

Introduction

Le littoral normand se caractérise par l'existence de tous les types de littoraux des milieux tempérés. Cette situation résulte du contact entre la Manche (mer peu profonde, de faible largeur et marquée par des marées de type mégatidal (>7m), et une géologie normande variée. En effet, géologiquement, s'individualise : (1) la Normandie sédimentaire, du Tréport à la Baie des Veys, correspondant à la terminaison occidentale du Bassin sédimentaire parisien marqué par l'existence de plateaux et de collines taillés en falaises. (2) la Normandie dite armoricaine ou cristalline (Cotentin) faisant partie intégrante du Massif hercynien armoricain, caractérisée par des caps rocheux, des systèmes dunaires et des havres. Ces deux ensembles rocheux sont entrecoupés par des vallées et des plaines permettant l'élaboration de côtes d'accumulation (sables, galets), de baies et d'estuaires. Ces côtes basses urbanisées sont des espaces potentiellement inondables (inondation continentale et marine).

1/ Formes, dynamiques actuelles du TDC (historique) et aléas sur le littoral normand.

1.1/ Les principaux types de littoraux rencontrés en Normandie

Cette multiplicité des types de côtes confère à la Normandie de très fortes aménités environnementales et paysagères très attractives. Cependant, au regard des aléas côtiers (érosion et submersion) qui frappent ce littoral, l'appropriation inconsidérée du bord de mer génère de fortes vulnérabilités qui peuvent s'accroître face au changement climatique.

- **Des côtes à falaises et rocheuses**

Les côtes à falaises à recul rapide (recul annuel décimétrique à pluri-décimétrique) :

Les falaises taillées dans les roches sédimentaires subissent des reculs annuels décimétriques à pluri-décimétriques. Il s'agit des falaises de craies à silex de Seine Maritime, ou encore de celles taillées dans les terrains jurassiques (falaises calcaires ou argilo-marneuses) dans le Calvados (falaises du Pays d'Auge, de la campagne de Caen (Cap-Romain ...) et du Bessin (Sainte Honorine ...).

Les côtes rocheuses à recul très lent (recul annuel millimétrique à centimétrique) :

A l'ouest de Grandcamp-Maisy, débute la côte Est du Cotentin. Cette Normandie dite armoricaine ou cristalline est marquée par l'affleurement au nord et à l'ouest des roches anciennes formant des caps (granites et auréoles métamorphiques, grès et schistes). Ces roches résistantes sont taillées en falaises et côtes rocheuses dont le recul est très lent à l'échelle humaine (quelques mm/an).

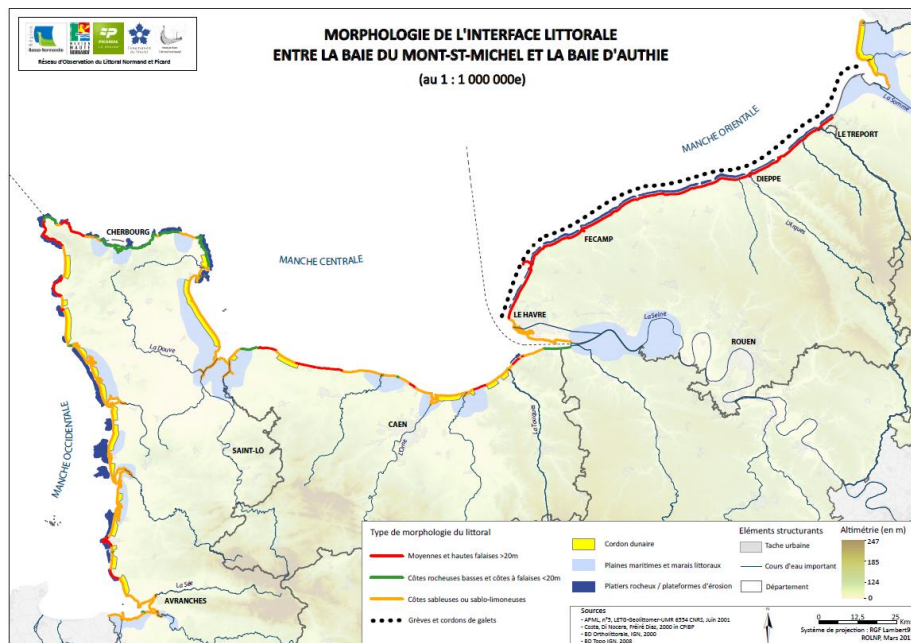


Figure 1 : Morphologie du littoral de Normandie (ROL, G. Thirard, 2012)

- **Les formes d'accumulation du littoral Normand**

Les falaises et les caps sont entrecoupés par de vastes espaces de faible altitude par rapport au niveau marin actuel (plaines, baies, vallées drainées ou sèches plus ou moins larges) où se sont souvent implantées préférentiellement les populations et leurs activités. Ces espaces bas permettent l'élaboration de formes d'accumulation (plages de galets et de sable, dunes, marais maritimes). Ces formes d'accumulation qui sont en constant ajustement avec le niveau moyen de la mer, les vagues, les marées et les courants associés, constituent les meilleurs moyens de protection contre les houles de tempête.

