

Projet ATLANTIS

**Prise en compte de l'élévation du niveau moyen de
la mer en baie de Seine – état de l'art et
recommandations**

NOTE TECHNIQUE

Octobre, 2024

N° NOVA : 24-RE-0267 / 2024-DTECREM-DREL-ATLANTIS

Produit conçu avec le système de management de la qualité certifié AFAQ ISO 9001

Le Cerema est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique, présent partout en métropole et dans les Outre-mer grâce à ses 26 implantations et ses 2 400 agents. Détenteur d'une expertise nationale mutualisée, le Cerema accompagne l'État et les collectivités territoriales pour la transition écologique, l'adaptation au changement climatique et la cohésion des territoires par l'élaboration coopérative, le déploiement et l'évaluation de politiques publiques d'aménagement et de transport.

Doté d'un fort potentiel d'innovation et de recherche incarné notamment par son institut Carnot Clim'adapt, le Cerema agit dans 6 domaines d'activités : Expertise & ingénierie territoriale, Bâtiment, Mobilités, Infrastructures de transport, Environnement & Risques, Mer & Littoral.

Site web : www.cerema.fr

Projet ATLANTIS

Prise en compte de l'élévation du niveau moyen de la mer en baie de Seine (actualisation des connaissances et recommandations)

Commanditaire : GIP Seine-Aval

Auteure : Vanessya LABORIE

Responsable du rapport

Vanessya LABORIE – Département Risques, Eaux et Littoral – Équipe de Recherche Risques Hydrauliques et Impacts environnementaux à l'Interface Terre-Mer (RHITME)
Tél. : +33(0)3 44 92 60 53
Courrier : vanessya.laborie@cerema.fr
Direction Technique Risques, Eaux et Mer du Cerema – 134 rue de Beauvais – CS 60039 – 60280 Margny-Lès-Compiègne

Historique des versions du document

Version	Date	Commentaire
Version 0		Initiale – soumise à relecture
Version 1	01/10/2024	Corrections après relecture
Version 2	18/10/2024	Corrections après relecture du GIPSA

Références

N° d'affaire : 24-RE-0267

Nom	Service	Rôle	Date	Visa
Vanessya LABORIE	Cerema REM / DREL / RHITME	Auteure principale		
Nicolas HUYBRECHTS	Cerema REM / DREL / RHITME	Relecteur	01/10/2024	
Patrick CHASSE	Cerema REM / DREL / ER	Relecteur		
Matthieu OLIVIER	GIP Seine Aval	Relecteur	16/10/2024	

Résumé de l'étude

Le projet ATLANTIS (AdapTation à L'augmentation de l'Aléa submersioN dans l'esTuaire de la Seine) s'inscrit dans le cadre de l'étude de l'impact du dérèglement climatique sur l'aléa de submersion / inondation dans l'estuaire de la Seine.

Les estuaires sont le siège de forts enjeux économiques (activités industrielles et portuaires) et de sécurité des personnes. Soumis à des processus non-linéaires liés aux forçages hydro-climatiques qui les alimentent, les estuaires sont des zones extrêmement sensibles aux effets du dérèglement climatique, que ce soit de par l'élévation du niveau moyen de la mer ou par la modification du régime des tempêtes ou de débits fluviaux.

L'estuaire de la Seine est particulièrement sensible à l'aléa de submersion fluvio-maritime.

Pour mieux appréhender cet aléa, le GIP Seine Aval a fait construire un modèle hydrodynamique 2D de l'estuaire avec prise en compte des débordements. Ce modèle a permis de caractériser les risques de débordement lié à cet aléa en se basant sur une vingtaine de scénarios (réels ou fictifs) de forçages hydrodynamiques.

Pour prolonger ce travail, il est proposé dans le cadre du projet ATLANTIS d'intégrer des scénarios liés aux évolutions de l'estuaire en termes (1) de changements morphodynamiques à l'horizon 2100 et (2) de schémas d'aménagement par la création de zones d'expansion des eaux estuariennes (ZEEE). Les impacts de ces deux schémas d'évolution de l'estuaire seront évalués vis-à-vis de la caractérisation de l'aléa de submersion fluvio-maritime.

La présente note présente une actualisation des connaissances sur les valeurs de référence à prendre en compte dans le cadre d'études d'impact sur le dérèglement climatique en baie de Seine compte-tenu de la publication du 6^{ème} rapport d'évaluation du GIEC (AR6).

5 à 10 mots clés à retenir de l'étude

Elévation du niveau moyen de la mer	Baie et estuaire de la Seine
Baie de Seine	Normandie
Changement climatique	Manche
Submersion marine	SSP-RCP
Ressources en eaux	

Statut de communication de l'étude

Les études réalisées par le Cerema sur sa subvention pour charge de service public sont par défaut indexées et accessibles sur le portail documentaire du Cerema. Toutefois, certaines études à caractère spécifique peuvent être en accès restreint ou confidentiel. Il est demandé de préciser ci-dessous le statut de communication de l'étude.

- ☒ Accès libre : document accessible au public sur internet (proposition V. LABORIE – 13/09/2024)
- ☐ Accès restreint : document accessible uniquement aux agents du Cerema
- ☐ Accès confidentiel : document non accessible

Cette étude est capitalisée sur la plateforme documentaire [CeremaDoc](https://doc.cerema.fr/depot-rapport.aspx), via le dépôt de document : <https://doc.cerema.fr/depot-rapport.aspx>

Contexte et objet de l'étude

Le projet ATLANTIS (AdapTation à L'augmentation de l'Aléa submersioN dans l'esTuaire de la Seine) s'inscrit dans le cadre de l'étude de l'impact du dérèglement climatique sur l'aléa de submersion / inondation dans l'estuaire de la Seine.

Les estuaires sont le siège de forts enjeux économiques (activités industrielles et portuaires) et de sécurité des personnes. Soumis à des processus non-linéaires liés aux forçages hydro-climatiques qui les alimentent, les estuaires sont des zones extrêmement sensibles aux effets du dérèglement climatique, que ce soit de par l'élévation du niveau moyen de la mer ou par la modification du régime des tempêtes ou de débits fluviaux.

L'estuaire de la Seine est particulièrement sensible à l'aléa de submersion fluvio-maritime.

Pour mieux appréhender cet aléa, le GIP Seine Aval a fait construire un modèle hydrodynamique 2D de l'estuaire avec prise en compte des débordements. Ce modèle a permis de caractériser les risques de débordement lié à cet aléa en se basant sur une vingtaine de scénarios (réels ou fictifs) de forçages hydrodynamiques.

Pour prolonger ce travail, il est proposé dans le cadre du projet ATLANTIS d'intégrer des scénarios liés aux évolutions de l'estuaire en termes (1) de changements morphodynamiques à l'horizon 2100 et (2) de schémas d'aménagement par la création de zones d'expansion des eaux estuariennes (ZEEE). Les impacts de ces deux schémas d'évolution de l'estuaire seront évalués vis-à-vis de la caractérisation de l'aléa de submersion fluvio-maritime.

La présente note présente une actualisation des connaissances sur les valeurs de référence à prendre en compte dans le cadre d'études d'impact sur le dérèglement climatique en baie de Seine compte-tenu de la publication du 6^{ème} rapport d'évaluation du GIEC (AR6).

Table des matières

1	INTRODUCTION	8
1.1	Localisation géographique du bassin versant de la Seine, de son estuaire et de sa baie - principaux enjeux	8
1.1.1	De Poses au Havre	8
1.1.2	Influence de la marée et estuaire de la Seine	8
1.1.3	La Baie de Seine : embouchure du fleuve	9
1.1.4	Les enjeux environnementaux	9
1.2	La problématique des inondations et submersions marines dans l'estuaire de la Seine . .	10
1.3	Les objectifs du projet ATLANTIS	10
2	Etat de l'art et actualisation des connaissances pour la prise en compte des conséquences du dérèglement climatique en baie de Seine	12
2.1	Scénarios SSP et RCP du 6 ^{ème} rapport d'évaluation [Lee et al., 2023]	12
2.1.1	Les scénarios SSP	12
2.2	Etat de l'art sur l'impact du dérèglement climatique sur la ressource en eau	14
2.3	Etat de l'art sur l'élévation du niveau moyen de la mer (MSLR) liée au dérèglement climatique en baie de Seine	15
2.3.1	Mécanismes contributifs à l'élévation du niveau moyen de la mer	15
2.3.2	Etat des connaissances d'après le 6 ^{ème} rapport du GIEC - estimation du niveau moyen d'élévation du niveau de la mer (MSLR)	16
2.3.3	Réglementation en matière de prévention du risque d'inondation et de submersion marine	18
2.3.4	Descente d'échelle sur la baie de Seine	18
2.4	Conclusion sur les valeurs de référence pour le choix de MSLR en baie de Seine	19
A	Les scénarios SSP et RCP du 6^{ème} rapport d'évaluation du GIEC	22
A.1	Les scénarios SSP	22
A.1.1	Des récits aux scénarios :	22
A.1.2	Une architecture en matrice pour utiliser les SSP et RCP :	23
A.1.3	Une architecture en matrice pour utiliser les SSP et RCP :	23
B	Pour aller plus loin...	26

Table des figures

1.1	profil environnemental de Normandie - Zones humides et principaux cours d'eau (source : https://www.normandie.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/3_climat_impacts-risques.pdf)	9
2.1	L'espace d'incertitude, et les cinq scénarios-types. (source : https://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/339 adapté de [O'Neill et al., 2014])	13
2.2	Matrice des scénarios SSP-RCP. Chaque cellule de la matrice indique une combinaison de trajectoire de développement socio-économique (c'est-à-dire un SSP) et de résultat climatique basé sur une trajectoire de forçage particulière (RCP). Les cellules colorées indiquent les scénarios qui ont servi de base aux projections des modèles climatiques du programme CMIP6. (source : https://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/339)	14
2.3	Prédictions de l'élévation du niveau moyen de la mer à horizon 2100 [Lee et al., 2023] .	17
2.4	Prédictions de l'élévation du niveau moyen de la mer à horizon 2100 à Cherbourg selon les derniers scénarios de pression anthropique [Lee et al., 2023]	20
2.5	Prédictions de l'élévation du niveau moyen de la mer à horizon 2100 au Havre selon les derniers scénarios de pression anthropique [Lee et al., 2023]	20
A.1	L'espace d'incertitude, et les cinq scénarios-types. (source : https://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/339 adapté de [O'Neill et al., 2014])	23
A.2	Matrice des scénarios SSP-RCP. Chaque cellule de la matrice indique une combinaison de trajectoire de développement socio-économique (c'est-à-dire un SSP) et de résultat climatique basé sur une trajectoire de forçage particulière (RCP). Les cellules colorées indiquent les scénarios qui ont servi de base aux projections des modèles climatiques du programme CMIP6. (source : https://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/339)	24
A.3	Matrice des scénarios SSP-RCP. Chaque cellule de la matrice indique une combinaison de trajectoire de développement socio-économique (c'est-à-dire un SSP) et de résultat climatique basé sur une trajectoire de forçage particulière (RCP). Les cellules colorées indiquent les scénarios qui ont servi de base aux projections des modèles climatiques du programme CMIP6. (source : https://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/339)	25

Chapitre 1

INTRODUCTION

1.1 Localisation géographique du bassin versant de la Seine, de son estuaire et de sa baie - principaux enjeux

La Seine est l'un des principaux fleuves de France, traversant plusieurs régions avant de se jeter dans la Manche (Fig. 1.1).

