de masse des glaciers, la déstabilisation des calottes glaciaires, des plateformes glaciaires flottantes (*ice shelves*¹¹) et des inlandsis de l'Antarctique pourrait grandement affecter l'élévation du niveau de la mer dans la seconde moitié du 21^{ème} siècle [GIEC, 2019]. Il existe un nombre croissant de preuves concernant la stabilité des inlandsis de l'Antarctique occidental en particulier, et la possibilité d'une élévation du niveau de la mer à l'échelle mondiale pouvant atteindre 3 m d'ici 2100 [IMechE, 2019].

Afin de tester la vulnérabilité et de planifier les imprévus, les personnes qui conçoivent ou investissent dans des ouvrages à longue durée de vie et/ou très coûteux, sensibles à des paramètres tels que l'élévation du niveau de la mer, peuvent donc trouver utile d'envisager des scénarios improbables mais plausibles adaptés à l'emplacement ou à la région spécifique de leur projet. En effet, le GIEC (2019) suggère aux parties prenantes ayant une faible tolérance au risque (par exemple, celles qui réalisent des investissements à long terme dans des infrastructures critiques) d'envisager la possibilité d'une élévation du niveau de la mer supérieure à la fourchette probable¹².

Erreur ! Source du renvoi introuvable. fournit un exemple du Royaume-Uni, qui décrit l'approche adoptée pour les projections de l'élévation du niveau de la mer et des surcotes de tempête [Fung et al., 2018]. Les scénarios improbables mais plausibles ne sont pas recommandés comme étant le scénario le plus approprié sur lequel fonder les conceptions techniques; ils sont plutôt utiles pour fournir une limite supérieure permettant d'évaluer la robustesse des investissements prévus.

¹⁰ D'autres orientations pertinentes offrent un éclairage supplémentaire sur la définition et la prise en compte des risques climatiques à long, moyen et court terme (par exemple, la norme britannique 8631 (2021) propose des définitions claires sur cette question et sur la "complexité" appropriée des réponses à ces échelles de temps).

¹¹ Pour la Science Hors-série n° 117- novembre/décembre 2022 page 27

¹² Si ces considérations sont particulièrement vraies pour les installations sensibles à l'élévation du niveau de la mer, la nécessité d'envisager des scénarios improbables mais plausibles peut également s'appliquer aux infrastructures sensibles aux précipitations extrêmes, aux inondations fluviales ou aux inondations fluviales et submersions côtières simultanées.

Les projections d'élévation du niveau de la mer évaluent généralement la probabilité des conditions futures dans une fourchette de 17 à 83 % ou de 5 à 95 % (c'est-à-dire très probable/très probable). Toutefois, cette élévation pourrait être beaucoup plus importante si les calottes glaciaires devenaient instables, entraînant une perte (continue) de masse.

Les directives britanniques recommandent donc d'utiliser plusieurs sources de données sur l'élévation future du niveau de la mer pour évaluer les vulnérabilités aux niveaux d'eau extrêmes futurs. Ces éléments de preuve comprennent les scénarios dits "high plus-plus" (H++), qui représentent un scénario à faible probabilité mais à fort impact.

Les scénarios H++ improbables mais plausibles pour le Royaume-Uni sont définis en utilisant une combinaison de preuves historiques (par exemple, des données indirectes provenant de sédiments océaniques profonds, de coraux ou de carottes de glace provenant des calottes glaciaires, et des taux moyens estimés d'élévation du niveau de la mer au cours de la dernière période interglaciaire) ainsi que de projections futures disponibles tenant compte des limitations connues (par exemple, dans la physique des modèles de calottes glaciaires utilisés dans les projections du changement climatique). Des données locales récentes et des avis d'experts sont également utilisés [Lowe et al., 2009].

L'application de cette approche a donné lieu à un scénario H++ pour l'élévation du niveau moyen de la mer dans le temps autour du Royaume-Uni d'ici 2100, dans une fourchette de 0,93 m à 1,9 m. Cette fourchette indicative est nettement supérieure aux augmentations relatives du niveau de la mer projetées à l'époque (2008) pour l'horizon 2095, de 0,21 m à 0,68 m pour Londres, sur la base de projections ne tenant pas compte de l'instabilité de la calotte glaciaire de l'Antarctique.

Au-delà d'une déclaration qualitative selon laquelle il est très peu probable que le sommet de la gamme H++ se produise au cours du 21^{ème} siècle, aucune tentative n'a été faite pour attribuer une probabilité précise à cette gamme. Il a été reconnu que ces scénarios se situent au-delà des fourchettes habituellement qualifiées de "vraisemblable" et de "très vraisemblable", mais qu'ils ne peuvent pas être écartés compte tenu des observations passées des variables climatiques indirectes et des limites actuelles des modèles fondés sur les processus.

Au Royaume-Uni, ces estimations sont destinées à être utilisées à des fins de test de vulnérabilité et à aider les utilisateurs à planifier les mesures d'urgence lorsqu'un niveau de protection élevé est essentiel [Fung et al., 2018], plutôt qu'à servir de base à la conception.

Encadré 1 Élaboration de scénarios d'élévation du niveau de la mer au Royaume-Uni, à faible probabilité mais plausibles et élevés++.
(adapté du rapport AIPCN 178-2020)

2.4 Utilisation de conditions représentatives

L'évaluation de multiples scénarios de changement climatique ne doit pas nécessairement être une évaluation fastidieuse de nombreuses projections discrètes de l'élévation du niveau de la mer, des précipitations ou d'autres facteurs de forçage. Des efforts de planification robustes peuvent être menés en choisissant un nombre relativement faible de projections, à condition qu'elles représentent la gamme des conditions susceptibles de se produire pendant la durée de vie du projet. Une analyse de sensibilité peut alors être utilisée.

La Figure 3 repose sur un exemple d'élévation relative locale du niveau de la mer¹³ selon les projections de la *National Oceanographic and Atmospheric Administration* [NOAA ; Sweet et al., 2017] des États-Unis. La courbe " extrême " est analogue à l'exemple décrit dans le document suivant **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**. Les cases jaunes montrent comment un ensemble de quatre estimations représentatives de l'élévation du niveau de la mer (0,50, 1,25, 1,85 et 2,75 mètres) couvre la majeure partie des estimations d'élévation du niveau de la mer selon les différents scénarios à cet endroit spécifique (Boston, Massachusetts, États-Unis) jusqu'à l'année 2100. Un ensemble d'estimations comme celui-ci peut être utilisé pour évaluer la sensibilité des choix de planification et de conception. Dans cet exemple, les effets attendus d'une élévation du niveau de la mer de 1,25 mètre peuvent être raisonnablement appliqués aux décisions de planification sur la courbe "haute" en 2060, sur la courbe "intermédiaire-haute" en 2070 ou sur la courbe "intermédiaire" en 2100. Quatre estimations représentatives de l'élévation du niveau de la mer, évaluées en tant qu'ensemble, couvrent la majeure partie de la gamme des courbes basse, intermédiaire, haute et extrême prévues pour les années 2030 à 2100.