Les plages de galets de silex de la Seine Maritime sont issues des silex contenus dans les craies des falaises. Ces plages sont larges au débouché des vallées, souvent en raison de la présence d'ouvrages transversaux (jetée portuaires, épis).

Les plages sableuses et les dunes. Particulièrement présentes dans le Calvados et surtout dans le Département de la Manche, ces plages de sable sont associées à des dunes de faibles amplitudes (Calvados et Est Cotentin) et souvent masquées par l'anthropisation (habitations, routes, activités). En revanche, dans l'Ouest Cotentin, des massifs dunaires plus imposants se sont développés. Ces derniers sont parfois en avant de falaises mortes laissant apparaître des dépressions (souvent humides) qui ont également fait l'objet d'implantations humaines et d'activités, parfois agricoles.

Baies, estuaires et environnements estuariens : des formes naturellement en voie de colmatage

Les champs de dune de l'Ouest Cotentin sont séparés par une série de 8 petits systèmes estuariens (les Havres) partiellement fermés par des flèches sableuses très mobiles mais dont la progression principale s'effectue en sens opposé (l'une progressant vers le Sud, l'autre vers le nord).

Le littoral normand se caractérise également par la présence de baies remarquables (Veys, Mt Saint Michel) en proie à de fortes sédimentations de fond de golfe (formation de marais maritimes), mais également d'estuaires tel que celui de l'Orne, ou de la Seine, ce dernier étant fortement industrialisé et relie la Normandie à la « ville monde », Paris.

1.2/ Synthèse des dynamiques contemporaines du littoral normand

Il existe de très nombreuses études de qualité sur les dynamiques littorales ((Suivis Universitaires (Station marine du CREC, LETG Géophen, M2C Caen et Rouen), Rol/DREAL, Services de l'Etat, établissements publics, stratégie de suivi du Réseau d'Observation du littoral de Normandie et des Hauts de France ...). Parmi ces nombreux travaux, 4 ont été choisis notamment pour leurs dimensions spatiales ou temporelles larges :

- **Indicateur national de l'érosion côtière** (Ministère Transition écologique et solidaire, Cerema, 2015).

Ces travaux (Annexe 1) mettent en évidence que le littoral normand est marqué par une évolution régressive importante. Ainsi, 55% du linéaire côtier de Seine Maritime est en érosion, mais 45% connaîtraient une évolution « non perceptible » pour cette étude. Pour le Calvados, 21% sont en érosion, 25% en accrétion et 54% seraient sans évolution perceptible. Enfin, pour la Manche, 35% du linéaire côtier seraient en érosion, 17% en accrétion, et 48% sans évolution perceptible. Cette catégorie « non perceptible » comptabilise également les rivages sur lesquels ont été installés des ouvrages de défense contre la mer qui ont momentanément figés le trait de côte. D'après le CEREMA et sa cartographie des ouvrages de défense, 80% de cette rubrique « non perceptible » correspondrait donc à la présence d'ouvrages ce qui suggère que ces secteurs ont connu ou connaissent des problèmes d'érosion/submersion. Finalement, se serait près des 2/3 du littoral normand qui seraient en érosion.

- **Synthèse de l'évolution historique des falaises sédimentaires de Normandie**

Ce travail de synthèse (annexe 2) reprend l'ensemble des données récemment acquises sur l'évolution des falaises sédimentaires (Costa et al., 2019). Ces formes, qui ne peuvent que reculer sont affectées par des retraits pluri-décimétriques en haut d'escarpement (de l'ordre de 20 à 25 cm/an). Localement les reculs peuvent être légèrement plus importants lors de l'affleurement de roches plus tendres

(marnes, argiles). Plus localement encore, des valeurs peuvent atteindre, voire dépasser les 40 cm/an en raison de l'implantation d'ouvrages transversaux (épis, jetées portuaires) qui réduisent la présence de sédiments au pied des abrupts et exacerbent l'efficacité érosive des vagues sur les falaises.

- **Evolution historique du littoral des Départements du Calvados et de la Manche (côtes d'accumulation) (ROL/DREAL, 2014 ; CREC-Unicaen, F. Levoy, 2019)**

Un travail d'analyse de la position du trait de côte à l'échelle historique (Annexe 3) a été réalisé par le Réseau d'Observation du Littoral Normand et des Hauts de France en collaboration avec la DREAL Normandie (ROL/DREAL, 2014) sur la Manche et le Calvados. En suivant les préconisations proposées lors de la construction de l'Indicateur National de l'Érosion Côtière (INEC, Cerema, 2015), la digitalisation des divers traits de côte entre 1947 et 2010 permet d'aboutir à une cartographie fine de la dynamique du trait de côte. Ces informations sont disponibles pour le plus grand nombre sur le site du ROL (<https://rolnp.fr/rolnp/>).

- Par ailleurs, sur **le littoral de la Manche, des travaux de recherche ont été réalisés par le CREC** (Station Marine de Luc-sur-mer), de l'Université de Caen Normandie (F. Levoy).