La Seine, de Poses à la baie de Seine, est un fleuve à la fois régulé et naturel, influencé par la marée et la dynamique estuarienne. Ses enjeux hydrologiques incluent la régulation des crues, la gestion des sédiments, la pollution, et la protection contre les submersions. L'estuaire de la Seine est également une zone cruciale pour le transport, l'industrie et la biodiversité.

Le tronçon allant de Poses jusqu'à la baie de Seine présente ainsi une variété d'enjeux hydrologiques et de caractéristiques intéressantes.

1.1.1 De Poses au Havre

Poses se situe près de la limite entre la partie fluviale et la partie maritime de la Seine. À cet endroit, un barrage et une écluse permettent de réguler le débit du fleuve pour maintenir un niveau d'eau navigable en aval, surtout pour le transport fluvial et la protection contre les inondations. Les principaux enjeux sont donc les suivants :

- Régulation du débit : Le barrage de Poses est essentiel pour gérer les flux hydrauliques. En amont, on gère l'accumulation des eaux, notamment durant les crues, et en aval, il permet d'éviter des débits trop faibles en période de sécheresse.
- Navigation : La Seine est navigable à partir de ce point jusqu'au Havre, favorisant un important trafic de marchandises.

1.1.2 Influence de la marée et estuaire de la Seine

En aval du barrage de Poses, l'estuaire de la Seine, qui s'étend sur 170 km, du barrages de Poses à la baie de Seine, est influencé par la marée.

Zone de marnage

L'influence des marées se fait sentir de Poses jusqu'à la baie de Seine, avec des variations importantes du niveau d'eau. Ce marnage impacte la gestion des écluses et des infrastructures portuaires.

Estuaire de la Seine

À partir de Honfleur et Le Havre, on entre dans la baie de Seine. C'est une zone de transition entre les eaux douces du fleuve et les eaux salées de la Manche. L'estuaire est un lieu de sédimentation et d'importants dépôts de limons, influencés par les courants marins et les apports du fleuve.

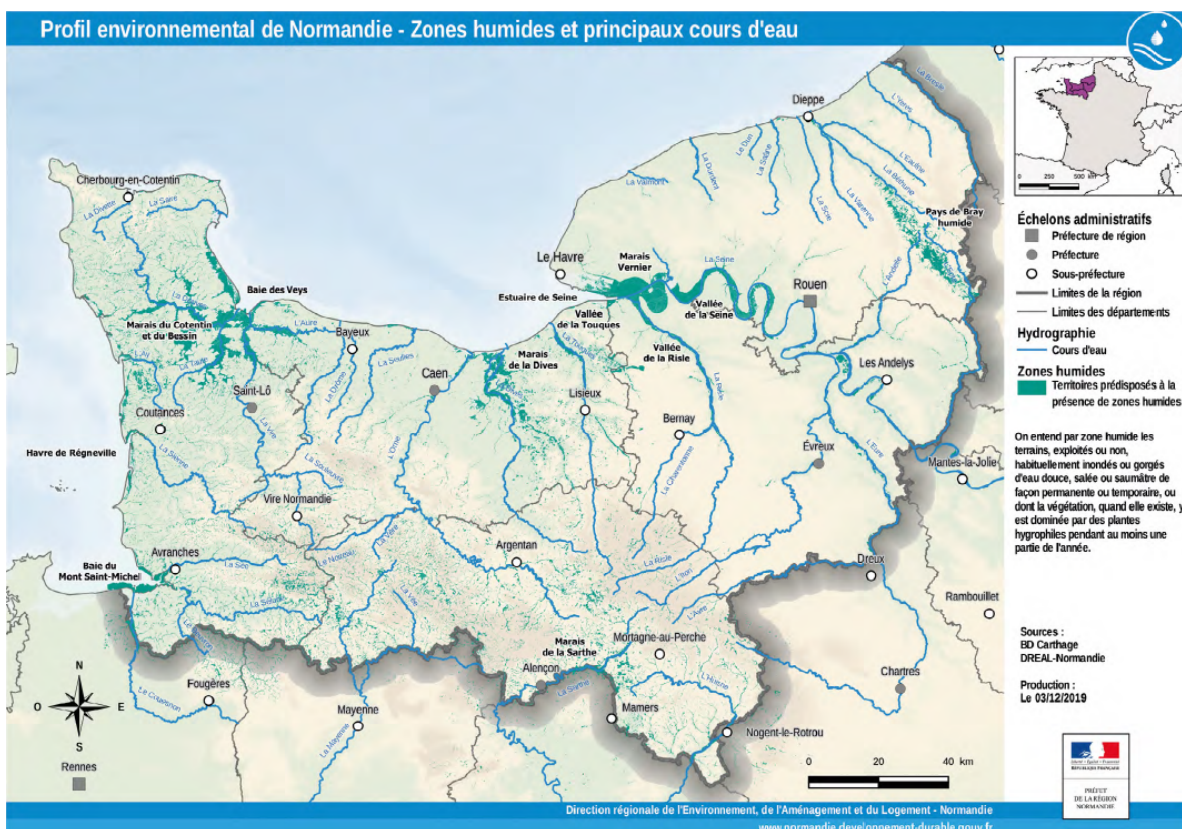


FIGURE 1.1 – profil environnemental de Normandie - Zones humides et principaux cours d'eau (source : https://www.normandie.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/3_climat_impacts-risques.pdf)

1.1.3 La Baie de Seine : embouchure du fleuve

L'embouchure de la Seine se situe dans la baie de Seine, une vaste zone ouverte sur la Manche. C'est une région écologiquement riche et stratégiquement importante pour les échanges économiques.

Les principaux enjeux sont de deux ordres :

- l'hydrodynamique estuarienne : l'interaction entre les eaux fluviales et les marées océaniques crée des dynamiques complexes dans l'estuaire. Les courants marins et les apports du fleuve influencent la répartition des sédiments, créant parfois des bancs de sable ou des zones d'érosion.
- la gestion des risques : L'estuaire de la Seine et la baie sont sujets à des risques de submersion marine, surtout en cas de grandes marées ou de tempêtes. La montée des eaux, accentuée par le changement climatique, est un enjeu croissant pour les populations côtières.

1.1.4 Les enjeux environnementaux

Le parcours de la Seine, de Poses à la baie, présente des défis environnementaux en termes de :

- pollution : la Seine reçoit des effluents industriels et domestiques tout au long de son parcours. L'assainissement des eaux est donc un enjeu majeur, notamment dans les zones urbanisées comme Rouen et Le Havre.
- biodiversité : l'estuaire est un espace écologique sensible. Des efforts sont faits pour protéger la biodiversité, notamment à travers des zones protégées comme la réserve naturelle de l'estuaire de la Seine.

1.2 La problématique des inondations et submersions marines dans l’estuaire de la Seine

L’estuaire de la Seine est un territoire particulièrement sensible aux risques d’inondation ou de submersion. Les facteurs de risques fluviaux ou maritimes varient selon les secteurs. Dans sa partie centrale entre le Havre et Rouen, l’estuaire est soumis à un aléa de concomitance entre forçages marins, fluviaux et météorologiques, complexe à modéliser. Les événements de hautes eaux susceptibles de générer des débordements de la Seine sont ainsi fréquents et, statistiquement, des débordements sont observables tous les ans. L’effet du changement climatique et, en particulier, l’élévation du niveau marin moyen, l’augmentation des débits de crues et l’intensification (en amplitude et fréquence) des tempêtes risque de fortement accroître cet aléa.

Pour appréhender ces risques de submersion, le GIP Seine Aval a fait construire, par Artelia, un modèle hydrodynamique du lit mineur en 2013. Ce modèle a été ensuite élargi au lit majeur entre 2018 et 2022. Lors de cette dernière étude, vingt scénarios ont été considérés : des scénarios réalistes (crue de 1910, tempête de 1999) et fictifs. Les scénarios fictifs simulent des événements de période de retour 30 ans et 100 ans des forçages associés aux secteurs amont, fluvio-maritime amont, fluvio-maritime aval et maritime. En plus des variations de forçages, certains scénarios ont pris en compte l’élévation du niveau marin et la présence/absence de murets anti-inondation.

L’influence du changement climatique a été prise en compte via une augmentation du niveau moyen (1 m, RCP 8.5 à l’horizon 2100) avec une hypothèse de morphologie statique de l’estuaire correspondant à la situation actuelle. En estuaire, les évolutions des équilibres hydro-morpho-sédimentaires (HMS) résultent des interactions entre les forçages hydrodynamiques et les apports sédimentaires. Les précédents travaux Seine-Aval (e.g. Le Hir et Grasso 2019, Lemoine 2021) ont montré qu’à des échelles de temps décennales, ces évolutions étaient de nature à modifier l’hydrodynamisme de l’estuaire en condition « moyenne/non-extrême ». Les modélisations de l’aléa inondations/submersions ont par ailleurs montré que les aménagements et les évolutions de l’estuaire durant le XX^{ème} siècle ont modifié les répercussions d’événements extrêmes, tels que la crue de 1910, et qu’avec les fonds actuels cette dernière aurait maintenant des répercussions moindres. À l’avenir, l’évolution des forçages naturels et anthropiques, et, notamment, la montée progressive du niveau marin, va faire évoluer cet équilibre HMS (Grasso et al. 2020). Ces évolutions auront vraisemblablement des répercussions sur les événements extrêmes qu’il conviendrait de quantifier.

Par ailleurs, les résultats des simulations ont montré que la présence des murets a tendance à augmenter les niveaux d’eau dans l’estuaire. Les murets protègent localement contre une surverse, mais ils peuvent augmenter le risque dans d’autres secteurs de l’estuaire. Ce résultat met en évidence l’importance des aménagements et de leur prise en compte dans les modèles numériques. Par ailleurs, une autre approche de gestion des eaux estuariennes a été testée, sur le site de Kruikeke Bazel Rupelmonde, dans l’estuaire de l’Escaut en Belgique. Le dispositif est constitué de digues situées à un niveau topographique précis et équipées de clapets qui permettent une connexion contrôlée entre lit mineur et lit majeur. Au-dessus d’une cote nominale de niveau d’eau, un transfert d’eau est effectué entre les lits mineur et majeur, créant une zone d’expansion des eaux estuariennes. A marée basse, le transfert d’eau s’inverse du lit majeur vers le lit mineur. Ces zones d’expansion des eaux estuariennes (ZEEE) permettent de protéger des secteurs sensibles comme la ville d’Anvers. Ce type de solution mériterait d’être également testé sur l’estuaire de la Seine pour déterminer son efficacité en termes de protection de différents sites sensibles : l’usine chimique proche des installations portuaires, secteurs densément peuplés.