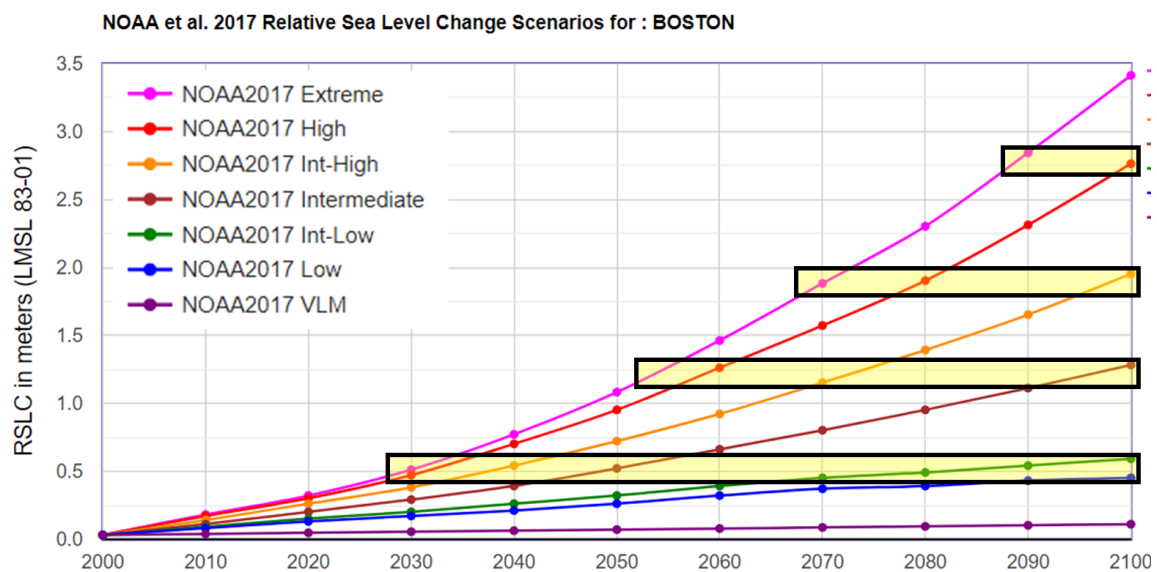


Figure 3: Illustration de l'utilisation d'estimations représentatives pour évaluer la gamme des projections futures du niveau de la mer (modifiée à partir du calculateur de la courbe de changement du niveau de la mer de l'USACE¹⁴, version 2021.12, utilisant les données de Sweet et al. (2017)).

Ce type d'approche conviendrait à une étude de planification pour des investissements de grande valeur se déroulant sur une longue période. Pour adapter la procédure à une conception détaillée, où la durée de vie nominale est probablement mieux précisée, les cases pourraient être rapprochées dans le temps et se concentrer sur les courbes représentant le mieux la tolérance au risque du projet.

L'approche finalement adoptée pour évaluer les scénarios de changement climatique pour un investissement particulier dépend donc de la nature et de l'échelle de l'investissement, ainsi que de sa durée de vie fonctionnelle prévue. Pour les projets à grande échelle ou à longue durée de vie dans des zones présentant un large éventail de résultats prévus, une approche probabiliste¹⁵ pour évaluer les risques associés à tous les paramètres et scénarios de changement climatique contributifs peut être la meilleure option afin de garantir que tous ces risques sont évalués sans être trop conservateurs ou trop

¹³ L'élévation locale relative du niveau de la mer est calculée en tenant compte des changements du niveau moyen de la mer à l'échelle mondiale ainsi que de facteurs locaux tels que les changements d'élévation des terres, les vents, la circulation océanique, etc.

¹⁴ <https://maps.crrel.usace.army.mil/projects/rcc/portal.html>

¹⁵ Les scénarios de changement climatique n'ont pas de probabilités; il faut plutôt en déduire des probabilités. Par exemple, le laboratoire de recherche sur l'eau de l'université de New South Wales (Australie) a réuni un groupe d'experts pour déduire les probabilités sous-jacentes des scénarios RCP pour une étude des risques côtiers en se mettant d'accord sur un ensemble de probabilités assignées à chaque RCP sur la période d'évaluation.

défavorables aux facteurs les moins probables. Il peut s'avérer nécessaire de demander l'avis d'un spécialiste et d'impliquer les parties concernées afin de définir et de convenir de la tolérance au risque.

Pour les investissements de moindre valeur, ou lorsque les ressources sont rares, la sélection consciente d'options flexibles et adaptatives constitue un autre moyen de gérer ces risques (voir section 4.0).

3 SE PRÉPARER AU SANS PRÉCÉDENT

Les conditions hydrométéorologiques ou océanographiques extrêmes, notamment les précipitations, le vent, les vagues, la chaleur ou le froid, peuvent entraîner des fermetures, des retards et des perturbations dans les ports ou les voies navigables. Ces événements peuvent également endommager considérablement les infrastructures maritimes. Dans de nombreuses régions du monde, le changement climatique devrait augmenter la fréquence ou l'intensité des événements extrêmes [GIEC, 2019]. La conception de nouveaux brise-lames, murs de quai, terminaux, installations de stockage, systèmes de drainage et autres infrastructures de navigation devra prévoir ces changements ou s'y adapter. Il en va de même pour la conception des modifications apportées à ces ouvrages après leur construction, ce que l'on appelle la remise à niveau (*rétrofit*).

En 2019-2020, les partenaires de la coalition internationale montée autour de l'AIPCN lors de la COP 21 intitulée "Navigating a Changing Climate"¹⁶ ont lancé une enquête pour comprendre si et comment les ports sont affectés par les événements météorologiques extrêmes. 67 réponses ont été reçues, représentant des ports de tous les continents. 53 % des ports ayant répondu à l'enquête ont indiqué qu'ils étaient déjà confrontés à des phénomènes météorologiques extrêmes plus fréquents¹⁷. 41 % d'entre eux ont indiqué qu'au cours des cinq années précédentes, ils avaient été confrontés à un événement "exceptionnel, sans précédent ou sortant de l'ordinaire". Le vent et les vagues extrêmes étaient les événements les plus fréquemment signalés, suivis par des précipitations sans précédent et des débordements (quelle qu'en soit la cause)¹⁸. Ces résultats sont globalement conformes à ceux d'une enquête menée en 2014 par la CNUCED (2017) auprès de l'industrie portuaire sur les impacts et l'adaptation au changement climatique.

Ceux qui possèdent, conçoivent ou évaluent une infrastructure de navigation doivent s'efforcer de comprendre et, dans la mesure du possible, se préparer aux conséquences possibles de tels événements. Cela ne signifie pas nécessairement qu'il faille les concevoir pour que celles-ci résistent aux événements extrêmes. Dans la plupart des cas, il faudra prendre des mesures pour renforcer la résilience technique et opérationnelle. La résilience fait référence à la capacité d'anticiper et de planifier les perturbations, de résister aux pertes ou d'absorber l'impact des perturbations, et de se rétablir rapidement après un événement [AIPCN WG 193, 2020]. Le renforcement de la résilience ne passe pas seulement par des mesures physiques, telles que l'intégration de la redondance technique dans la conception, mais aussi par des mesures non structurelles, de nature systémique, notamment grâce à la cartographie des ouvrages ou des zones vulnérables à l'intérieur ou à l'extérieur des limites du projet, à la préparation de plans d'urgence, à l'identification des seuils d'intervention pour déclencher des actions liées au climat, à l'installation de systèmes d'alerte précoce et à l'amélioration de la capacité d'adaptation.

Dans un contexte de changement climatique, il est essentiel de reconnaître et de prévoir les conséquences d'une défaillance si un événement dépasse les normes de conception initiales ou si un événement à fort impact et à faible probabilité se produit. Dans une certaine mesure, il est possible d'y remédier en prévoyant des redondances, en concevant des ouvrages spécifiquement conçus pour permettre un remplacement ou une réparation rapide, ou en utilisant des infrastructures temporaires (alternatives). Cependant, les structures et les opérations qui sont sujettes à des défaillances doivent

¹⁶ <https://navclimate.pianc.org/>

¹⁷ Note technique AIPCN-PTGCC n°2 (2022, à paraître).

¹⁸ Cette enquête, volontairement de haut niveau, n'a pas cherché à recueillir des détails sur la cause de chaque événement; elle s'est plutôt attachée à rassembler des informations sur les coûts et les conséquences associés.

également être conçues pour connaître une défaillance "limitée" plutôt que "catastrophique" et/ou des mesures doivent être mises en œuvre pour gérer les conséquences de la défaillance.

Concevoir une structure pour qu'elle se brise de manière contrôlée peut impliquer d'affaiblir délibérément des éléments spécifiques pour conserver un certain degré de contrôle, ou de sacrifier des composants vulnérables à des charges climatiques extrêmes afin d'améliorer la résilience globale de la structure. Par exemple, le tablier d'une jetée peut être conçu pour se briser avant que la structure porteuse ne soit endommagée. Cela pourrait impliquer la construction dudit tablier à partir de poutres ou de lattes en bois qui peuvent être remplacées rapidement et facilement en utilisant du bois local comme mesure temporaire si nécessaire, ou cela pourrait impliquer une conception plus sophistiquée comme illustré dans l'**Encadré 2** suivant [rapport AIPCN 178-2020].