Ces derniers ont consisté à la mise en place, dès 1991 d'une méthodologie de suivi des dynamiques côtières des plages et des dunes adjacentes (annexe 4). Longtemps restée unique en France, cette stratégie toujours en cours propose des informations interannuelles très utiles sur la dynamique du Trait de côte, le volume de sable sur les plages, et l'évolution des profils de plage (<https://crec.unicaen.fr/st/>).

Il s'avère que de nombreux sites sont en érosion, parfois sévère, mais qu'il existe également des secteurs de plage qui ont très peu évolué entre 1991 et 2019, voire pour certaines, l'observation d'une progradation.

Ces trois types de rendu cartographique (Indicateur National, ROL/DREAL, CREC-F. Levoy) sont conformes dans les tendances générales proposées. Les différences sont issues, pour l'essentiel, de périodes d'analyse diverses, d'échelles de suivi et de rendu cartographique variés.

1.3/ un littoral déjà fortement impacté par les submersions de tempête.

Le littoral normand est naturellement sensible aux inondations par la mer, et ce, pour au moins trois principales raisons. (1) En effet, à l'exception de l'Est Cotentin et de la partie occidentale du Calvados, le rivage normand est ouvert aux flux atmosphériques d'ouest perturbés. (2) Il existe de très nombreuses zones topographiquement basses où se concentrent les populations côtières, leurs biens et leurs activités. (3) La Manche est une mer peu profonde et en forme d'entonnoir favorisant le développement de fortes surcotes.

Il existe de nombreux travaux sur les inondations par la mer, émanant notamment des services de l'Etat tels que la DREAL et les DDTM (Territoire à risque d'inondation (TRI) ; Plan de prévention des risques inondation (PPRI) ; Plan de prévention des risques littoraux (PPRL) ...). D'après ces travaux, et à l'échelle nationale, près d'1,5 million de personnes sont aujourd'hui menacées par les inondations par la mer, dont 48,6% se trouvent en Manche et Mer du Nord (MTES, 2017).

D'après une étude de l'INSEE (2020) sur la Normandie, plus de 111 000 logements, 122 000 résidents, et 54 000 emplois sont actuellement menacés par cet aléa « inondation marine » (éléments et personnes localisés en « zone potentiellement sous le niveau marin » ZPNM).

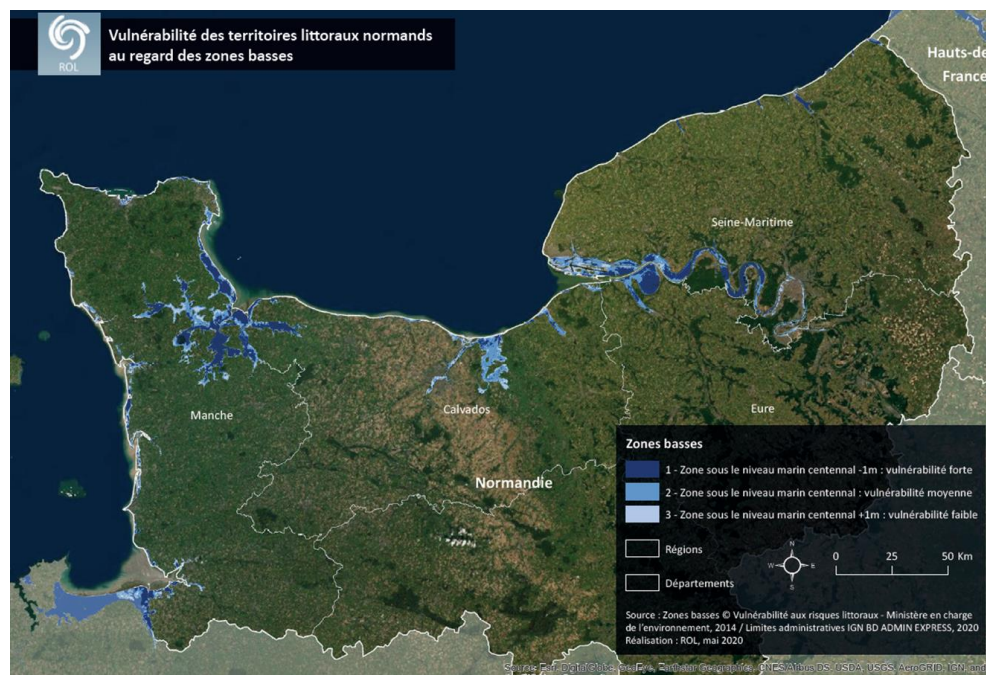


Figure 2 : Territoires normands sous divers niveaux marins de référence (inf. au niveau des pleines mers de vive-eau et pour divers scénarios de tempêtes ; DREAL Normandie, 2014).

Cependant, ces résultats issus de cartographies statiques (seule prise en compte d'une topographie continentale se situant sous un niveau marin, maximisant l'ampleur spatiale des inondations) mais ne prennent pas non plus en compte l'ampleur annoncée en 2100 de la hausse du niveau marin (+1m), ni même les phénomènes de concomitance entre des hauts niveaux marins et de hautes eaux fluviales.

2/ Conséquences du changement climatique sur les formes littorales, le niveau marin et les tempêtes.