1.3 Les objectifs du projet ATLANTIS

Le projet ATLANTIS se propose d’explorer l’influence des évolutions de l’estuaire, en termes de changements morphologiques et de schémas d’aménagements, sur la propagation des aléas fluvio-maritimes, en exploitant le modèle hydrodynamique 2D du GIP SA. Plus concrètement, le projet Atlantis permettra :

- d’actualiser le modèle hydrodynamique en tenant compte de l’ensemble des données nouvellement disponibles et des développements réalisés depuis l’étude de 2022. ,
- de déraffiner certaines zones du modèle initial tout en conservant ses performances et d’intégrer les ouvrages traversants principaux dans le modèle identifiés par le GIPSA à partir du projet

CONNECT et des études de danger,

- d’analyser l’impact des évolutions morphologiques sur la caractérisation et l’occurrence des aléas : en intégrant dans le modèle des bathymétries projetées sur la base de scénarios d’évolution morphologique,
- d’analyser l’impact d’aménagement de l’estuaire en créant des zones de connexions entre les lits mineur et majeur (Zone d’expansion d’Expansion des eaux Eaux Estuariennes).

La présente note présente une actualisation des connaissances sur les valeurs de référence à prendre en compte dans le cadre d’études d’impact sur le dérèglement climatique en baie de Seine compte-tenu de la publication du 6ème rapport d’évaluation du GIEC (AR6) [[Lee et al., 2023](#)].

Chapitre 2

Etat de l’art et actualisation des connaissances pour la prise en compte des conséquences du dérèglement climatique en baie de Seine

À partir de 1990, un effort considérable a été déployé pour résumer l’état actuel de nos connaissances sur le climat afin d’atténuer les effets du changement climatique.

Le Groupe d’experts intergouvernemental sur l’évolution du climat (GIEC) est l’organisme des Nations Unies chargé d’évaluer les connaissances scientifiques liées au changement climatique. Le GIEC a été créé pour fournir aux décideurs politiques des évaluations scientifiques régulières sur le changement climatique, ses implications et les risques potentiels futurs. Dans le cadre de cet effort, le GIEC étudie et distille la littérature scientifique et fournit des projections consensuelles sur les niveaux futurs de la mer à travers le monde dans le cadre d’une série de scénarios futurs possibles (voir Section 2.1).

Les rapports du Groupe d’experts intergouvernemental sur l’évolution du climat (GIEC) sont des documents “consensuels” qui reflètent notre compréhension actuelle du changement climatique [Neelin, 2010]. La dernière version des travaux du GIEC, le 6e rapport d’évaluation du groupe de travail I, a été publiée le 9 août 2021.

2.1 Scénarios SSP et RCP du 6^{ème} rapport d’évaluation [Lee et al., 2023]

Cette section est issue du site <https://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/339>

2.1.1 Les scénarios SSP

Dans le cadre de l’AR6, les “Shared Socioeconomic Pathways” (SSP Trajectoires Socio-économiques communes) constituent un nouvel ensemble de scénarios climatiques. Par rapport aux RCP (Representative Concentration Pathways - profils représentatifs d’évolution de concentration de GES) utilisés précédemment, les nouveaux scénarios SSP illustrent différents développements socio-économiques en lien avec les différentes trajectoires des concentrations de gaz à effet de serre dans l’atmosphère. Ces nouveaux scénarios peuvent être utilisés en complément des RCP précédemment définis pour le 5^{ème} rapport du GIEC (AR5 - [Michael and Bruce C., 2019]). Les scénarios SSP correspondent à cinq récits décrivant différentes voies de développement de la société et constituent la base des scénarios. Ils sont décrits en détail en annexe A. Ainsi, comme le montre la Figure 2.1 :

1. SSP1 : La voie durable et “verte” décrit un monde de plus en plus durable.
2. SSP2 : La voie “médiane” ou moyenne extrapole le développement mondial passé et actuel vers l’avenir.

3. SSP3 : Les rivalités régionales.
4. SSP4 : Inégalité.
5. SSP5 : Développement à partir de combustibles fossiles.

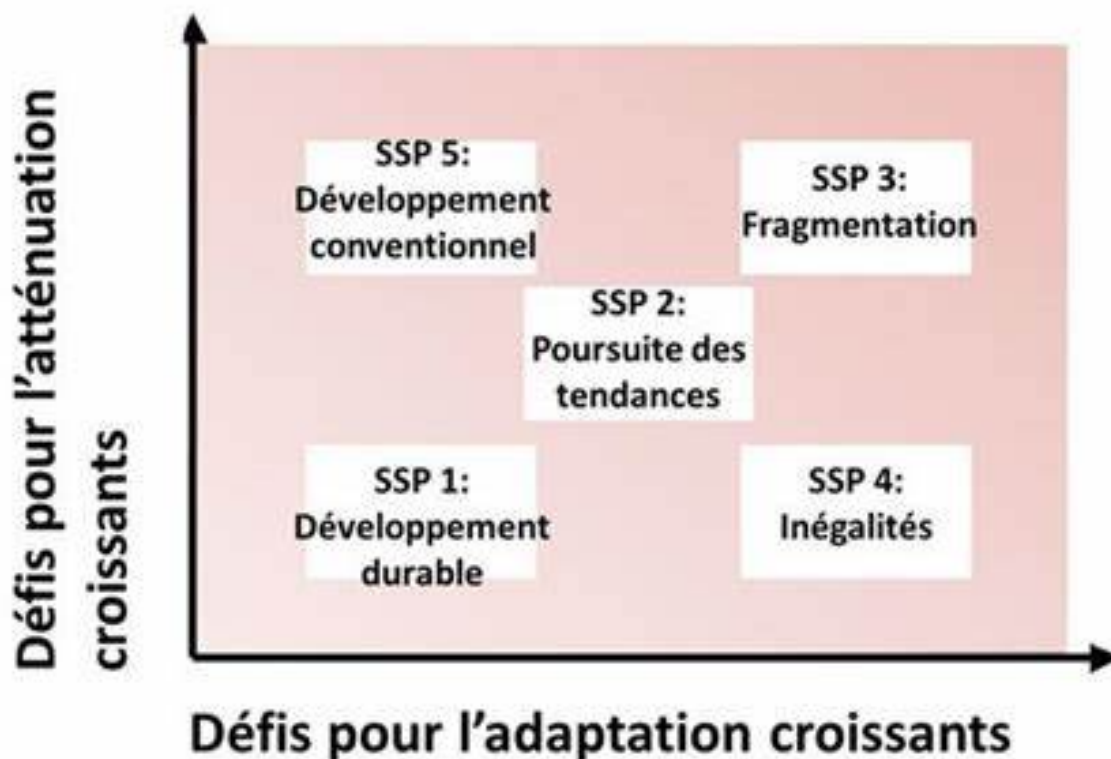


FIGURE 2.1 – L'espace d'incertitude, et les cinq scénarios-types. (source : <https://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/339> adapté de [O'Neill et al., 2014])

Une architecture en matrice pour utiliser les SSP et RCP :

Les scénarios socio-économiques sont ainsi découplés des scénarios climatiques, ce qui permet d'adopter une approche en matrice et décliner, pour chaque scénario d'évolution socio-économique (SSP1, SSP2, etc.), les efforts à consentir (ou coût d'atténuation) à l'échelle mondiale pour parvenir au degré de changement climatique ou plutôt l'intensité du forçage radiatif supplémentaire (dû à l'effet de serre d'origine humaine) correspondant à chaque RCP. La figure 2.2 illustre cette méthodologie.

L'utilisation de développements comparables du forçage radiatif permet une comparaison directe des simulations CMIP5 et CMIP6. Contrairement aux scénarios RCP, les nouveaux scénarios basés sur le SSP fournissent des raisons économiques et sociales pour les trajectoires d'émissions supposées.

La dénomination des scénarios individuels comprend le nom du scénario suivi de deux chiffres indiquant le forçage radiatif supplémentaire atteint d'ici l'année 2100 en unités de dixièmes de watts. Ils sont décrits en détail en annexe A.

En bref, le scénario SSP1-2.6 (resp. SSP5-8.5) représente la limite basse (resp. supérieure) de la gamme des scénarios décrits dans la littérature. SSP1-2.6 est un remake du scénario de faible émission RCP2.6 et a été conçu dans le but de simuler un développement compatible avec l'objectif de 2°C. Ce scénario intègre la mise en œuvre de mesures fortes de réduction des émissions de Gaz à effets de serre (GES). Entre les deux, par ordre d'impact, on trouve : (i) SSP2-4.5, qui représente la trajectoire moyenne des émissions futures de gaz à effet de serre. Ce scénario suppose que des mesures de protection du climat sont prises, (ii) SSP3-7.0, qui se situe dans la partie moyenne supérieure de la gamme complète des scénarios. Il a été nouvellement introduit après les scénarios RCP, comblant ainsi l'écart entre RCP6.0 et RCP8.5.

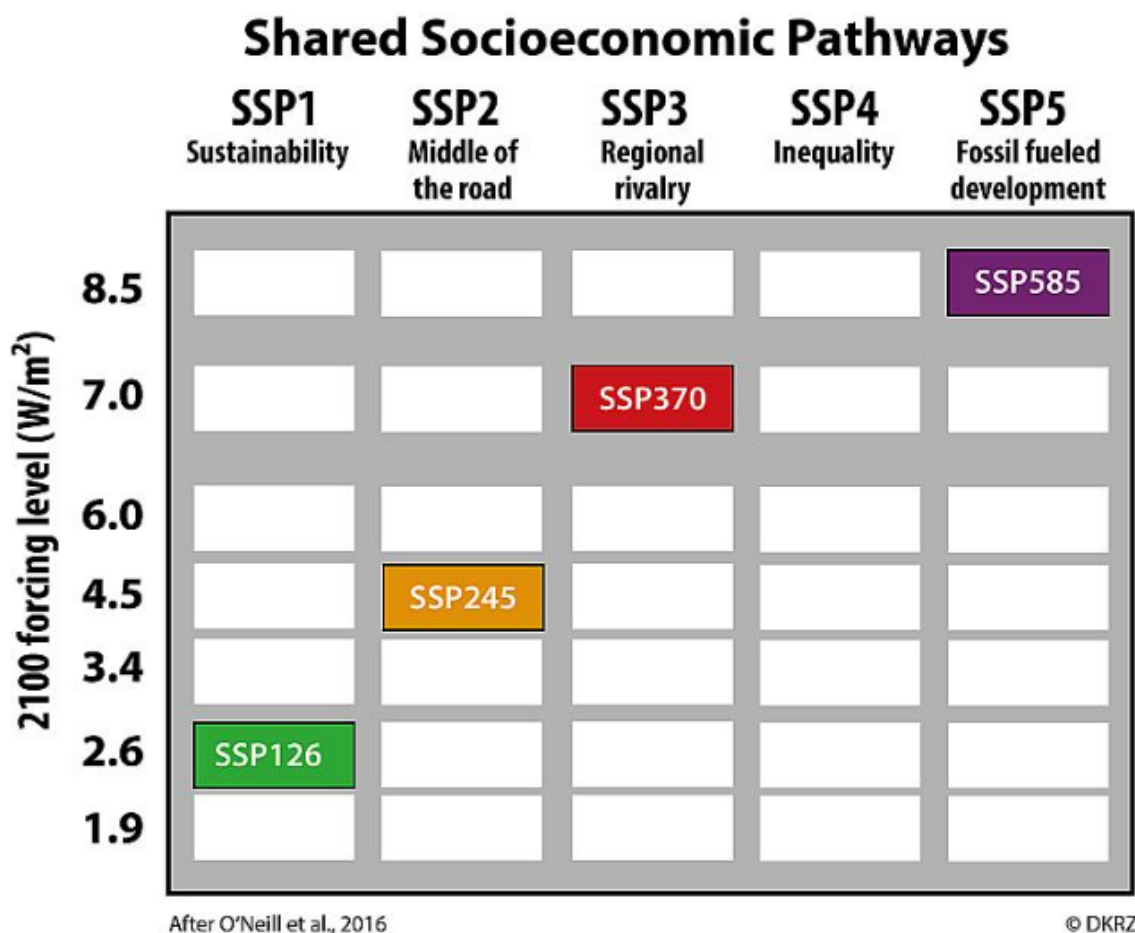


FIGURE 2.2 – Matrice des scénarios SSP-RCP. Chaque cellule de la matrice indique une combinaison de trajectoire de développement socio-économique (c'est-à-dire un SSP) et de résultat climatique basé sur une trajectoire de forçage particulière (RCP). Les cellules colorées indiquent les scénarios qui ont servi de base aux projections des modèles climatiques du programme CMIP6. (source : <https://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/339>)

La figure A.3 illustre l'évolution temporelle du forçage radiatif anthropique supplémentaire résultant des scénarios sélectionnés. Par rapport au niveau préindustriel, le forçage radiatif d'aujourd'hui a augmenté de 2,5 watts.