Lorsque le quai du terminal sucrier en vrac de Lucinda, en Australie, a été soumis à de fortes vagues pendant le cyclone tropical Yasi en 2011, son tablier en béton a été plus résistant au soulèvement par les vagues que les connexions reliant le tablier à la structure en acier du quai. Le lourd tablier en béton a donc été soulevé de la structure en acier par les vagues, puis est retombé sur celle-ci, causant d'importants dommages au quai. La prise en compte des problèmes liés au changement climatique lors de la conception de la réparation du quai a inclus le développement d'une hiérarchie des capacités structurelles, de sorte que le tablier cède désormais avant que les connexions du tablier au quai ne cèdent.

Encadré 2: Tenir compte des événements extrêmes dans la conception de la réparation des quais du terminal de sucre en vrac de Lucinda en Australie.

La gestion et la minimisation des conséquences négatives d'un événement sans précédent peuvent être illustrées de manière similaire par un exemple de défense contre les inondations. Les dommages et les perturbations potentiels causés par la rupture d'une digue de terre assurant la protection contre les inondations d'un domaine portuaire pourraient être réduits par les moyens suivants:

- La surélévation ou la construction de talus autour des infrastructures biens essentiels dans la zone à risque, et/ou,
- La désignation de zones de stockage des inondations ou l'identification de casiers d'inondation pour l'inondation sacrificielle et la conception de voies d'écoulement préférentielles, et/ou,

- la protection des infrastructures contre les inondations dans la zone à risque (par exemple, des points d'alimentation électrique surélevés et une capacité de drainage renforcée, conçue de manière appropriée et bien entretenue)

Dans les deux exemples ci-dessus, l'inclusion d'un système d'alerte précoce au projet global constituera généralement une option rentable pour garantir que toutes les mesures préparatoires nécessaires puissent être prises avant un événement extrême prévu.

Plus la durée de vie prévue de l'ouvrage est longue, plus l'incertitude des projections de changement climatique est grande et plus le risque d'événements extrêmes remettant en cause l'intégrité ou le fonctionnement des infrastructures est important. Comme indiqué à la section 2.4, pour les investissements majeurs à long terme, il est recommandé d'adopter une approche probabiliste pour évaluer ces risques pour tous les paramètres pertinents, en faisant appel à des spécialistes si nécessaire. Les préparatifs doivent être efficaces, flexibles et durables.

Si l'on veut éviter une maladaptation, il est également important de reconnaître et de prendre en compte le risque de défaillances en cascade lorsqu'il existe des interdépendances entre des systèmes et sous-systèmes naturels et socio-économiques interconnectés. Par exemple, une crue soudaine à Port Klang, en Malaisie, en décembre 2021, a entraîné non seulement des retards dans l'accostage des navires dus aux conditions météorologiques, mais aussi des pénuries de personnel en raison des difficultés de déplacement et de l'impact des inondations sur les communautés locales. La perturbation du mouvement des conteneurs et des cargaisons qui en a résulté, ainsi que l'accumulation de navires en attente, ont obligé le port à donner la priorité aux livraisons de biens essentiels, notamment les denrées alimentaires, les fournitures médicales et les marchandises réfrigérées¹⁹. Parmi les autres cas d'effets en cascade bien documentés, citons les répercussions régionales de l'ouragan Sandy sur les chaînes d'approvisionnement en transport et les infrastructures énergétiques à New York en 2012, ainsi que les inondations importantes à Bangkok en 2011, qui ont entraîné une pénurie mondiale de semi-conducteurs et un ralentissement de la fabrication d'ordinateurs dans le monde [GIEC, 2022].

La nature même des ports en tant que plaques tournantes du commerce signifie que de telles interconnexions ne sont pas inhabituelles. Néanmoins, une prise en compte inadéquate de ce type de complexité peut conduire à des angles morts importants dans la planification de l'adaptation [Lawrence et al., 2020].

Les voies d'adaptation (séquences d'actions de réduction des risques, qui peuvent être mises en œuvre progressivement, en fonction de l'évolution de l'avenir et du développement des connaissances [Werners et al., 2021]) peuvent être utiles au niveau du système ainsi que des ouvrages ou des ports, et peuvent donc contribuer à faciliter les réponses en cas d'interdépendance. Comme nous le verrons plus loin dans la section 5.0, ces voies ne doivent pas toujours être compliquées ou coûteuses. Les sections suivantes du présent document expliquent comment une approche de bon sens de la réduction des risques peut être appliquée à un large éventail d'infrastructures et d'opérations.

4 ADOPTER DES SOLUTIONS ADAPTATIVES ET FLEXIBLES

Il est souvent possible de faire face à l'incertitude et d'éviter les réactions inadaptées au changement climatique en adoptant des solutions flexibles qui présentent de nombreux avantages [GIEC, 2022]. Pour les infrastructures, cela peut impliquer l'introduction d'une flexibilité technique et d'une capacité d'adaptation à la fois dans la conception et dans les systèmes opérationnels afin de faciliter les modifications futures en fonction de l'évolution des conditions. C'est ce que l'on appelle parfois le "prêt pour l'adaptation".

Lors de l'élaboration de solutions pour le changement climatique, les maîtres d'ouvrage/planificateurs et les concepteurs doivent tenir compte des changements à la fois de la moyenne et de la variance (c'est-à-dire des extrêmes) des paramètres climatiques tels que le niveau de la mer, la force du vent ou la hauteur des vagues. Les changements de l'un ou des deux paramètres peuvent entraîner une

¹⁹ <https://www.porttechnology.org/news/port-klang-suffers-severe-flooding-affecting-port-and-logistics-operations/>

modification de l'ampleur et de la fréquence des conditions extrêmes. Les conditions extrêmes appliquées à la conception des structures maritimes correspondent généralement à des conditions qui se produisent en moyenne une fois tous les 50, 100 ou 200 ans. Les opérations portuaires et fluviales, en revanche, sont généralement régies par des conditions environnementales moins importantes (c'est-à-dire des conditions qui se produisent sur une base mensuelle ou annuelle).

Avec le changement climatique, les conditions relatives à une période de retour donnée sont susceptibles d'évoluer dans le temps. Le rapport spécial du GIEC sur les océans et la cryosphère [GIEC, 2019] conclut que "les événements extrêmes de niveau de la mer qui sont historiquement rares (une fois par siècle dans le passé récent) devraient se produire fréquemment (au moins une fois par an) à de nombreux endroits d'ici 2050 dans tous les scénarios RCP, en particulier dans les régions tropicales". L'incertitude est toutefois plus grande en ce qui concerne les projections relatives à l'évolution d'autres paramètres qui sont importants pour de nombreux types de conception, notamment l'évolution de l'intensité des tempêtes, des surcotes de tempête, de la vitesse du vent et de la hauteur significative des vagues. De même, en ce qui concerne les opérations maritimes, il n'est pas (encore) possible de déterminer avec certitude à quel moment les conditions de vent, de vagues ou de brouillard habituellement observées chaque année dans un passé récent, pourraient devenir mensuelles, voire hebdomadaires, et ainsi de suite. Sur les voies navigables intérieures, il existe des incertitudes équivalentes en ce qui concerne les niveaux et les débits élevés ou les étiages des rivières, les inondations et les sécheresses. Les changements potentiels futurs au niveau du système, tels que la disparition des glaciers dans les zones montagneuses, doivent également être pris en compte.

Au fur et à mesure que le climat continue de changer, les méthodes statistiques conventionnelles qui s'appuient sur des données historiques concernant des événements passés pour prédire l'ampleur d'événements futurs de faible probabilité (par exemple, des périodes de retour moyennes de 100, 500, 1 000 ou 2 000 ans) deviendront de moins en moins appropriées, même si un ensemble de données à long terme existe [rapport AIPCN 178, 2020].