Même si les effets du changement climatique peuvent être perçus de manières diverses selon les régions du monde la littérature scientifique abondante en la matière, les résultats de l'IPCC/GIEC (2007, 2013 ; 2017 ; 2019 rapport spécial), où les phénomènes naturels montrent chaque jour que le réchauffement climatique et ses conséquences sont sans équivoque.

2.1/ Le niveau moyen de la mer

Bien évidemment, le réchauffement climatique contemporain va se répercuter sur le niveau moyen de la mer. A l'échelle mondiale, les travaux rassemblés par l'IPCC indiquent une hausse globale du niveau marin. Alors qu'elle fut très faible depuis 3 000 ans (0,5 mm/an), cette dernière a connu une accélération au cours du XX^{ème} siècle. De l'ordre de 1,8 mm/an entre 1900 et 2009, l'élévation serait de l'ordre de 3,4 mm/an (Cazenave et al., 2018), et atteindrait 5 mm/an sur la période 2011-2018 (Zemp et al., 2019 ; Bamber et al., 2019). En Normandie, cette élévation est légèrement plus faible, mais atteint tout de même (en moyenne) près de 3 mm/an. Elle aurait induit une hausse du niveau marin de 20 cm en 100 ans. S'agissant du futur, de nombreuses incertitudes demeurent quant aux rythmes et à l'ampleur du phénomène. Cela est en étroite dépendance avec notre capacité à réduire les émissions de gaz à effet de serre responsables du réchauffement climatique contemporain. Dans le cadre du rapport spécial sur les océans de l'IPCC 2019, les scénarii d'élévation du niveau marin sont revus à nouveau à la hausse. Celle-ci pourrait s'accroître pour atteindre +1,1m à +1,8 m à l'horizon 2100, si nous ne pouvons maintenir le réchauffement climatique en dessous de + 4 °C.

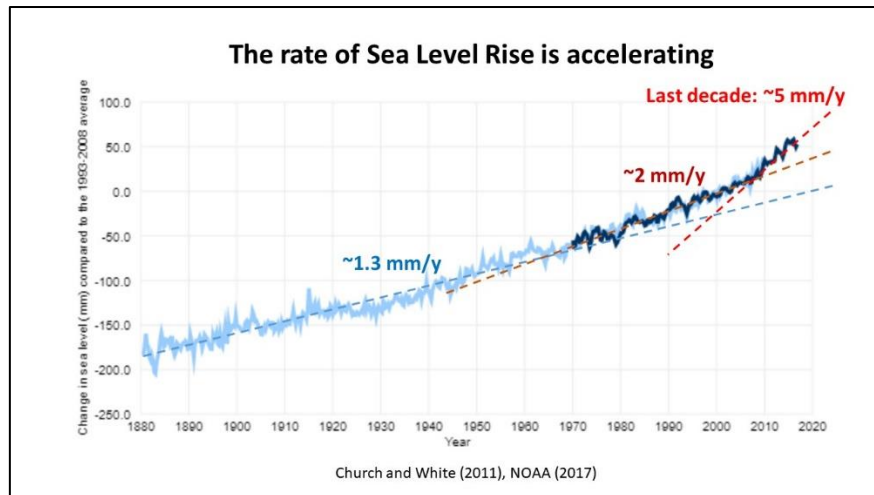


Figure 3 : Accélération de l'élévation du niveau moyen des mers à l'échelle planétaire.

2.2/ Réchauffement climatique et tempête (Cf. Item 1 « Aléas climatiques et météorologiques »)

Comme l'évoque l'Item 1 du GIEC Normand « Aléas climatiques et météorologiques », la fréquence des forts vents et tempêtes ne semble pas évoluer pour le moment vers une augmentation. Les modélisations sont ambivalentes pour le futur, car certaines indiquent une possible accentuation de la fréquence et de l'intensité des événements de forte énergie. Quoi qu'il en soit, la simple élévation du niveau des mers servira mécaniquement de tremplin, contribuant à augmenter significativement la fréquence et l'intensité des franchissements par la mer (notamment dans un contexte de réduction généralisée des volumes sédimentaires). A ce titre, plusieurs études internationales (GIEC, 2019 ; Haigh et al., 2011) ont montré qu'avec +1m d'élévation du niveau moyen des mers, les niveaux marins extrêmes induits par des tempêtes de période de retour centennal pourraient avoir une récurrence décennale, voire inférieure. De même, pour la Manche Orientale et Occidentale, il a été montré que les forts coefficients de marée (110-115) qui apparaissent 3 à 4 fois annuellement, pourraient, avec +1m d'élévation, apparaître près de 65 fois/an (Costa, 2019).