2.2 Etat de l'art sur l'impact du dérèglement climatique sur la ressource en eau

Plusieurs études ont abordé la problématique du changement climatique sur les ressources en eau en France et plus particulièrement dans le bassin versant de la Seine.

Dans le cadre du projet Explore2070, une évaluation des impacts possibles des changements climatiques sur les eaux de surface à l'horizon 2046-2065 par rapport à un état de référence 1961-1990 a été réalisée par [Chauveau et al., 2013] en France métropolitaine et sur les départements d'Outre-Mer sur la base du scénario d'émission de gaz à effet de serre A1B (CMIP4), de sept modèles climatiques et deux modèles hydrologiques (Isba-Modcou et GR4J). Isba-Modcou et GR4J sont respectivement des modèles à base physique et plus conceptuels (réservoirs). Le projet est fondé sur 4 scénarios de changement climatique. 1557 bassins versants sur toute la France ont été étudiés.

Sur la métropole, les résultats obtenus indiquaient : (1) une augmentation possible des températures moyennes annuelles de l'air de l'ordre de +1,4°C à +3°C ; (2) une évolution incertaine des précipitations,

la plupart des modèles s'accordant cependant sur une tendance à la baisse des précipitations en été sur l'ensemble de la métropole ; (3) une diminution significative globale des débits moyens annuels à l'échelle du territoire, de l'ordre de 10 % à 40 %, particulièrement prononcée sur le district Seine-Normandie ; (4) pour une grande majorité des cours d'eau, une baisse prononcée des débits d'étiage ; (5) des évolutions plus hétérogènes et globalement moins importantes sur les crues. Une attention particulière a été donnée à l'évaluation des incertitudes associées à ces résultats, ce qui permet de mieux évaluer le niveau de signification des évolutions projetées.

Le projet a également accordé une attention particulière au risque d'inondations, dont l'évolution est moins certaine et plus hétérogène selon les zones. Plusieurs zones souffriront d'oscillations extrêmes des débits avec des crues plus importantes et des sécheresses plus sévères.

Il faut noter que d'autres études, antérieures au projet Explore2070, ont traité de la quantification des impacts des changements climatiques sur les eaux de surface, en France notamment. Ainsi, [Boe, 2007] et de [Boé et al., 2009] mettaient en oeuvre une chaîne de modélisation uniforme sur l'ensemble du territoire français. Des projections hydrologiques ont également été obtenues par [Habets et al., 2008]. Par ailleurs, de nombreuses études, comme le projet RExHySS sur la Seine et la Somme [Ducharne et al., 2011], ont également été menées à l'échelle de districts hydrographiques ou grands bassins français. Une synthèse a été ainsi réalisée par [Perrin et al., 2011].

L'un des points communs aux études précédentes reste la très grande incertitude dans la simulation des débits d'étiage. L'un des problèmes majeurs à cet égard est, en effet, de prendre en compte l'interaction surface-eaux souterraines. Selon [Pushpalatha et al., 2013], lors des débits d'étiage, les flux se produisent à travers le lit mineur où, soit l'aquifère alimente la rivière (soutien d'étiage), soit, à l'inverse, la rivière peut "fuir" vers l'aquifère. Plusieurs études ont examiné cette question : [Anderson et al., 2004] a suggéré l'ajout de fonctions qui représentent l'écoulement canal-aquifère ; [Herron and Croke, 2009] a étudié l'incorporation de telles fonctions dans les modèles pluie-débits existants. [Lang et al., 2008] a montré que l'ajout d'un nouveau réservoir de routage peut améliorer les résultats de la simulation, en particulier pour les débits d'étiage. Si les résultats de ces études montrent qu'il est possible d'améliorer la simulation pour les faibles débits, ils soulignent la complexité de tels processus et que les résultats obtenus doivent toujours être manipulés avec précaution.

Plus récemment, [Flipo et al., 2020] présente une analyse approfondie des tendances passées, actuelles et futures du bilan hydrique dans le bassin de la Seine, tout en soulignant l'importance cruciale d'une gestion durable dans un contexte de changement climatique. L'article examine les flux d'eau entrants et sortants du bassin de la Seine, incluant la pluie, l'évaporation, les écoulements souterrains, et les prélèvements anthropiques pour l'agriculture, l'industrie, et l'eau potable. L'une des conclusions majeures est l'influence du réchauffement climatique sur les ressources hydriques. [Flipo et al., 2020] montre comment l'augmentation des températures et les modifications des régimes de précipitations affectent la disponibilité de l'eau dans le bassin de la Seine. L'article met en évidence les projections futures des ressources en eau, en tenant compte des scénarios de changement climatique. L'augmentation des températures et la modification des régimes de précipitations affecteront les débits fluviaux, avec des périodes plus marquées de sécheresses estivales et des risques accrus d'inondations en hiver. A Vernon, le QMNA5 (débit annuel minimal de période de retour 5 ans, indicateur des événements de type sécheresse) (resp. le débit moyen annuel, indicateur de crues) diminuerait (resp. augmenterait) de 5 % (resp. 5 %).

2.3 Etat de l'art sur l'élévation du niveau moyen de la mer (MSLR) liée au dérèglement climatique en baie de Seine

Dans un climat de réchauffement/dérèglement climatique, le niveau de la mer dans le monde entier augmente et devrait continuer à augmenter à l'avenir. Les projections de l'élévation future du niveau de la mer sont essentielles pour les planificateurs côtiers et les décideurs politiques qui tentent de comprendre et de prendre en compte les impacts du niveau de la mer sur leurs communautés. Comprendre la science, déterminer les projections à utiliser et avoir accès à ces projections et aux données sous-jacentes sont des défis que les parties prenantes doivent relever.

2.3.1 Mécanismes contributifs à l'élévation du niveau moyen de la mer

L'élévation du niveau moyen de la mer peut être attribuée à deux composantes principales :

- **composante non-océanique** : elle comprend la contribution en eau douce dans les océans et peut être divisée comme suit (informations tirées du [BRGM Regional sea-level demonstrator](#)) :
 1. **Glace dynamique du Groenland et de l’Antarctique** : il s’agit des changements dans le débit dynamique de la calotte glaciaire du Groenland à travers le vêlage et la fonte des glaciers marins, la percolation de l’eau de fonte vers le substrat rocheux et la rétroaction de l’écoulement des glaces et du bilan de masse en surface.
 2. **Bilan de masse de surface (BMS)** : il s’agit de la différence entre l’accumulation de neige et la fonte ou la sublimation de la neige et de la glace (ablation). Le BMS est affecté par les précipitations qui augmentent la masse de la calotte glaciaire et par une chaleur plus importante qui entraîne la fonte et donc la perte de masse. Le BMS exclut le vêlage et la fonte des glaciers situés en zone marine.
 3. **Fonte des glaciers** : la contribution des glaciers inclut la fonte des glaciers et des calottes glaciaires, à l’exclusion des calottes glaciaires du Groenland et de l’Antarctique.
 4. **Composantes des eaux souterraines** : les échanges entre les eaux océaniques et terrestres comprennent l’épuisement des eaux souterraines, qui contribue à l’élévation du niveau de la mer, et une contribution négative via l’augmentation du stockage des eaux terrestres en raison des barrages. Au cours du 21^{ème} siècle, la contribution “eaux souterraines” devrait dominer la contribution des eaux terrestres à l’élévation du niveau de la mer.
- **les composantes océaniques** : elles peuvent être décomposées en deux éléments principaux :
 - **le changement global du niveau thermostérique moyen de la mer** : il inclut l’augmentation du niveau moyen de la mer due à la dilatation thermique des océans (variable “zostoga” dans le projet de comparaison de modèles couplés (CMIP)).
 - **la hauteur de la surface de la mer au-dessus du géoïde** : il s’agit de l’augmentation de la hauteur de la surface de la mer à un point spécifique due à la correction barométrique inverse appliquée (variable “zos” dans le projet CMIP).

Selon le rapport du GIEC, la somme des contributions des glaciers et des calottes glaciaires est désormais la principale source de l’élévation du niveau moyen de la mer à l’échelle mondiale (degré de confiance très élevé). Un résumé des différentes contributions de chaque composante est disponible dans le tableau 2.1.

Source	1901–1990	1970–2015	1993–2015	2006–2015
<i>Observed contribution to GMSL rise</i>				
Thermal expansion		0.89 (0.84–0.94) ^a	1.36 (0.96–1.76) ^a	1.40 (1.08–1.72) ^a
Glaciers except in Greenland and Antarctica	0.49 (0.34–0.64) ^b	0.46 (0.21–0.72) ^o	0.56 (0.34–0.78) ^p	0.61 (0.53–0.69) ⁿ
GIS including peripheral glaciers	0.40 (0.23–0.57) ^c		0.46 (0.21–0.71) ^d	0.77 (0.72–0.82) ^d
Antarctica ice sheet including peripheral glaciers			0.29 (0.11–0.47) ^e	0.43 (0.34–0.52) ^e
Land water storage	–0.12 ^f	–0.07 ^f	0.09 ^f	–0.21 (–0.36–0.06) ^g
Ocean mass				2.23 (2.07–2.39) ^h
Total contributions			2.76 (2.21–3.31)ⁱ	3.00 (2.62–3.38)^j
Observed GMSL rise from tide gauges and altimetry	1.38 (0.81–1.95)	2.06 (1.77–2.34)^j	3.16 (2.79–3.53)^k	3.58 (3.10–4.06)^k
<i>Modelled contributions to GMSL rise</i>				
Thermal expansion	0.32 (0.04–0.60)	0.97 (0.45–1.48)	1.48 (0.86–2.11)	1.52 (0.96–2.09)
Glaciers	0.53 (0.38–0.68)	0.73 (0.50–0.95)	0.99 (0.60–1.38)	1.10 (0.64–1.56)
Greenland SMB	–0.02 (–0.05–0.02)	0.03 (–0.01–0.07)	0.08 (–0.01–0.16)	0.12 (–0.02–0.26)
Total including land water storage and ice discharge ^l	0.71 (0.39–1.03)	1.88 (1.31–2.45)	3.13 (2.38–3.88)	3.54 (2.79–4.29)
Residual with respect to observed GMSL rise^m	0.67 (0.02–1.32)	0.18 (–0.46–0.82)	0.03 (–0.81–0.87)	0.04 (–0.85–0.93)

TABLE 2.1 – Taux d’augmentation du niveau de la mer pour différentes composantes en mm/an (Rapport spécial du GIEC [Michael and Bruce C., 2019]).