L'augmentation de l'incertitude climatique au fil du temps signifie que les ouvrages et les opérations critiques bénéficieront de niveaux plus élevés de résilience intrinsèque. La résilience peut être obtenue de différentes manières. Il est donc important d'anticiper et, dans la mesure du possible, de répondre aux conditions et aux risques auxquels on peut être confronté pendant la durée de vie de l'ouvrage ou bien ou de son exploitation. De plus en plus de preuves²⁰ démontrent que l'intégration proactive de considérations de conception liées au climat dès le début du processus peut être nettement moins coûteuse et moins complexe que de devoir modifier les conceptions de manière réactive à une date ultérieure. L'encadré 2 décrit une solution adaptative pour faire face à des conditions extrêmes. La Figure 3 couvre une situation dans laquelle un ouvrage peut devoir être surélevé, renforcé ou modifié d'une autre manière à mesure que les conditions changent ou que des informations supplémentaires seront disponibles à l'avenir.

On peut s'attendre à ce qu'un brise-lames ou une défense contre les inondations assure une protection contre une tempête centennale, mais il se peut que l'on ne dispose pas de suffisamment de certitudes pour comprendre à quoi ressemblera réellement cette tempête dans 30, 50 ou 100 ans. Plutôt que de s'enfermer dans un seul scénario de changement climatique et d'investir dans une structure d'une certaine hauteur, il convient de se demander si l'ouvrage peut être conçu pour être relevé et renforcé dans les années à venir en fonction des conditions (c'est-à-dire s'il est "prêt à s'adapter"). Ce principe est illustré par l'exemple de la "digue climatique" fournie dans le document suivant. (Figure 4 (extraite du rapport AIPCN 178-2020)). Des principes d'"adaptabilité" similaires peuvent être appliqués à de nombreux autres types d'infrastructures physiques. Les fondations d'un brise-lames, par exemple, peuvent être construites de manière à résister à la charge d'une élévation de niveau marin ultérieure si les conditions de houle dépassent les projections actuelles ; ou bien il peut être prudent d'acheter des terrains supplémentaires en cas d'imprévu (par exemple pour faciliter les travaux de renforcement

²⁰ <https://econadapt-toolbox.eu/infrastructure-costs-and-benefits-adaptation> ; Global Centre on Adaptation et World Resources Institute, 2019.

futurs, ou pour disposer d'un espace permettant de construire ultérieurement des structures supplémentaires telles que des digues de protection contre les inondations ou des déflecteurs de vent).

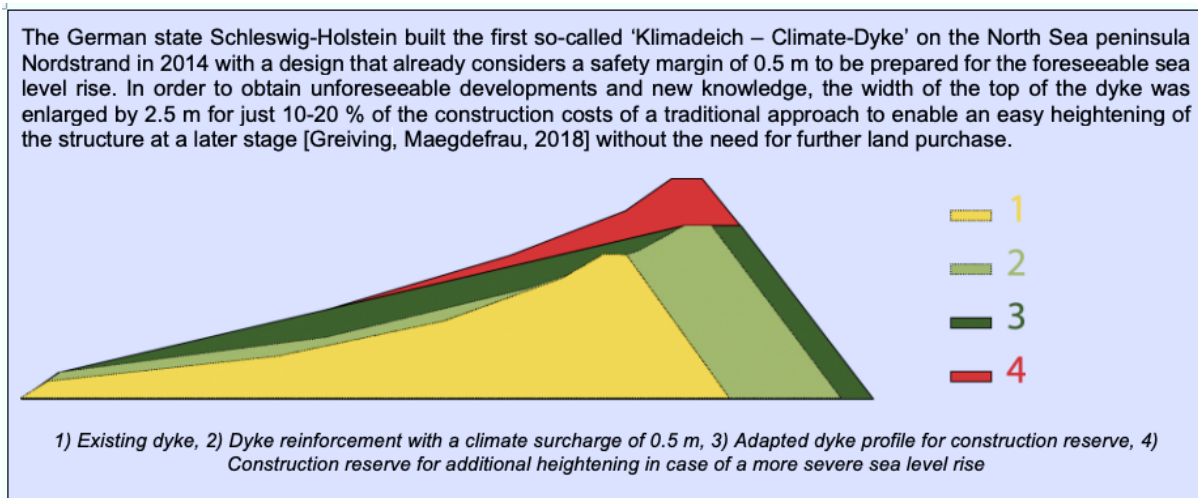


Figure 4: La "digue climatique" de l'État fédéral allemand dans le Schleswig Holstein.

5 ENVISAGER DES OPTIONS D'ADAPTATION ET DE RESILIENCE STRUCTURELLES ET NON STRUCTURELLES

Comme indiqué précédemment, les interventions structurelles ne sont pas la seule option pour répondre aux risques liés au climat et les gérer. Selon le type de risques identifiés et les incertitudes associées, des changements dans l'exploitation, la gestion, la maintenance ou le comportement pourraient être appropriés ou rentables en complément, ou en alternative à une intervention structurelle. Les solutions fondées sur la nature, telles que promues par la philosophie *Working with Nature - Œuvrer avec la Nature* de l'AIPCN [rapport AIPCN 176-2018], qui permettent à un port ou à une voie navigable de tirer parti de la résilience de la nature tout en offrant des cobénéfices, peuvent représenter une option rentable en fonction des risques particuliers auxquels on est confronté. Les changements institutionnels, par exemple en matière de politique d'utilisation des sols, de financement de projets ou d'assurance, pourraient de la même manière faire partie d'une solution globale à long terme.

Le changement climatique exige souvent l'innovation. Les options sans regret qui offrent des avantages dans une série de scénarios climatiques devraient jouer un rôle de plus en plus important à l'avenir. Il en va de même pour les mesures provisoires ou à court terme qui permettent de gagner du temps. Des solutions plus coûteuses ou à plus long terme peuvent ensuite être adoptées, conçues et mises en œuvre au fur et à mesure que la disponibilité des données et la compréhension (par exemple, des taux de changement locaux) s'améliorent.

De la même manière que l'exploration d'une série de scénarios facilitera la compréhension des différents risques, il convient d'envisager une série d'options si l'on veut identifier des solutions efficaces, efficaces et appropriées.

Le rapport AIPCN 178-2020 présente un inventaire de différents types de mesures physiques, comportementales et institutionnelles pour renforcer la résilience ou adapter les ouvrages, opérations et systèmes de navigation existants et nouveaux. Le *Tableau 1* extrait de ce rapport, illustre une grande variété de mesures génériques. Le rapport du GT 178 contient également des annexes présentant des mesures spécifiques à différents types d'impact du changement climatique (différents types d'inondations, conditions de débit élevé ou faible des rivières, changements de vent ou de brouillard, canicules, etc.)

Les options visant à renforcer la résilience en concevant et en adaptant les infrastructures de navigation à l'évolution du climat peuvent, soit impliquer des choix simples, soit requérir des combinaisons complexes de mesures mises en œuvre simultanément ou consécutivement. Les voies d'adaptation peuvent être utilisées pour définir des séquences d'actions (mesures, modifications, investissements, etc.) qui peuvent être mises en œuvre progressivement, en fonction de la dynamique future [Zandvoort et al, 2017; BS 8631, 2021]. Selon Werners et al. (2021), les voies d'adaptation peuvent comprendre des trajectoires alternatives vers un objectif défini ou de grandes directions de changement pour différents résultats stratégiques, par exemple centrés sur des seuils de performance ou des objectifs de transformation. Les voies d'adaptation peuvent également aider à identifier le potentiel de mauvais résultats à plusieurs stades dans le futur, lorsque des interventions importantes peuvent être nécessaires, par exemple pour maintenir la fonctionnalité des ports ou des voies navigables. Le suivi des résultats et l'apprentissage réflexif permettent la réalisation de ces voies dans différents contextes décisionnels.

Dans le contexte de l'infrastructure de navigation, une voie d'adaptation pourrait soutenir la mise en œuvre de mesures provisoires ou temporaires dans un premier temps, permettant de recueillir des données supplémentaires et de réduire l'incertitude pendant une période de risque acceptable ; elle pourrait aussi recommander un processus d'investissement ou de construction échelonné, subordonné au respect de certains seuils. Par exemple, une action peut être déclenchée lorsque le niveau moyen de la mer atteint un certain seuil, ou lorsqu'une fréquence prédéterminée de vitesse maximale du vent ou de hauteur significative des vagues est dépassée. Des seuils économiques, financiers ou de continuité des activités peuvent également être pertinents, par exemple pour faciliter une réponse proportionnée aux impacts en cascade. Les voies d'adaptation permettent de faire face aux risques liés au changement climatique de manière flexible ou de garder ouvertes les options futures afin de minimiser le risque de mauvaise adaptation [rapport AIPCN 178-2020].