2.3/ Impacts de l'élévation du niveau moyen des mers sur le littoral

- Impacts sur les dynamiques littorales et la position du rivage

L'érosion côtière n'est pas uniquement liée à l'élévation du niveau moyen de la mer. Elle est aussi le résultat de la combinaison actuelle de nombreux facteurs, notamment le déficit sédimentaire. En effet, la réduction du volume de sédiments diminue la capacité des formes d'accumulation à jouer leur rôle de tampon protecteur contre l'assaut des houles. L'origine de ce déficit qui affecte tous les littoraux dans le monde, est naturelle. A cela s'ajoute (plus localement) les actions anthropiques (extractions, perturbation du cheminement des sédiments ...). Dans ce contexte de pénurie, il est admis que l'élévation future du niveau marin se traduira par une érosion accrue des côtes. Cependant, dans le cas d'une hausse de quelques centimètres (telle celle de +20 cm observée au cours du XXe siècle), le lien de causalité entre érosion côtière et élévation du niveau marin est loin d'être évidente. En effet, de nombreux facteurs locaux (échanges sédimentaires avec les petits fonds ou l'intérieur des terres, disponibilité de sédiments, conditions hydrodynamiques, actions anthropiques) contrôlent également la position du trait de côte et ont favorisé accumulation et progradation locales. Ce fait explique la difficulté actuelle de la communauté scientifique à prévoir l'ajustement des rivages à cette montée du niveau marin. Cependant, associée au déficit sédimentaire, une élévation du niveau des mers rapide et atteignant +1m va exacerber les problèmes d'érosion (translation du rivage vers l'intérieur des terres) et de submersion. Dans ce contexte, les côtes les plus vulnérables sont les espaces actuellement proches du niveau des pleines mers actuelles. En revanche, les linéaires côtiers « fixés » par des ouvrages de défense longitudinaux ne pourront pas s'adapter par translation. Au droit des ouvrages, les plages vont disparaître, permettant l'accentuation des forces marines (houle) sur les ouvrages induisant une ruine prématurée de ces derniers, de possibles brèches et une accentuation des submersions de tempête.

S'agissant des falaises, ces dernières n'appellent pas de commentaires car ce sont des formes d'érosion. Le recul sera proportionnel à la résistance des matériaux et à l'évolution des agents et des processus d'érosion marins et continentaux. A ce jour, il est délicat de déterminer la réaction de ces falaises et côtes rocheuses au changement climatique et à la hausse du niveau marin. Cependant, les travaux de modélisation indiquent que l'augmentation de l'intensité et du temps d'action des processus marins en pied de falaise est favorable à l'érosion. Pour les falaises crayeuses de Seine Maritime, un doublement des vitesses actuelles de recul est proposé (Costa, 2002).

- Des Impacts aussi à l'intérieur des terres (intrusion saline et inondation continentale)

Le changement climatique et l'élévation du niveau moyen des mers n'affecteront pas que la frange littorale. En effet, au-delà de possibles dégradations des milieux naturels (forêts et zones humides notamment) liée à un stress hydrique accru, des travaux (cf. item « Eau » du GIEC Normand) sont initiés pour déterminer la dégradation de la qualité des masses d'eau continentale en relation avec la baisse du débit des cours d'eau (moindre dilution des eaux de STEP et des pollutions diffuses agricoles), qui auront des conséquences sur les usages (agriculture, eau potable, industrie et énergie). Par ailleurs, comme détaillé dans le chapitre suivant sur les estuaires, des remontées du biseau salé, en relation avec l'élévation du niveau marin vont dégrader la qualité des ressources souterraines littorales. En Normandie, les informations fournies par le BRGM, et le projet actuellement en cours (Rivages Normands 2100. Préfecture/DREAL Normandie) pour le Calvados et la Manche indiquent clairement des difficultés à venir en termes d'intrusion saline et de remontée de nappe. L'ampleur est malheureusement fonction d'effets de site qu'il conviendra de préciser, mais l'influence pourrait se faire sentir sur plusieurs centaines de mètres à l'intérieur des terres.

Des phénomènes de blocage des écoulements fluviaux par la mer sont à attendre, induisant de plus hauts niveaux d'eau dans les fleuves et rivières, plusieurs kilomètres, voire dizaines de kilomètres à l'intérieur des terres. A titre d'exemple, des études et des modélisations réalisées par le GIP Seine Aval (GIPSA, 2014) ont montré qu'une élévation du niveau des mers influencerait notablement à la hausse les niveaux de pleine mer dans la Seine, et ce, au-delà de Rouen. Ainsi, pour des débits faibles et moyens, la hausse du niveau de la mer se répercuterait intégralement sur l'estuaire, voire jusqu'à Rouen, et serait de l'ordre 50 à 60% (à Rouen) pour les forts débits. Ces résultats suggèrent que la fréquence et l'intensité des débordements des cours d'eau seraient fortement accentués, notamment lors de concomitances avec des crues.