2.3.2 Etat des connaissances d’après le 6^{ème} rapport du GIEC - estimation du niveau moyen d’élévation du niveau de la mer (MSLR)

Selon le rapport spécial du GIEC (AR6 Synthesis Report (SYR) - [Lee et al., 2023]), l’influence humaine a incontestablement réchauffé l’atmosphère, les océans et les terres. Le niveau moyen mondial

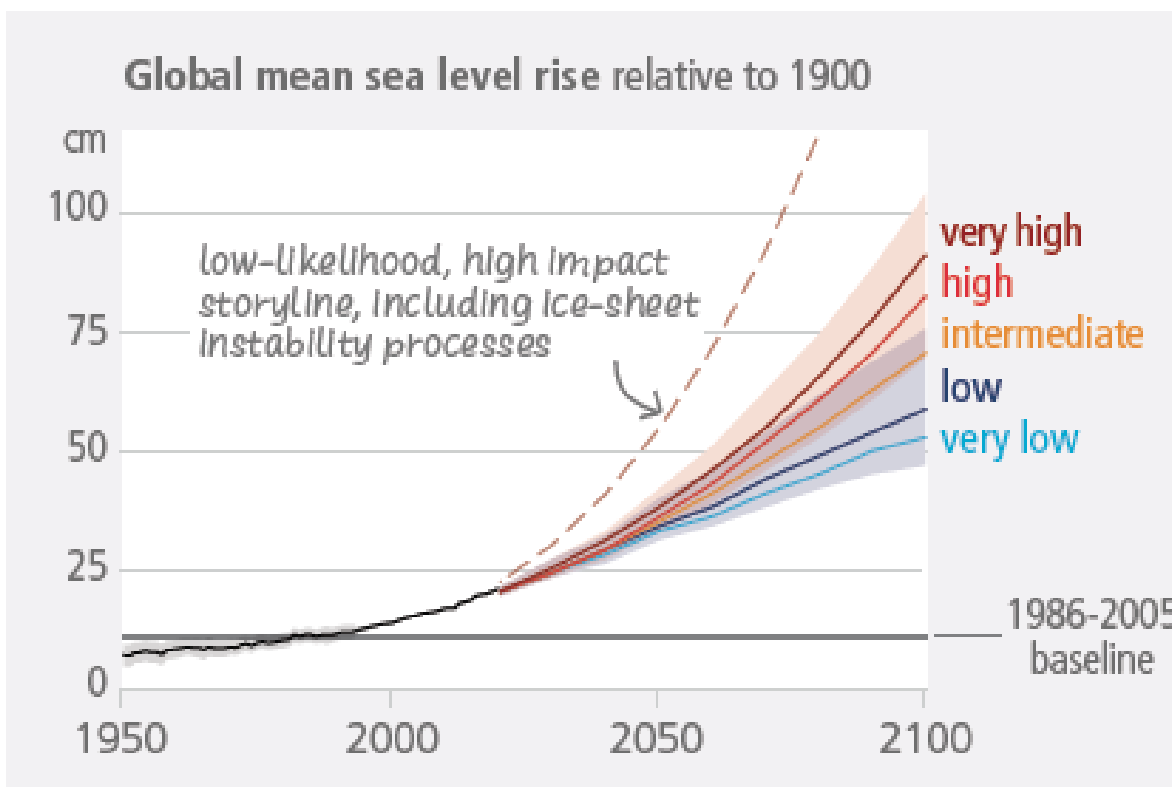


FIGURE 2.3 – Prédications de l’élévation du niveau moyen de la mer à horizon 2100 [Lee et al., 2023]

de la mer a augmenté de 0,20 [0,15 à 0,25] m entre 1901 et 2018. Le taux moyen d’élévation du niveau de la mer était de 1,3 [0,6 à 2,1] mm.an⁻¹ entre 1901 et 1971, augmentant à 1,9 [0,8 à 2,9] mm.an⁻¹ entre 1971 et 2006, puis augmentant encore à 3,7 [3,2 à 4,2] mm.an⁻¹ entre 2006 et 2018. L’influence humaine a très probablement été le principal moteur de ces augmentations depuis au moins 1971. Les preuves des changements observés en matière d’extrêmes tels que les vagues de chaleur, les fortes précipitations, les sécheresses et les cyclones tropicaux, et, en particulier, leur attribution aux activités humaines, se sont encore renforcées depuis le cinquième rapport d’évaluation (AR5). L’influence humaine a probablement augmenté le risque d’événements extrêmes complexes depuis les années 1950, notamment l’augmentation de la fréquence des vagues de chaleur de manière concomitante avec des événements de sécheresse.

Selon le rapport spécial du GIEC sur l’océan et la cryosphère dans un climat en évolution (Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate) [IPCC, 2019] et le dernier rapport [Lee et al., 2023], le niveau moyen mondial des mers augmentera entre 0.29 m et 1.1 m d’ici la fin de ce siècle. Même si le niveau global des mers continuera à augmenter à l’avenir, comme le montre la Fig. 2.3, cette augmentation est largement corrélée à l’augmentation des gaz à effet de serre dans les années à venir.

Les changements régionaux du niveau de la mer ne sont cependant pas uniformes géographiquement : selon les observations de [Bindoff et al., 2007, Cazenave and Le Cozannet, 2014, Yin, 2012], le niveau de la mer dans l’océan Pacifique occidental et l’océan Indien oriental a augmenté beaucoup plus rapidement que la moyenne mondiale au cours de la dernière décennie.

L’impact de l’élévation du niveau moyen de la mer sur les zones côtières peut être résumé comme suit (d’après le rapport technique du GIEC-2019 [Michael and Bruce C., 2019]) : a) submersion permanente des terres près de la côte, b) inondations plus fréquentes et plus intenses, c) érosion côtière accrue, d) perte et modification des écosystèmes côtiers, e) salinisation des sols, des eaux souterraines et de surface, et f) drainage entravé.

Dans la mesure où les changements régionaux du niveau moyen de la mer ont un impact direct sur les infrastructures, les populations et les (hydro-)systèmes côtiers, l’évaluation quantitative de ce changement et de son impact est essentielle pour que les communautés côtières puissent s’adapter aux

nouveaux niveaux de la mer.

2.3.3 Réglementation en matière de prévention du risque d'inondation et de submersion marine

En matière d'élaboration de Plans de prévention des risques naturels, de type risques d'inondation et/ou de submersions marines, un certain nombre de prescriptions sont fournies par le Ministère en charge de l'écologie et du développement durable pour la prise en compte du dérèglement climatique [TERRITOIRES, 2024b, TERRITOIRES, 2024a].

Relativement à la prise en compte du niveau de la mer pour la submersion marine, les modalités d'application du décret PPRi (MTES, novembre 2019) précisent (page 3) que :

1. la prise en compte de l'élévation du niveau de la mer liée au changement climatique est indispensable. En effet, une ville est construite pour un, voire plusieurs siècles et, du fait du changement climatique, l'aléa d'aujourd'hui n'est pas celui de demain. Cette évolution doit donc être anticipée. Dans le cas de l'aléa de référence pour la submersion marine, une hauteur supplémentaire de 20 cm est donc intégrée afin de tenir compte de l'élévation du niveau moyen de la mer, due aux conséquences à court terme du changement climatique, conformément à l'article R. 562-11-3 du Code de l'environnement.
2. De plus, outre la carte de l'aléa de référence, une deuxième carte d'aléa doit être élaborée afin de prendre en compte l'impact du changement climatique à échéance 100 ans : la carte de l'aléa à échéance 100 ans. Cet aléa à échéance 100 ans correspond à l'aléa de référence, auquel est ajoutée une hauteur supplémentaire d'au moins 40 cm (soit un total de 60 cm par rapport au niveau moyen actuel). Les modalités d'application du décret précisent que, dans le cas où la connaissance et les études locales montrent que la hausse du niveau de la mer d'ici 100 ans sera supérieure à 60 cm sur le secteur couvert par le PPR, une élévation supérieure à 60 cm pourra être retenue pour l'élaboration de la carte d'aléa.

Il faut noter que la direction générale de la prévention des risques (DGPR) prépare l'adaptation des référentiels de la prévention des risques naturels dans le cadre du troisième plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC). Pour ce qui concerne les inondations par débordement de cours d'eau, ce travail s'appuie sur les études du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) et celles plus locales d'opérateurs de l'État (Météo-France et Inrae notamment). Il devrait aboutir en 2024 et 2025 à une mise à jour dans la méthodologie d'élaboration de l'aléa de référence des PPRi, et notamment des scénarios de référence, afin de prendre en compte la valeur de la trajectoire de réchauffement de référence pour l'adaptation au changement climatique (TRACC) pour 2100, correspondant à un réchauffement de +4° C en métropole.

2.3.4 Descente d'échelle sur la baie de Seine

Un certain nombre de travaux se sont intéressés à l'impact du dérèglement climatique en Manche et, plus spécifiquement, en baie de Seine, en incluant la rivière et l'estuaire. Les hypothèses retenues par deux d'entre elles respectivement issues de pratiques du Cerema (étude de submersions marines à Wissant [CEREMA, 2023] et par le GIPSA [Fisson and Lemoine, 2016] sont déclinées ici.

Retour d'expertises du Cerema sur la façade Atlantique

Dans [CEREMA, 2023], en suivant les règles d'inconstructibilité de la loi Climat et Résilience, l'étude se porte aux horizons 2050 et 2120. Les analyses sont aussi réalisées à l'horizon 2300. Le scénario de modélisation de changement climatique appliqué est le RCP8.5, scénario représentant la plus forte augmentation future de la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, du Rapport Spécial du GIEC de 2019, seul disponible au commencement de l'étude. Ce choix a permis d'étudier la limite d'extension maximale des aléas recul du trait de côte et submersion marine et d'avoir une marge pour une possible future évolution des estimations d'élévation du niveau marin. Toujours dans l'hypothèse maximale, l'étude porte sur une élévation du niveau marin de 0,40 m en 2050 et de 1,20 m en 2120. Les projections de ces élévations seront couplées avec les projections de recul du trait de côte aux mêmes échéances temporelles.

Hypothèses de MSLR dans [ARTELIA, 2021, Fisson and Lemoine, 2016]

Dans le cadre des travaux de modélisation de scénarios théoriques commandités par le GIP Seine Aval, 126 scénarios théoriques ont été définis et modélisés [Fisson and Lemoine, 2016, ARTELIA, 2021]. Plusieurs scénarios d'élévation du niveau moyen de la mer sont pris en compte dans les scénarios dits "fictifs". Ces simulations ont ainsi été faites en faisant varier le niveau marin de son niveau actuel à + 1,2 m. Les simulations ont été réalisées dans des conditions de débits de la Seine à Poses constants pendant la durée des scénarios (5 jours). La plage de débit simulée s'étend de $400 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ à $2\,000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ avec un pas de $200 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Ces débits sont représentatifs de la plage de variation des débits de la Seine à Poses. Au final, sept valeurs d'élévation du niveau marin ont été testées pour neuf débits constants de la Seine à Poses pour deux coefficients de marée 78 et 106.