Le rapport du groupe de travail 178 de l'AIPCN souligne en outre que, si l'adaptation au changement climatique est souvent un processus progressif, dans certains cas, un changement transformant le projet ou même disruptif est nécessaire. Par exemple:

- l'augmentation de la fréquence des inondations, des taux d'érosion ou de l'incidence des vagues extrêmes dans les zones côtières entourant un port maritime peut, à terme, rendre intenable une exploitation actuellement rentable, ce qui signifie que le port (ou une partie de celui-ci) devra être fermé ou déplacé ;
- ou une fréquence accrue de sécheresse ou de bas niveaux d'eau peut obliger à passer à des navires plus petits ou à faible tirant d'eau si l'on veut que le transport par voie d'eau reste viable sur certaines voies navigables.

Mesures physiques Structures, systèmes, technologies, services	Mesures sociales Personnes, comportement, opérations, information	Mesures institutionnelles Gouvernance, économie, réglementation, politique
<p>Prioriser la maintenance pour maximiser la résilience opérationnelle et améliorer la capacité d'adaptation.</p> <p>Installer une infrastructure de surveillance en temps réel</p> <p>Utiliser le cloud (sauvegarde) pour le stockage des données afin de réduire les risques physiques pour les systèmes.</p> <p>Déplacer les biens et équipements vulnérables hors des zones à haut risque.</p> <p>Revenir à un réseau phasé pour le radar.</p> <p>Investir dans la redondance, les infrastructures temporaires ou d'autres dispositifs de secours physiques pour les actifs critiques (y compris l'approvisionnement en électricité et en eau).</p> <p>Renforcer, élever, consolider ou autrement protéger ou modifier les actifs critiques.</p> <p>Installer ou développer des infrastructures ou des équipements nouveaux, réactifs ou démontables.</p> <p>Installer des équipements d'alerte.</p> <p>Proposer ou fournir des sanctuaires physiques.</p> <p>Augmenter la capacité de stockage.</p> <p>Installer des équipements multimodaux.</p> <p>Appliquer des solutions basées sur la nature, Travailler avec la nature, ingénierie douce.</p> <p>Installer des installations de traitement ou de réception.</p> <p>Intégrer une certaine flexibilité dans la conception des infrastructures nouvelles ou de remplacement, afin de pouvoir les modifier en fonction de l'évolution des conditions.</p> <p>Modifier le choix des matériaux ou des équipements pour s'adapter aux conditions changeantes.</p> <p>Investir dans la technologie SMART</p>	<p>Entreprendre l'évaluation des risques liés au changement climatique, préparer des cartes de risques.</p> <p>Préparer et faire connaître les plans d'urgence, de secours ou d'intervention en cas de catastrophe.</p> <p>Introduire et revoir régulièrement les systèmes d'alerte.</p> <p>Priorité à l'inspection des ouvrages.</p> <p>Former la main-d'œuvre, les parties prenantes et les communautés locales.</p> <p>Assurer la liaison et la coordination avec les services publics et les autres prestataires de services ; élaborer des protocoles de partage de l'information.</p> <p>Améliorer (ou mettre en place) le suivi, la tenue des dossiers et la gestion des données, prendre en compte les questions de cybersécurité.</p> <p>Effectuer des analyses de tendances ou des prévisions.</p> <p>Élaborer des protocoles opérationnels révisés ; modifier les pratiques de travail en fonction de l'évolution des conditions.</p> <p>Introduire et mettre en œuvre des procédures de gestion adaptative, des opérations de base ou des accords de travail sur les résultats de la surveillance.</p> <p>Permettre une flexibilité et une réactivité dans la programmation (augmenter les heures d'ouverture, modifier les rotations du personnel, la programmation des navires, le fonctionnement des écluses, etc.)</p> <p>Revenir à des modes de fonctionnement traditionnels et peu techniques ; s'assurer que des jumelles, un téléphone, des cartes papier et des radios bidirectionnelles sont disponibles.</p> <p>Assurer la disponibilité du transport et de l'hébergement du personnel pendant un incident</p> <p>Limiter temporairement ou définitivement les activités dans les zones à haut risque. Nommer des itinéraires et des zones sûres, identifier les déviations.</p>	<p>Préparer des stratégies d'adaptation au changement climatique au niveau stratégique.</p> <p>Renforcer la coopération internationale et la planification au niveau des bassins fluviaux.</p> <p>Examiner et réviser les codes de pratique, les normes, les spécifications ou les lignes directrices pertinentes pour tenir compte de l'évolution des conditions.</p> <p>Revoir les exigences en matière de santé et de sécurité et les réviser si nécessaire. Introduire des sanctions en cas de non-respect des normes. Exiger le zonage des ouvrages, des opérations ou des activités en fonction du risque.</p> <p>Utiliser les réglementations locales (par exemple, les arrêtés municipaux) pour réduire les risques, en particulier dans les lieux à usage multiple.</p> <p>Politiques visant à encourager la relocalisation hors des zones à haut risque.</p> <p>Collaborer avec les systèmes de planification de l'utilisation des sols, par exemple pour introduire des zones de retrait ou des zones tampons.</p> <p>Limiter le développement de nouvelles infrastructures dans les zones à haut risque.</p> <p>Identifier, sécuriser et coordonner les voies ou modes de transport alternatifs.</p> <p>Promouvoir la réduction des primes d'assurance si l'amélioration de la résilience est démontrée.</p> <p>Mettre en place un fonds d'urgence ou d'intervention en cas de catastrophe.</p> <p>Introduire et appliquer une politique de reconstruction ou d'élimination des nuisances.</p> <p>Faciliter la diversification des installations et des emplois en fonction de l'évolution de la situation.</p> <p>Améliorer la protection juridique des habitats vulnérables ayant un rôle de réduction des risques (par exemple, grâce à des dispositifs d'absorption de l'énergie des vagues ou de protection contre l'érosion).</p>

	<p>Identifier et exploiter les options d'interconnexion et d'intermodalité pour maintenir la continuité des activités pendant les événements.</p> <p>Fournir une formation sur les nouveaux outils, codes de pratique, procédures et les protocoles. S'assurer que l'importance de la redondance est comprise</p> <p>Faciliter le transfert de technologie</p>	<p>Fournir des subventions ou des incitations, par exemple pour le développement ou la maintenance d'infrastructures résilientes.</p> <p>Rechercher et développer de nouveaux outils et méthodes</p>
--	--	--

Tableau 1: Mesures génériques pour renforcer la résilience ou adapter les ouvrages, les opérations ou les systèmes.

6 UTILISER LES DONNEES DE SUIVI POUR ECLAIRER LA PRISE DE DECISION

Même avec l'application de scénarios, de nombreuses situations exigeront des solutions plus robustes et adaptatives que ce qui est actuellement la norme. La gestion adaptative, dans laquelle les décisions sont éclairées par le suivi et la compréhension des seuils pour déclencher des actions, est un concept important pour fournir des solutions rentables et résilientes au changement climatique face à l'incertitude. Le cas échéant, la collecte de données et le suivi local peuvent être utilisés pour garantir que les investissements sont réalisés de manière réactive, "juste à temps". De même, les données en temps réel et les systèmes d'alerte précoce peuvent permettre de prendre des mesures pour éviter ou réduire le risque de dommages ou de perturbations.