3/ l'influence du changement climatique sur les estuaires

Les travaux du GIEC démontrent que le changement climatique perturbe le cycle de l'eau dont l'une des conséquences est/sera **l'augmentation des événements extrêmes** de type précipitations intenses, crues, tempêtes et inondations et des canicules et des sécheresses. L'évolution de ces événements extrêmes (intensité, durée, fréquence) constitue l'une des grandes problématiques actuelles dans un contexte de changement climatique. En estuaire, la connaissance de l'évolution des niveaux d'eau est complexe en raison des **interactions entre le compartiment de surface**, contrôlé par de nombreux phénomènes hydro-météo-marins (marée, houle, surcote, fleuve), et **le compartiment souterrain** (particulièrement puissant en Normandie), fortement karstifié et possédant sa dynamique propre. Cette difficulté est liée en partie aux processus et forçages qui s'expriment à des échelles spatiales (échelle du m à l'échelle du bassin versant) et temporelles (variabilité climatique basse fréquence à la période de la houle) variables et ce, de manière non linéaire. A cette dynamique de l'eau est associée la **dynamique des sédiments et des contaminants** associés (y compris historiques), des évolutions sur la **qualité des eaux** (e.g. température, salinité, turbidité) et des **écosystèmes** liés au déplacement du gradient de salinité ou à l'évolution des habitats.

De nombreux programmes scientifiques ont été portés sur le fonctionnement de l'estuaire de la Seine, comparativement aux autres systèmes d'interface Terre-mer (Baie du Mont-Saint-Michel, Baie des Veys...) où la connaissance est beaucoup plus limitée. Cet état de fait est lié à différents paramètres : la taille du système, les enjeux socio-économiques plus importants en Seine, le support de la recherche par la région au travers du GIP Seine-Aval (et le programme PIREN pour la « partie Amont ») et de la fédération de recherche SCALE et sa plateforme PRESEN, où l'inscription de ce site dans le scope national du CNRS (SNO DYNALIT et Zone Atelier Seine). Malgré la pluralité des démarches et des acteurs, cette souligne la dynamique scientifique qui a été mise en place à l'échelle Européenne sur la mise en place d'observatoires pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les zones côtières.

Les buts principaux de ces observatoires sont (i) l'**enregistrement du changement climatique par la construction de bases de données**, et (ii) la fourniture de données fiables pour la **calibration/validation de modèles** (numériques ou statistiques) permettant de prédire les impacts des changements climatiques sur les zones estuariennes et proches côtières.

3.1/ Dynamique de l'eau

Concernant la partie eau, nous avons développé les spécificités des Estuaires dans la fiche thématique « L'eau : Disponibilité, qualité, risques naturels ». Nous résumerons que deux phénomènes principaux sont déterminants pour le risque inondation/submersion dans les estuaires : les phénomènes de **concomitances** et les phénomènes de **blocage**. Nous avons montré que les cartes issues de modélisation sont des outils précieux pour permettre une réflexion et une gestion optimisée de ces espaces s'appuyant sur la modification de la zonation actuelle des basses vallées (niveaux d'eau et inondations, salinité, température, régime fluvial,) et ainsi sur les zones à protéger ou non (que ce soit pour les biens et les personnes ou pour les espaces naturels) et les actions de restauration éventuellement à mener. Cependant, aucune des modélisations ne prend en compte l'ensemble des phénomènes (Graff, 2019). Or, les projections sur les zones potentiellement inondables peuvent être assez différentes dans les basses vallées selon que l'on tient compte de l'ensemble des concomitances ou non. Des efforts devront donc être faits dans ce sens dans les futures études.

3.2/ Impacts sur les paramètres physico-chimiques de l'eau

• Données historiques

La connaissance et la prédiction des impacts du changement climatique sur les paramètres physico-chimiques dans les estuaires nécessite des données 'historiques' permettant de comprendre les processus mis en jeu, y compris le rôle joué par les paramètres de blocage et de concomitance sur les mesures physico-chimiques de l'eau. L'estuaire de la Seine a été doté en 2012 d'un réseau de suivi en continu de la qualité des eaux de la Seine. Ce réseau, issu de la collaboration entre le GIP Seine-Aval, les ports et les scientifiques permet le suivi en direct des événements extrêmes ou accidentels, des variabilités saisonnières, interannuelles et des tendances d'évolution à long terme (Fig. 4).