Actualisation des connaissances compte-tenu du 6^{ème} rapport d'évaluation du GIEC (AR6 - [Lee et al., 2023]).

L'évaluation la plus récente de l'élévation du niveau moyen de la mer et qui concatène les simulations issues des travaux ayant abouti au 6^{ème} rapport du GIEC est disponible sous la forme d'un outil de projection du niveau moyen de la mer.

L'outil de projection du niveau de la mer de la NASA permet aux utilisateurs de visualiser et de télécharger les données de projection du niveau de la mer du 6^e rapport d'évaluation du GIEC (AR6). L'objectif de cet outil est de fournir un accès et une visualisation faciles et améliorés aux projections consensuelles trouvées dans le rapport. Le public cible est destiné à être large, permettant à un public général et aux scientifiques d'interagir avec les informations contenues dans l'AR6.

L'outil permet aux utilisateurs de visualiser les projections mondiales et régionales du niveau de la mer de 2020 à 2150, ainsi que la manière dont ces projections diffèrent en fonction du scénario futur ou du niveau de réchauffement. Les utilisateurs peuvent cliquer sur un point n'importe où dans l'océan pour obtenir la projection du GIEC du niveau de la mer pour cet emplacement individuel. Les contributions des différents processus physiques à l'élévation future du niveau de la mer sont également fournies, indiquant quels processus seront les principaux moteurs du niveau futur de la mer pour un emplacement donné. Enfin, les utilisateurs peuvent télécharger les données de projection du niveau de la mer du sixième rapport d'évaluation du GIEC dans plusieurs formats. Les projections présentées dans l'outil sont cohérentes avec celles du sixième rapport d'évaluation du GIEC et les informations contenues dans l'outil sont directement liées au rapport.

Le lien est le suivant pour le Havre et également disponible pour Cherbourg (en sortie de la baie de Seine) : https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool?psmsl_id=453&data_layer=scenario.

Les figures 2.4 (resp. 2.5) représentent les prédictions à horizon 2100 à Cherbourg (resp. au Havre) proposées par l'outil de projection du niveau de la mer de la NASA et fondées sur les différentes hypothèses SSP-RCP de l'AR6.

Les valeurs pour différentes échéances (2040, 2050, 2060, 2070, 2080, 2090 et 2100) sont récapitulées dans le tableau 2.2 pour la station du Havre.

2.4 Conclusion sur les valeurs de référence pour le choix de MSLR en baie de Seine

Au vu de ces éléments, les valeurs de référence d'élévation du niveau moyen de la mer par rapport à la période temporelle de référence [1985 ; 2014] sont comprises entre 0,27 et 0,33 (resp. 0,45 cm et 0,77 cm) à horizon 2060 (resp. 2100), en considérant les scénarios SSP2-RCP4.5 et SSP5-RCP8.5, généralement pris en compte dans les études prospectives.

D'un point de vue réglementaire, il est conseillé de prendre en considération dans les scénarios d'aménagement une valeur supérieure de 60 cm à l'aléa de période de retour 100 ans. Il est donc pertinent et justifié de considérer comme MSLR toute valeur supérieure à 77 cm.

Une élévation du niveau moyen de la mer de 1 m va dans le sens de la sécurité et est justifiée dans un cadre d'étude prospective de l'aléa "submersions marines" de telle sorte que l'évaluation des impacts des aménagements envisagés soient valides même pour les scénarios prospectifs les plus pessimistes (SSP5-RCP8.5) et à horizon 2150. En effet, (i) elle est proche de la limite supérieure de l'intervalle

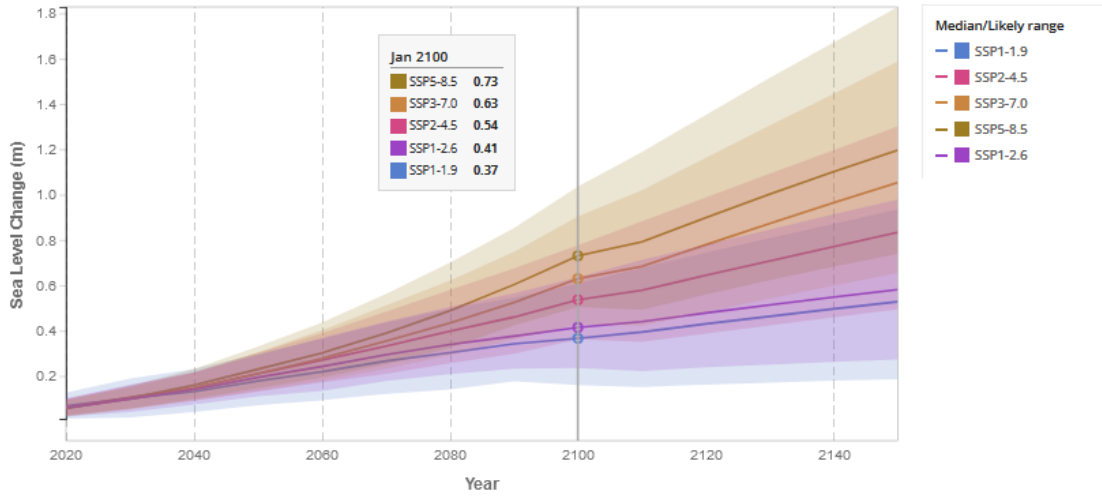


FIGURE 2.4 – Prédications de l'élévation du niveau moyen de la mer à horizon 2100 à Cherbourg selon les derniers scénarios de pression anthropique [Lee et al., 2023]

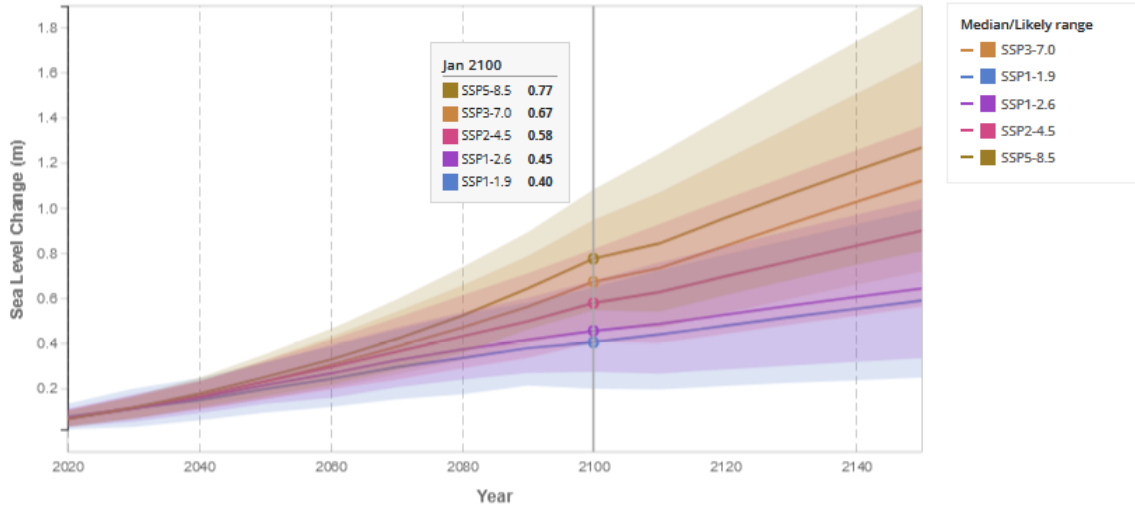


FIGURE 2.5 – Prédications de l'élévation du niveau moyen de la mer à horizon 2100 au Havre selon les derniers scénarios de pression anthropique [Lee et al., 2023]

de confiance à 87 % à horizon 2100 pour le scénario pessimiste SSP5-RCP8.5 et (ii) se situe dans les intervalles de confiance à 87 % pour l'horizon 2150 pour tous les scénarios SSP-RCP de l'AR6 [Lee et al., 2023].

SSP-RCP	2030	2040	2050	2060	2070
SSP1-1.9	0.11 (0.03–0.20)	0.15 (0.06–0.24)	0.20 (0.09–0.32)	0.24 (0.12–0.39)	0.29 (0.15–0.46)
SSP1-2.6	0.11 (0.05–0.17)	0.16 (0.09–0.23)	0.21 (0.13–0.31)	0.27 (0.16–0.39)	0.32 (0.20–0.47)
SSP2-4.5	0.12 (0.07–0.17)	0.16 (0.11–0.23)	0.23 (0.15–0.32)	0.29 (0.20–0.41)	0.36 (0.24–0.51)
SSP3-7.0	0.11 (0.06–0.16)	0.16 (0.11–0.23)	0.23 (0.15–0.33)	0.30 (0.20–0.43)	0.38 (0.26–0.54)
SSP5-8.5	0.11 (0.07–0.17)	0.18 (0.12–0.25)	0.25 (0.17–0.35)	0.33 (0.22–0.46)	0.42 (0.28–0.59)
SSP-RCP	2080	2090	2100	2150	
SSP1-1.9	0.33 (0.17–0.53)	0.38 (0.21–0.58)	0.40 (0.20–0.65)	0.59 (0.25–0.99)	
SSP1-2.6	0.37 (0.24–0.54)	0.41 (0.27–0.60)	0.45 (0.27–0.68)	0.64 (0.33–1.04)	
SSP2-4.5	0.43 (0.29–0.61)	0.50 (0.34–0.71)	0.58 (0.40–0.82)	0.90 (0.56–1.36)	
SSP3-7.0	0.47 (0.33–0.66)	0.56 (0.40–0.79)	0.67 (0.47–0.94)	1.12 (0.72–1.65)	
SSP5-8.5	0.52 (0.36–0.73)	0.64 (0.46–0.89)	0.77 (0.55–1.08)	1.27 (0.81–1.89)	

TABLE 2.2 – Prédiction de l’élévation du niveau moyen de la mer au Havre aux horizons 2030, 2040, 2050, 2060, 2070, 2080, 2090 et 2100 (source : https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool?psmsl_id=453&data_layer=scenario). Les valeurs entre parenthèses correspondent aux percentiles 17 et 83.

Annexe A

Les scénarios SSP et RCP du 6^{ème} rapport d'évaluation du GIEC

Cette annexe est extraite du site du DRIAS (<https://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/339>)

A.1 Les scénarios SSP

Un nouvel ensemble de scénarios climatiques a été développé dans le cadre du sixième rapport du GIEC (IPCC AR6), les "Shared Socioeconomic Pathways" (SSP Trajectoires Socio-économiques communes). Par rapport aux RCP utilisés précédemment, les nouveaux scénarios SSP illustrent différents développements socio-économiques en lien avec les différentes trajectoires des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Ces nouveaux scénarios peuvent être utilisés en complément des RCP précédemment définis pour le 5e rapport du GIEC.