Les informations spécifiques au site sont essentielles pour permettre une compréhension locale, identifier les tendances et informer les décisions. Les exemples suivants illustrent comment ces données peuvent être utilisées pour éclairer la prise de décision:

- Les données hydrométéorologiques ou océanographiques locales peuvent aider à comprendre les tendances locales et à déterminer si elles sont conformes aux taux de changement projetés au niveau national, ce qui permet de prendre des décisions de gestion adaptative en fonction de l'emplacement et de sélectionner de manière optimale les critères de conception.^{21 22}
- La connaissance de l'état et de la performance des ouvrages physiques, y compris les enregistrements des effets (cumulatifs) des événements extrêmes ou des changements dans les conditions naturelles, peut aider à déterminer *quand une* réponse est nécessaire ou *quand une* mesure doit être mise en œuvre.
- Les données postérieures aux événements météorologiques extrêmes, telles que l'étendue et la durée des inondations dues aux marées de tempête et aux crues, peuvent être utilisées pour valider les prédictions concernant les zones d'impact probables ou les modèles de conditions futures.
- Un relevé des coûts et des autres conséquences des dommages, des perturbations ou des temps d'arrêt associés aux événements extrêmes peut faciliter une évaluation éclairée des avantages financiers et économiques de l'adaptation par rapport aux conséquences de l'inaction, ce qui permet de justifier l'intervention.
- La connaissance de l'efficacité ou de la performance des mesures d'adaptation et de résilience déjà mises en œuvre peut éclairer les décisions relatives aux modifications ou mesures futures.

Comme indiqué ailleurs dans ce document, la collecte, le regroupement, la gestion efficace et l'utilisation de ces types de données peuvent être essentiels pour réduire l'incertitude, faciliter la sélection de mesures appropriées et soutenir la préparation de plans stratégiques d'adaptation et de résilience à long terme. L'évaluation continue des principaux développements scientifiques en matière de surveillance et de modélisation du changement climatique est également importante pour une prise de décision éclairée.

7 CHOISIR DES METHODES D'EVALUATION QUI RECONNAISSENT ET PRENNENT EN COMPTE L'INCERTITUDE

Investir dans des infrastructures adaptées et améliorer la résilience impliquera souvent des coûts supplémentaires. Ces coûts doivent être justifiés. Il est donc important de s'assurer que les méthodes utilisées pour l'évaluation des mesures potentielles et pour la sélection des options sont adaptées à la fois à l'ouvrage à risque et à la gamme pertinente de facteurs liés au changement climatique, et qu'elles sont acceptables pour ceux qui financent le projet.

²¹ Le suivi doit être adapté à l'objectif visé. Dans certains cas, un simple journal de bord ou des mesures conventionnelles sur le site peuvent suffire. Dans d'autres, des images satellites peuvent compléter utilement la surveillance sur place. Les systèmes opérationnels en temps réel à base de données hydrométéorologiques ou de modèles peuvent s'avérer utiles pour émettre des alertes en temps utile et déclencher des réponses opérationnelles.

²² La réduction d'échelle (interprétation des informations provenant des modèles climatiques mondiaux à grande échelle pour faire des prévisions à l'échelle locale) peut être utile pour comprendre les taux de changement prévus [Tetra Tech ARD, 2014]. Cependant, les connaissances spécialisées, le coût et la complexité qu'implique une réduction d'échelle efficace et fiable signifient qu'elle n'est susceptible d'être soutenue que pour des investissements à grande échelle.

Il existe un certain nombre de considérations importantes liées à l'incertitude à cet égard, notamment:

- Si l'on veut démontrer pleinement les avantages résultant des dépenses consacrées à l'amélioration de la résilience des infrastructures, il faut comprendre les conséquences et les coûts de l'*inaction* (c'est-à-dire les implications de l'absence de mesures pertinentes). L'idéal serait d'utiliser des données historiques spécifiques au site sur les temps d'arrêt, les retards, les coûts de nettoyage et/ou de réparation des dommages pour fournir une base de référence pour cette évaluation, mais les éventuelles implications financières ou commerciales des événements extrêmes peuvent être difficiles à prévoir si l'organisation n'a pas d'expérience préalable de tels événements extrêmes²³.
- La modélisation et/ou le suivi aideront une organisation à prendre des décisions opportunes sur le *moment d'investir*, ou lorsque des actions "juste à temps" sont nécessaires. La fixation de seuils fondés sur des niveaux de risque acceptables contribue à éclairer les décisions d'investissement dans les interventions d'adaptation et de résilience. Un changement spécifique d'un paramètre climatique ou les conséquences d'un futur événement extrême peuvent déclencher une décision d'investissement. Le scénario ou la stratégie d'adaptation doit reconnaître ces conditions de déclenchement afin d'informer la surveillance à long terme, l'adaptation proactive et la préparation de réserves financières ou l'achat d'assurances pour répondre aux besoins financiers après un événement extrême.
- L'incertitude quant à la rapidité de l'évolution de certains paramètres climatiques signifie qu'il peut être difficile de savoir exactement *quand* les avantages des mesures de résilience ou d'adaptation se concrétiseront.
- L'application de taux d'actualisation élevés (c'est-à-dire une estimation du taux de rendement utilisé pour ramener les flux de trésorerie futurs à leur valeur actuelle) augmente potentiellement encore le risque de maladaptation, car une valeur moindre est accordée aux avantages futurs. La solution la plus efficace sur le plan climatique risque ainsi être négligée ou rejetée.
- L'évaluation conventionnelle des coûts et avantages ou les calculs de la valeur actuelle nette peuvent ne pas refléter de manière adéquate la complexité des décisions d'investissement dans le domaine du changement climatique, même si des taux d'actualisation faibles sont utilisés. Les méthodes doivent être adaptées à l'objectif recherché. Il est également important de prendre en compte les coûts et avantages sociaux ou environnementaux moins facilement quantifiables pour éviter de sous-estimer des effets potentiellement graves.
- Le temps de mise en œuvre et la durée de vie d'une ou plusieurs mesures doivent être pris en compte: dans un climat en évolution (rapide), la fonctionnalité et la durée de vie d'une mesure pourraient être plus courtes que dans les conditions actuelles.
- Les coûts et avantages potentiels en amont, en aval ou transfrontaliers doivent toujours être examinés lors de l'évaluation des options. Par exemple, certaines solutions techniques visant à augmenter la capacité de drainage ou d'évacuation des crues pour faire face à des précipitations intenses peuvent entraîner un risque accru pour la vie et les biens situés en aval. Les méthodes d'évaluation doivent être capables de prendre en compte, de quantifier et d'inclure de telles conséquences pour éviter toute maladaptation.
- L'utilisation d'analyses multicritères, d'analyses d'arbres de décision, de la gestion itérative des risques, de la prise de décision robuste, de l'analyse des options réelles, de l'analyse de portefeuille ou d'outils similaires peut aider à prendre de meilleures décisions et à réduire le risque de maladaptation [Tröltzsch et al., 2016].

La résolution de ces problèmes liés à l'évaluation est cruciale pour garantir que les risques sont correctement reconnus afin d'offrir une résilience renforcée et une adaptation efficace. Comme le confirment DeFries et al. (2019), les évaluations économiques qui ne font qu'extrapoler à partir de l'expérience passée, ou qui utilisent une actualisation inappropriée, ne donnent pas une indication claire des risques potentiels. De nombreuses évaluations économiques des risques potentiels futurs du changement climatique ont omis ou grossièrement sous-estimé les conséquences les plus graves, précisément parce que ces risques sont difficiles à quantifier. Dans de tels cas, le risque d'inadaptation augmente.

La prise en compte du changement climatique dans la conception des infrastructures et des opérations devient toutefois de plus en plus un préalable important au financement et, de fait, à l'obtention de

²³ Note technique PIANC- PTGCC n°2 (2022, à paraître).

conditions de financement intéressantes²⁴. Les mesures d'adaptation proactives peuvent apporter de multiples avantages, souvent désignés sous le nom de triple dividende (capacité de l'investissement à réduire les pertes futures; retombées économiques positives grâce à la réduction des risques, à l'augmentation de la productivité ou à l'innovation; avantages sociaux et environnementaux). À l'échelle de la planète, la Commission Mondiale sur l'Adaptation estime que l'investissement de 1 800 milliards de dollars à l'échelle mondiale dans cinq domaines²⁵ de 2020 à 2030 produirait 7 100 milliards de dollars d'avantages nets totaux d'ici 2030 grâce à ce triple dividende [Global Center on Adaptation et World Resources Institute, 2019]. Au moins deux des domaines qu'ils identifient (systèmes d'alerte précoce et infrastructures résilientes au climat) concernent directement le transport maritime et fluvial.