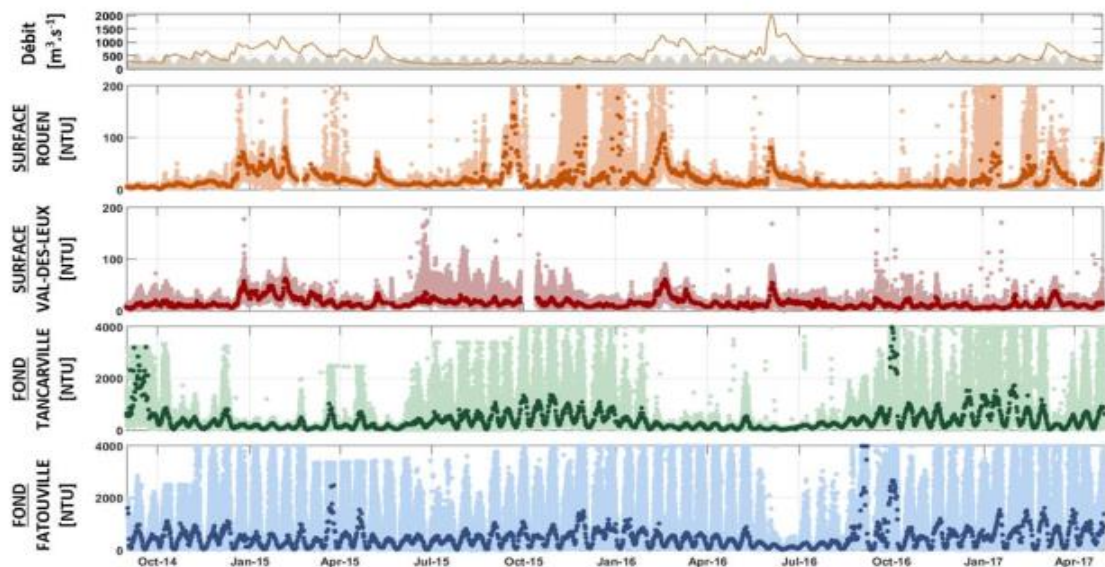


Figure 4 : Débits [$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$], enregistrées à Vernon, sur la période de septembre 2014 à mai 2017. Les points clairs correspondent aux données brutes haute fréquence et les points foncés représentent la turbidité médiane par cycle de marée calculées entre deux basse-mers (Druine, 2018).

Ces données acquises permettent de calibrer et valider des modèles afin de proposer la prédiction des évolutions des paramètres physico-chimiques et des sédiments. Un exemple est donné dans la figure 5 comparant des données du réseau SYNAPSES et deux types de modèles développés dans les programmes HYMOSED et MORPHOSEINE (Grasso et al., 2020).

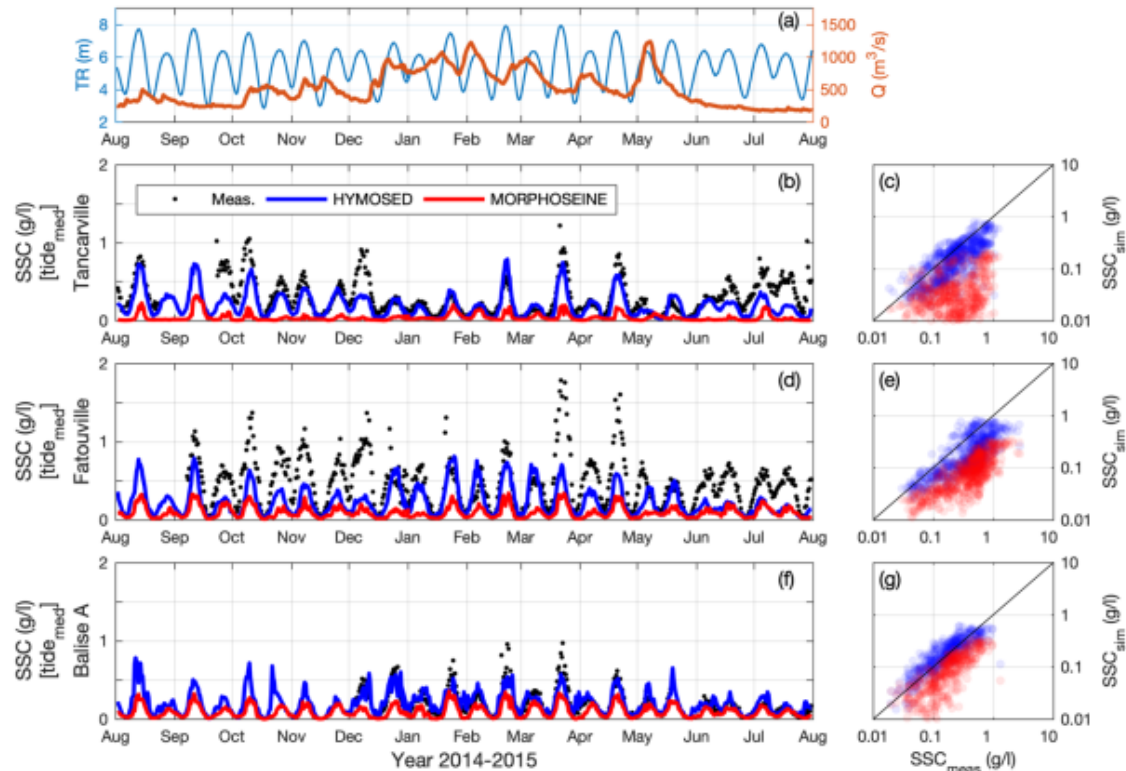


Figure 5 : a) Marnage TR au Havre (bleu) et débit de la Seine Q à Poses (orange). Concentrations médianes en MES (SSC) par cycle de marée d'août 2014 à août 2015, aux stations de (b, c) Tancarville (d, e) Fatouville et (f, g) Balise A : (b, d, f) séries temporelles mesurées (noir) et simulées (HYMOSED : bleu, MORPHOSEINE : rouge) ; (c, e, g) corrélations modèle vs mesures pour les simulations HYMOSED (bleu) et MORPHOSEINE (rouge)

La connaissance de l'évolution des fonds de l'estuaire en termes de bathymétrie et de couverture sédimentaire est également nécessaire à la connaissance des écosystèmes estuariens (Lesourd et al., 2016). Outre les forçages « naturels » (y compris Changement Climatique) qui contrôlent cette évolution, l'impact de l'homme est majeur sur l'évolution de la bathymétrie de ces systèmes (endiguement, dragages...) qui complexifient la lecture de l'impact du changement climatique dans les estuaires.