A.1.1 Des récits aux scénarios :

Cinq récits décrivant différentes voies de développement de la société ont été conçus et constituent la base des scénarios dits SSP (Shared Socioeconomic Pathways) :

1. SSP1 : La voie durable et "verte" décrit un monde de plus en plus durable. Les biens communs mondiaux sont préservés, les limites de la nature sont respectées. L'accent est mis sur le bien-être humain plutôt que sur la croissance économique. Les inégalités de revenus entre les États et au sein des États sont réduites. La consommation est orientée vers la minimisation de l'utilisation des ressources matérielles et de l'énergie.
2. SSP2 : La voie "médiane" ou moyenne extrapole le développement mondial passé et actuel vers l'avenir. Les tendances en matière de revenus dans les différents pays divergent considérablement. Il existe une certaine coopération entre les États, mais elle s'étend à peine. La croissance démographique mondiale est modérée et se stabilise dans la seconde moitié du siècle. Les systèmes environnementaux sont confrontés à une certaine dégradation.
3. SSP3 : Les rivalités régionales. Un regain de nationalisme et de conflits régionaux relègue les questions mondiales au second plan. Les politiques se concentrent de plus en plus sur les questions de sécurité nationale et régionale. Les investissements dans l'éducation et le développement technologique diminuent. Les inégalités augmentent. Certaines régions subissent des dommages environnementaux considérables.
4. SSP4 : Inégalité. Le fossé se creuse entre les sociétés développées qui coopèrent au niveau mondial et celles qui stagnent à un stade de développement inférieur, avec de faibles revenus et un faible niveau d'éducation. Les politiques environnementales parviennent à résoudre les problèmes locaux dans certaines régions, mais pas dans d'autres.
5. SSP5 : Développement à partir de combustibles fossiles. Les marchés mondiaux sont de plus en plus intégrés, ce qui entraîne des innovations et des progrès technologiques. Cependant, le

développement social et économique est basé sur une exploitation intensifiée des ressources en combustibles fossiles, avec un pourcentage élevé de charbon et un mode de vie à forte intensité énergétique dans le monde entier. L'économie mondiale est en pleine croissance et les problèmes environnementaux locaux, tels que la pollution atmosphérique, sont abordés avec succès.

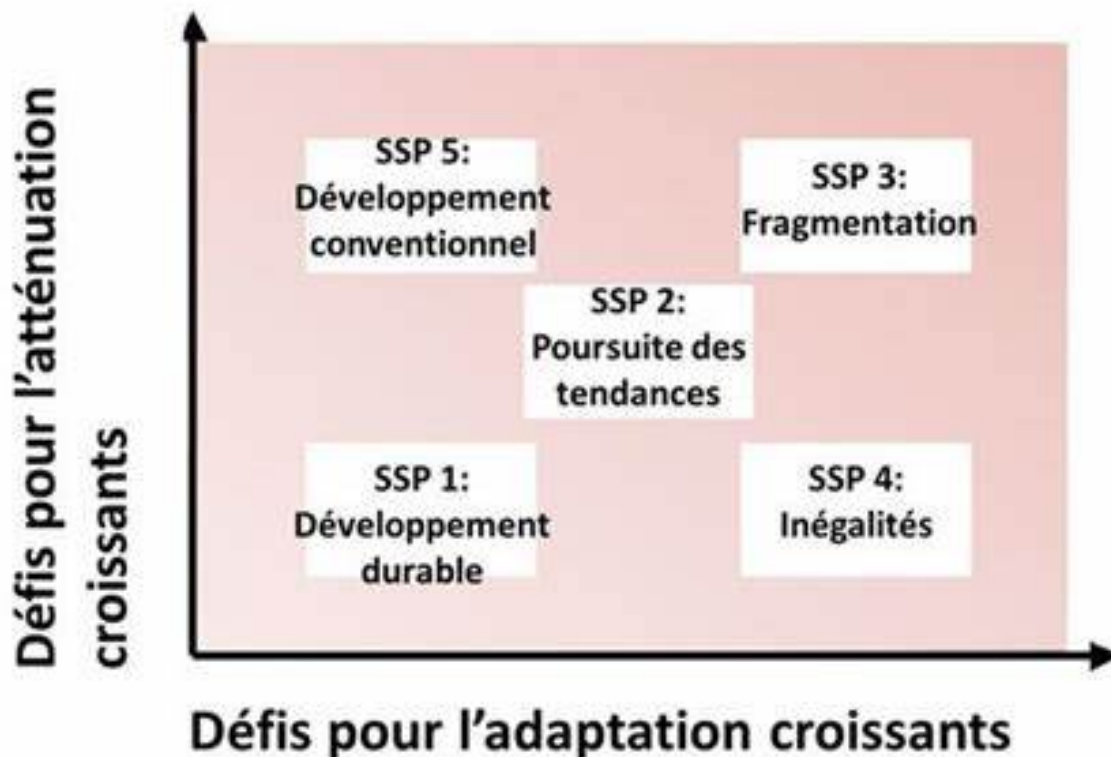


FIGURE A.1 – L'espace d'incertitude, et les cinq scénarios-types. (source : <https://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/339> adapté de [O'Neill et al., 2014])

A.1.2 Une architecture en matrice pour utiliser les SSP et RCP :

Les scénarios socio-économiques sont ainsi découplés des scénarios climatiques, ce qui permet d'adopter une approche en matrice et décliner, pour chaque scénario d'évolution socio-économique (SSP1, SSP2, etc.), les efforts à consentir (ou coût d'atténuation) à l'échelle mondiale pour parvenir au degré de changement climatique ou plutôt l'intensité du forçage radiatif supplémentaire (dû à l'effet de serre d'origine humaine) correspondant à chaque RCP. La figure A.2 illustre cette méthodologie.

L'utilisation de développements comparables du forçage radiatif permet une comparaison directe des simulations CMIP5 et CMIP6. Contrairement aux scénarios RCP, les nouveaux scénarios basés sur le SSP fournissent des raisons économiques et sociales pour les trajectoires d'émissions supposées.

A.1.3 Une architecture en matrice pour utiliser les SSP et RCP :

La dénomination des scénarios individuels comprend le nom du scénario suivi de deux chiffres indiquant le forçage radiatif supplémentaire atteint d'ici l'année 2100 en unités de dixièmes de watts.

1. SSP5-8.5 : Avec un forçage radiatif supplémentaire de 8,5 W/m² d'ici 2100, ce scénario représente la limite supérieure de la gamme des scénarios décrits dans la littérature. Il peut être compris comme une mise à jour du scénario CMIP5 RCP8.5, maintenant combiné avec des trajectoires socio-économiques.

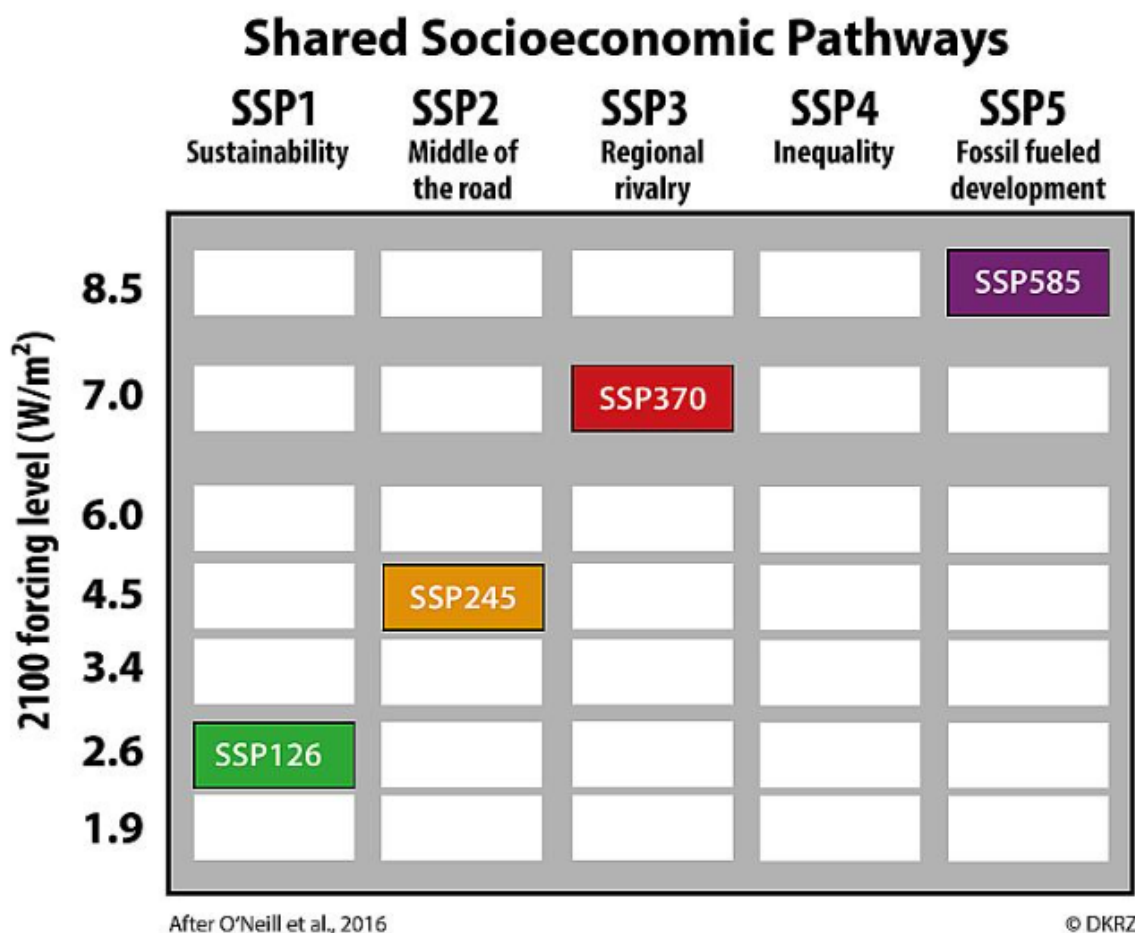


FIGURE A.2 – Matrice des scénarios SSP-RCP. Chaque cellule de la matrice indique une combinaison de trajectoire de développement socio-économique (c'est-à-dire un SSP) et de résultat climatique basé sur une trajectoire de forçage particulière (RCP). Les cellules colorées indiquent les scénarios qui ont servi de base aux projections des modèles climatiques du programme CMIP6. (source : <https://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/339>)

2. SSP3-7.0 : Avec 7 W/m² d'ici 2100, ce scénario se situe dans la partie moyenne supérieure de la gamme complète des scénarios. Il a été nouvellement introduit après les scénarios RCP, comblant ainsi l'écart entre RCP6.0 et RCP8.5.
3. SSP2-4.5 : En tant que mise à jour du scénario RCP4.5, le SSP245, avec un forçage radiatif supplémentaire de 4,5 W/m² d'ici 2100, représente la trajectoire moyenne des émissions futures de gaz à effet de serre. Ce scénario suppose que des mesures de protection du climat sont prises.
4. SSP1-2.6 : Ce scénario avec 2,6 W/m² d'ici 2100 est un remake du scénario de faible émission RCP2.6 et a été conçu dans le but de simuler un développement compatible avec l'objectif de 2°C. Ce scénario intègre la mise en œuvre de mesures fortes de réduction des émissions de GES.

La figure A.3 illustre l'évolution temporelle du forçage radiatif anthropique supplémentaire résultant des scénarios sélectionnés. Par rapport au niveau préindustriel, le forçage radiatif d'aujourd'hui a augmenté de 2,5 watts.