De même, le GIEC (2022) reconnaît les multiples avantages - notamment pour la santé et le bien-être, les moyens de subsistance et la biodiversité, ainsi que la réduction des risques et des dommages - découlant de la planification et de la mise en œuvre de l'adaptation, tout en soulignant la nécessité de prendre en compte les questions systémiques. Ce dernier point est important pour éviter de donner la priorité à la réduction des risques immédiats et à court terme dans les cas où une telle focalisation réduit la possibilité du type d'adaptation transformationnelle souligné dans la section 5.0 ci-dessus. Ce rapport [GIEC, 2022] met également en évidence les avantages cumulatifs qui peuvent découler de mesures telles que les systèmes d'alerte précoce et les plans de gestion des risques de catastrophe, qui sont largement applicables dans tous les secteurs: dans certains cas, lorsqu'elles sont combinées, ces mesures peuvent apporter des avantages plus importants que d'autres options d'adaptation.

8 MESSAGES CLÉS

Le changement climatique introduit des incertitudes nouvelles et accrues dans les choix de conception et la prise de décision concernant les investissements dans des infrastructures et des opérations de navigation nouvelles ou modernisées. Les points suivants résument certains des messages clés de cette note technique pour chaque étape du processus de planification du projet.

8.1 Comprendre les incertitudes des données climatiques

- Le changement climatique entraîne des modifications, notamment des changements à évolution lente (de la température, des caractéristiques des précipitations et du niveau de la mer); de la fréquence et de l'intensité des événements hydrométéorologiques ou océanographiques extrêmes; et des combinaisons de ces changements.
- Les effets varieront selon les régions; les projections mondiales doivent être déclinées à l'aide de modèles régionaux.
- Au-delà des dix prochaines années, il existe une incertitude croissante quant à l'ampleur et à la rapidité de l'évolution des paramètres climatiques pertinents. Les méthodes statistiques conventionnelles qui s'appuient sur des données historiques concernant des événements passés pour prédire l'ampleur d'événements futurs à faible probabilité seront de moins en moins appropriées.

8.2 Sélection et application des scénarios de changement climatique

- Des scénarios de changement climatique doivent être identifiés et des tests de sensibilité doivent être appliqués aux ouvrages permanents envisagés ou aux opérations à long terme dont la durée de vie est supérieure à dix ans.
- Plus l'ouvrage est exposé, vulnérable ou sensible, plus sa durée de vie nominale ou opérationnelle est longue, ou plus l'importance de l'investissement est grande, plus il est important de tester la sensibilité et la tolérance de l'ouvrage ou de l'opération à une gamme complète de climats futurs possibles.
- Pour les investissements majeurs à long terme, il convient d'accorder une attention particulière à la manière dont le scénario "le plus défavorable" a été défini: il peut être utile d'envisager des scénarios "improbables mais plausibles" spécifiques à un lieu, comme limite supérieure pour les tests de sensibilité.

²⁴ <https://www.financing-smafi.org/>

²⁵ Systèmes d'alerte précoce; infrastructures résilientes au climat; amélioration de l'agriculture en zone aride; protection des mangroves; et ressources en eau résilientes.

- L'évaluation de plusieurs scénarios de changement climatique n'implique pas nécessairement une évaluation fastidieuse de nombreuses projections distinctes: un nombre relativement faible de projections représentatives soigneusement sélectionnées peut couvrir l'éventail des conditions susceptibles de se produire pendant la durée de vie du projet.
- Des événements conjoints (par exemple, une surcote de tempête combinée à des précipitations intenses et à une marée de vive-eau, superposées à une augmentation du niveau de la mer) exacerberont les effets. Des conditions sans précédent peuvent accroître le risque de défaillances en cascade lorsqu'il existe des interdépendances entre des systèmes et sous-systèmes naturels et socio-économiques interconnectés.
- Ces incertitudes peuvent être prises en compte dans l'évaluation et la gestion des risques par une analyse probabiliste des paramètres qui y contribuent et/ou par l'inclusion de groupes ou de combinaisons de projections climatiques sélectionnés.

8.3 Recherche de solutions adaptatives

Il faut toujours envisager une série d'options si l'on veut trouver des solutions efficaces, efficientes et appropriées en matière d'infrastructures de navigation.

- Il est possible d'éviter la maladaptation et d'améliorer la résilience des ouvrages et des opérations critiques en choisissant des conceptions flexibles et adaptatives qui peuvent être modifiées en fonction de l'évolution des conditions.
- Les solutions sans regret ou à faible regret, qui apportent des avantages indépendamment de l'évolution du climat, et les solutions fondées sur la nature, qui tirent parti de la résilience de la nature, jouent toutes deux un rôle important dans la prise en compte de l'incertitude.
- Les structures et les opérations sujettes aux défaillances doivent être conçues de manière que la défaillance soit limitée plutôt que catastrophique, et les conceptions doivent prévoir des mesures pour gérer les conséquences de la défaillance.
- Les solutions structurelles ne sont pas la seule option pour réduire les risques liés au climat. Des changements dans les opérations, la gestion, la maintenance ou les comportements peuvent s'avérer plus appropriés ou plus rentables qu'une intervention structurelle. Les changements institutionnels peuvent également faire partie d'une solution à long terme.
- Les conséquences potentielles de défaillances en cascade dans des systèmes complexes et interdépendants doivent toujours être prises en compte; ne pas reconnaître ces liens peut entraîner une maladaptation.

8.4 Prise en compte des complexités du changement climatique dans l'évaluation des options

Les conséquences et les coûts de l'inaction doivent être correctement compris si l'on veut que les avantages des dépenses consacrées à l'amélioration de la résilience soient pleinement démontrés.

- Les méthodes utilisées pour différencier les options doivent être adaptées au contexte du changement climatique; en particulier, les évaluations économiques qui ne font qu'extrapoler à partir de l'expérience passée peuvent ne plus être adéquates si les risques climatiques futurs doivent être intégrés.
- L'analyse conventionnelle de type ACB des coûts et bénéfices ou les calculs de la valeur actuelle nette (VAN) peuvent ne pas refléter de manière adéquate les complexités de l'investissement dans le changement climatique, même si des taux d'actualisation bas sont utilisés.
- Dans le cadre de l'adaptation au changement climatique, les impacts sociaux et environnementaux difficiles à quantifier peuvent être importants; il convient de tenter de saisir ces effets pour éviter de sous-estimer des conséquences potentiellement graves.

8.5 Fournir des solutions résilientes

- Les scénarios d'adaptation, qui décrivent des séquences d'actions pouvant être mises en œuvre progressivement en fonction de l'évolution de l'avenir, peuvent aider à faire face aux incertitudes. Des interventions appropriées à court terme, provisoires ou temporaires peuvent être mises en

œuvre pendant que des réponses à plus long terme (parfois plus complexes et/ou coûteuses) sont élaborées.

- La gestion adaptative est un concept important; la combinaison de bonnes données et d'une flexibilité intrinsèque peut contribuer à éviter les erreurs d'adaptation et à fournir des solutions résilientes: le suivi local permet de prendre des décisions d'investissement "juste à temps" lorsque les conditions l'exigent.

En soulignant ces messages clés et en décrivant les bonnes pratiques en matière de gestion des défis liés aux incertitudes du changement climatique, cette note technique explique comment une approche informée, flexible et réactive peut contribuer à réduire les risques, à éviter les maladaptations et à fournir une infrastructure de navigation appropriée et résiliente.

9 RÉFÉRENCES

British standard 8631 (2021): "Adaptation to climate change.Using adaptation pathways for Decision making " (Adaptation au changement climatique. Utilisation des scénarios d'adaptation pour la prise de décision").

CCNUCC (2012) : <https://unfccc.int/resource/docs/2012/tp/07.pdf>; Slow onset events_document technique de la CCNUCC FCCC/TP/2012/7.

CNUCED (2017): " Port Industry Survey on Climate Change Impacts and Adaptation ", Asariotis, R., Benamara, H. et Mohos-Naray, V. : " Division de la technologie et de la logistique ", Document de recherche de la CNUCED n° 18. UNCTAD/SER.RP/2017/18/Rev.1.

Collins, M., Knutti, R., Arblaster, J., Dufresne, J.-L., Fichet, T., Friedlingstein, P., Gao, X., Gutowski, W.J., Johns, T., Krinner, G., Shongwe, M., Tebaldi, C., Weaver, A.J. et Wehner, M. (2013): " Long term climate change: projections commitments and irreversibility ". In: " Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution du groupe de travail I au cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat" [Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. et Midgley, P.M. (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, États-Unis.
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter12_FINAL.pdf.

De Fries, R., Edenhofer, O., Halliday, A., Heal, G., Lenton, T., Puma, M., Rising, J., Rockström, J., Ruane, A.C., Schellnhuber, H.J., Stainforth, D., Stern, N., Tedesco, M. et Ward, B. (2019) : " The Missing Economic Risks in Assessments of Climate Change Impacts ", Policy insight, septembre 2019.

De Winter, R.C. (2014): " Dune Erosion under Climate Change ", thèse de doctorat, Université d'Utrecht, Pays-Bas.

Fung, F., Palmer, M., Howard, T., Lowe, J., Maisey, P. et Mitchell, J.F.B. (2018): " UKCP18 Factsheet : Sea Level Rise and Storm Surge ", Met Office Hadley Centre, Exeter.

Global Center on Adaptation and World Resources Institute (2019): " Adapt Now: a global call for leadership on climate resilience"- Rapport pour la Commission mondiale sur l'adaptation.

Hawkins, E. and Sutton, R. (2009): "The Potential to Narrow Uncertainty in Regional Climate Predictions", Bulletin of the American Meteorological Society 90(8), 1095-1107.

ImechE (2019): " Rising Seas: The Engineering Challenge ", Institution of Mechanical Engineers, Londres, Royaume-Uni.

GIEC (2012) : " Résumé pour les décideurs ". Dans: " Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation ", Field, C.B. et al. (eds.) : " Rapport spécial du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat WGs I & II ".

GIEC (2013) : " Changements climatiques 2013: The Physical Science Basis", Contribution du groupe de travail I au cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution

du climat [Collins et al. in Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J. Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. et Midgley, P.M. (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, USA, 1535 pp.

GIEC (2014): " Changements climatiques 2014: Rapport de synthèse. Résumé à l'intention des décideurs", Contribution des groupes de travail I, II et III au cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Meyer, L.A. (eds.)], GIEC, Genève, Suisse, 151 pp.

GIEC (2019): " Résumé pour les décideurs ". Dans: "Rapport spécial du GIEC sur l'océan et la cryosphère dans un climat en évolution" [Pörtner, H.-Ö., Roberts, D.C., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Alegría, A., Nicolai, M., Okem, A., Petzold, J., Rama, B., Weyer, N.M. (eds.)].

GIEC (2021): "Résumé pour les décideurs". Dans : " Climate Change 2021 : The Physical Science Basis", Contribution du Groupe de travail I au Sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J.B.R., Maycock, T.K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R. et Zhou, B. (eds.)], In Press.

GIEC (2022): "Climate Change 2022 : Impacts, Adaptation, and Vulnerability", Contribution du groupe de travail II au sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Pörtner, H.-Ö., Roberts, D.C., Tignor, M., Poloczanska, E.S., Mintenbeck, K., Alegría, A., Craig, M., Langsdorf, S., Lösschke, S., Möller, V., Okem, A. et Rama, B. (eds.)], Cambridge University Press, In Press.

Groupe de travail 176-2018 de l'AIPCN: "Guide for applying Working with Nature to navigation infrastructure projects" (Guide pour l'application d'Oeuvrer avec la Nature aux projets d'infrastructure de navigation), Rapport du groupe de travail technique 176 d'EnviCom.

Groupe de travail 178-2020 de l'AIPCN: "Climate change adaptation planning for ports and inland waterways" (Planification de l'adaptation au changement climatique dans les ports et les voies navigables), Rapport du groupe de travail technique 178 d'EnviCom.

Groupe de travail 193-2020 de l'AIPCN (2020): " Resilience of the maritime and inland waterborne transport system" (Résilience du système de transport maritime et fluvial)", Rapport du groupe de travail technique 193.

Lawrence and al. - Lawrence, J., Blackett, P. et Cradock-Henry, N.A. (2020): "Cascading Climate Change Impacts and Implications", Climate Risk Management, Volume 29, 2020, 100234, ISSN 2212-0963, <https://doi.org/10.1016/j.crm.2020.100234>.

Lowe, J.A. and al. - Lowe, J. A., Howard, T. P., Pardaens, A., Tinker, J., Holt, J., Wakelin, S., Milne, G., Leake, J., Wolf, J., Horsburgh, K., Reeder, T., Jenkins, G., Ridley, J., Dye, S. et Bradley, S. (2009) : " UK Climate Projections Science Report : Marine and Coastal Projections", Met Office Hadley Centre, Exeter, UK.

Meinshausen, M., Smith, S.J., Calvin, K. and al. (2011): " The RCP Greenhouse Gas Concentrations and Their Extensions from 1765 to 2300 ", Climatic Change 109, 213, <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0156-z>.

Noble and al. - Noble, I.R., Huq, S., Anokhin, Y.A., Carmin, J., Goudou, D., Lansigan, F.P., Osman-Elasha, B. et Villamizar, A. (2014) : " Adaptation needs and options". In: " Climate Change 2014 : Impacts, adaptation and vulnerability. Part A : Global and Sectoral Aspects", Contribution du Groupe de travail II au cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D., Bilir, T.E., Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y.O., Genova, R.C., Girma, B., Kissel, E.S., Levy, A.N., MacCracken, S., Mastrandrea, P.R. et White, L.L. (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, USA, pp. 833-868.

Peel Ports (2021): " Peel Ports Climate Change Adaptation Report for Port of Sheerness Ltd and Mersey Docks and Harbour Company Ltd. Peel Ports, UK", <https://www.peelports.com/media/ldsif0sl/port-of-sheerness-mersey-docks-and-harbour-company-climate-change-adaptation-report-2021.pdf>.

PNUE (2020): "Emissions Gap Report 2020", Programme des Nations unies pour l'environnement, Nairobi.

Schwalm, C.R., Glendon, S. and Duffy, P.B. (2020) : "RCP8.5 Tracks Cumulative CO₂ Emissions", Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 117 (33) : p.19656-19657.

Sweet, W.V., Kopp, R.E., Weaver, C.P., Obeysekera, J., Horton, R.M., Thieler, E.R. and Zervas, C. (2017) : " Global and regional sea level rise scenarios for the United States", rapport technique de la NOAA NOS CO-OPS 083 ", Washington, DC : Center for Operational Oceanographic Products and Services National Ocean Service, National Oceanic and Atmospheric Administration.

Tröltzsch, J., Rouillard, J., Lago, M. and Smith, L. (2016): " ECONADAPT Toolbox: Summary", ECONADAPT deliverable 10.4., www.econadapt.eu.

Vincent, A.W.J., Marchau, W.E., Walker, E., Bloemen, P.J.T.M. et Popper, S.W. (eds.) (2019): " Decision Making under Deep Uncertainty. From Theory to Practice (Springer)", <https://doi.org/10.1007/978-3-030-05252-2>.

Wade et al. - Wade, S., Sanderson, M., Golding, N., Lowe, J., Betts, R., Reynard, N., Kay, A., Stewart, L., Prudhomme, C., Shaffrey, L., Lloyd-Hughes, B. and Harvey, B. (2015) : " Developing H++ climate change scenarios for heatwaves, drought, floods, windstorms and cold snaps " , MetOffice, Université de Reading et CEH, UK.

Werners, S.E., Wise, R.M., Butler, J.R.A., Totin, E. and Vincent, K. (2021): "Adaptation pathways: a review of approaches and a learning framework", Environmental Science & Policy, Volume 116, Pages 266-275. ISSN 1462-9011, <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.11.003>.

Zandvoort, M., Campos, I.S., Vizinho, A., Penha-Lopes, G., Krkošk Lorencová, E., van der Brugge, R., van der Vlist, M.J., van den Brink, A. and Jeuken, A.B.M. (2017) : " Adaptation pathways in planning for uncertain climate: applications to Portugal, the Czech Republic and the Netherlands", Environmental Science & Policy ; Volume 78, décembre 2017.