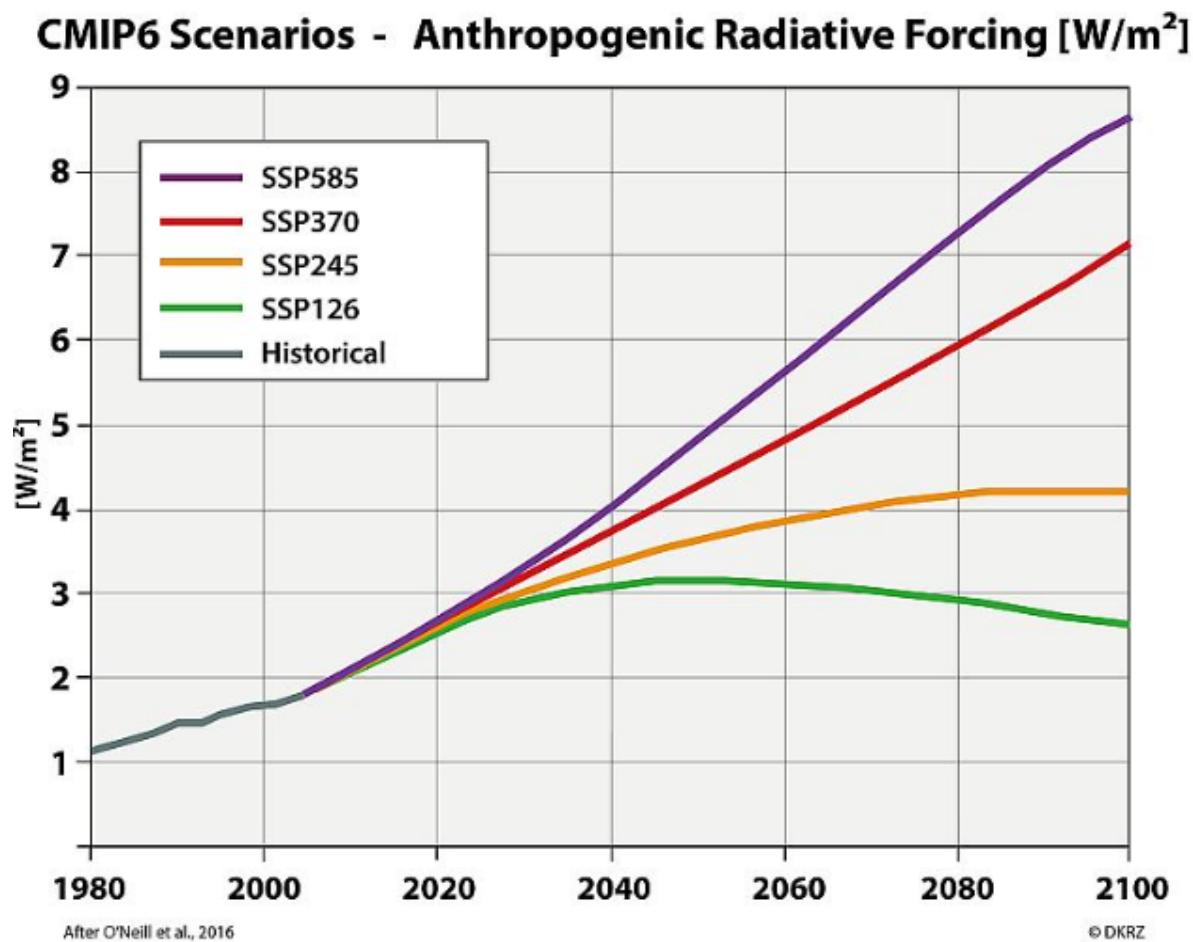


FIGURE A.3 – Matrice des scénarios SSP-RCP. Chaque cellule de la matrice indique une combinaison de trajectoire de développement socio-économique (c'est-à-dire un SSP) et de résultat climatique basé sur une trajectoire de forçage particulière (RCP). Les cellules colorées indiquent les scénarios qui ont servi de base aux projections des modèles climatiques du programme CMIP6. (source : <https://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/339>)

Annexe B

Pour aller plus loin...

Un certain nombre de sites traitent et tentent de résumer le sujet de l'élévation du niveau moyen de la mer. Ils sont listés ci-dessous.

<https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
<https://theshiftproject.org/article/climat-synthese-vulgarisee-6eme-rapport-giec/>
<https://www.notre-environnement.gouv.fr/themes/biodiversite/les-milieux-littoraux-et-marins-ressources/article/elevation-du-niveau-de-la-mer>
<https://www.finistere.gouv.fr/Actions-de-l-Etat/Environnement-risques-naturels-et-technologiques/Risques-naturels-et-technologiques/Prevention-des-risques-littoraux-et-submersions-marines-dans-le-Finistere>
<https://www.ecologie.gouv.fr/observatoire-national-sur-effets-du-rechauffement-climatique-onerc>
<https://www.ecologie.gouv.fr/impacts-du-changement-climatique-littoral-et-milieu-marin>
<https://etatdurgence.ch/blog/articles/rapport-ar6-du-giec-resume-pour-les-decideurs/>
<https://climate.copernicus.eu/climate-indicators/sea-level>
<https://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/303>
<https://meteofrance.com/changement-climatique/observer/hausse-du-niveau-de-la-mer-et-changement-climatique>
<https://www.adaptation-changement-climatique.gouv.fr/agir/espace-documentaire/9-panneaux-pour-comprendre>
<https://www.adaptation-changement-climatique.gouv.fr/agir/espace-documentaire/vers-2e-plan-d'adaptation>

Bibliographie

- [Anderson et al., 2004] Anderson, M. L., Chen, Z., and Kavvas, M. (2004). Modeling low flows on the cosumnes river. *Journal of Hydrologic Engineering*, 9(2) :126–134.
- [ARTELIA, 2021] ARTELIA (2021). Modélisation des inondations en estuaire de la seine : dynamique et emprise des inondations - phase 1 - construction du modèle.
- [Bindoff et al., 2007] Bindoff, N. L., Willebrand, J., Artale, V., Cazenave, A., Gregory, J. M., Gulev, S., Hanawa, K., Le Quere, C., Levitus, S., Nojiri, Y., et al. (2007). Observations : oceanic climate change and sea level. In *Climate Change 2007 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pages 387–487. Cambridge University Press.
- [Boe, 2007] Boe, J. (2007). *Changement global et cycle hydrologique : Une étude de régionalisation sur la France*. PhD thesis, Université Paul Sabatier-Toulouse III.
- [Boé et al., 2009] Boé, J., Terray, L., Martin, E., and Habets, F. (2009). Projected changes in components of the hydrological cycle in french river basins during the 21st century. *Water Resources Research*, 45(8).
- [Cazenave and Le Cozannet, 2014] Cazenave, A. and Le Cozannet, G. (2014). Sea level rise and its coastal impacts. *earth’s future* 2, 15–34.
- [CEREMA, 2023] CEREMA (2023). Littoraux normands 2027 - analyse des effets de l’érosion côtière et de la submersion marine sur le littoral normand aux horizons 2050, 2120 et 2300, incluant l’élévation du niveau de la mer liée au changement climatique.
- [Chauveau et al., 2013] Chauveau, M., Chazot, S., Perrin, C., Bourgin, P.-Y., Sauquet, E., Vidal, J.-P., Rouchy, N., Martin, E., David, J., Norotte, T., et al. (2013). Quels impacts des changements climatiques sur les eaux de surface en france à l’horizon 2070 ? *La Houille Blanche*, (4) :5–15.
- [Ducharne et al., 2011] Ducharne, A., Sauquet, E., Habets, F., Deque, M., Gascoin, S., Hachour, A., Martin, E., Oudin, L., Page, C., Terray, L., et al. (2011). Evolution potentielle du régime des crues de la seine sous changement climatique. *La Houille Blanche*, (1) :51–57.
- [Fisson and Lemoine, 2016] Fisson, C. and Lemoine, J. (2016). les niveaux d’eau en estuaire de seine : risque inondation et changement climatique. *GIP Seine-Aval*, 3 :35.
- [Flipo et al., 2020] Flipo, N., Gallois, N., Labarthe, B., Baratelli, F., Viennot, P., Schuite, J., Rivière, A., Bonnet, R., and Boé, J. (2020). Pluri-annual water budget on the seine basin : past, current and future trends. *The seine river basin*, 90 :59–89.
- [Habets et al., 2008] Habets, F., Boone, A., Champeaux, J.-L., Etchevers, P., Franchisteguy, L., Leblois, E., Ledoux, E., Le Moigne, P., Martin, E., Morel, S., et al. (2008). The safran-isba-modcou hydrometeorological model applied over france. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 113(D6).
- [Herron and Croke, 2009] Herron, N. and Croke, B. (2009). Including the influence of groundwater exchanges in a lumped rainfall-runoff model. *Mathematics and Computers in Simulation*, 79(9) :2689–2700.
- [IPCC, 2019] IPCC (2019). Technical summary. In Hans-Otto, P., Debra C., R., Valerie, M.-D., Panmao, Z., Elvira, P., Katja, M., Melinda, T., Andrés, A., Maïke, N., Andrew, O., Jan, P., Bard, R., and Nora M., W., editors, *IPCC Special report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. IPCC.

- [Lang et al., 2008] Lang, C., Gille, E., Francois, D., and Drogue, G. (2008). Improvement of a lumped rainfall-runoff structure and calibration procedure for predicting daily low flow discharges. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, (56) :59–71.
- [Lee et al., 2023] Lee, H., Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barrett, K., et al. (2023). *Climate change 2023 : synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. The Australian National University.
- [Michael and Bruce C., 2019] Michael, O. and Bruce C., G. (2019). Sea level rise and implications for low lying islands, coasts and communities. In Hans-Otto, P., Debra C., R., Valerie, M.-D., Panmao, Z., Elvira, P., Katja, M., Melinda, T., Andrés, A., Maïke, N., Andrew, O., Jan, P., Bard, R., and Nora M., W., editors, *IPCC Special report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. IPCC.
- [Neelin, 2010] Neelin, J. D. (2010). *Climate Change and Climate Modeling*. Cambridge University Press. Google-Books-ID : FkuxEHncqHwC.
- [O’Neill et al., 2014] O’Neill, B. C., Kriegler, E., Riahi, K., Ebi, K. L., Hallegatte, S., Carter, T. R., Mathur, R., and Van Vuuren, D. P. (2014). A new scenario framework for climate change research : the concept of shared socioeconomic pathways. *Climatic change*, 122 :387–400.
- [Perrin et al., 2011] Perrin, C., Vidal, J.-P., Chazot, S., and Norotte, S. (2011). *Explore2070. Synthèse bibliographique. Lot Hydrologie de Surface*. PhD thesis, irstea.
- [Pushpalatha et al., 2013] Pushpalatha, R., Perrin, C., Le Moine, N., Mathevet, T., and Andréassian, V. (2013). A downward structural sensitivity analysis of hydrological models to improve low-flow simulation. *Journal of Hydrology*, 411(1-2) :66–76.
- [TERRITOIRES, 2024a] TERRITOIRES, M. D. L. T. E. D. L. C. D. (2024a). Addenda au guide méthodologique ppri plans de prévention des risques naturels (ppr). risques d’inondation.
- [TERRITOIRES, 2024b] TERRITOIRES, M. D. L. T. E. D. L. C. D. (2024b). Guide méthodologique pour l’Élaboration des plans de prÉvention des risques d’inondation par dÉbordement de cours d’eau (hors cours d’eau torrentiels).
- [Yin, 2012] Yin, J. (2012). Century to multi-century sea level rise projections from cmip5 models. *Geophysical Research Letters*, 39(17).



Cerema

CLIMAT & TERRITOIRES DE DEMAIN