- **Prédictions de l'évolution de la qualité physico-chimique des eaux estuariennes**

Les résultats des prédictions sur la température et la qualité biogéochimique de l'eau ont montré que le réchauffement atmosphérique et la baisse des débits d'été, qui constituent les changements les plus importants pour la qualité biogéochimique des cours d'eau, puisque c'est en été que s'expriment l'essentiel des processus biogéochimiques qui la contrôlent (phyto et zooplancton, activité bactérienne).

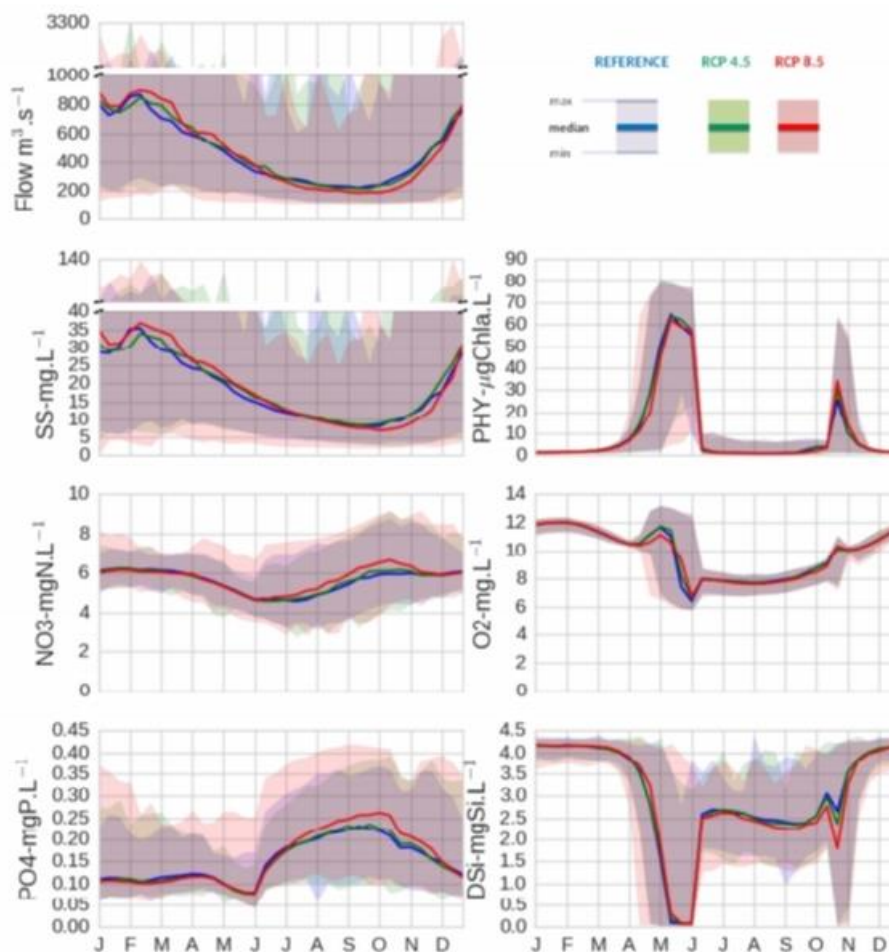


Figure 6 : Impact saisonniers du changement climatique sur l'hydrologie et ses conséquences sur les variables biogéochimiques (matière en suspension SS, nitrate NO₃, phosphate PO₄, phytoplancton PHY, oxygène dissous O₂, acide silicique DSI) de Poses à l'exutoire de la Seine. Les valeurs moyennées de 6 projections sur une période de 20 ans (1980-2000 ou 2080-2100) sont présentées. Les médianes (ligne) et les valeurs minimales et maximales (enveloppe) de la situation de référence (en bleu) sont comparées aux RPC 4.5 (vert) et RCP 8.5 (rouge)

Les impacts du CC sur la qualité de l'eau (restreinte aux nutriments, carbone, oxygène, eutrophisation) résultent du réchauffement de l'eau, qui joue sur la cinétique des différents processus biogéochimiques, et des changements de débit, qui agissent sur la dilution, la sédimentation et les temps de rétention. L'impact cumulé du CC simulé à l'issue du 21^e siècle est une augmentation des teneurs en nitrates par rapport aux teneurs en 2000, que ce soit dans les aquifères (+20 mg/l environ) ou dans les cours d'eau (+10 mg/l environ). La différence entre ces deux compartiments s'explique par la contribution des écoulements de surface aux débits et par la dénitrification riveraine. Une généralisation du décret de janvier 2004 sur l'agriculture raisonnée (réduction de la fertilisation azotée de -20% et introduction de CIPAN) aurait un impact opposé du même ordre. Dans tous les cas étudiés, les teneurs en nitrate sont trop fortes pour être limitantes pour la croissance algale, et les impacts ci-dessus ne se propagent pas sur l'eutrophisation de la Seine.

Une prospective spécialisée, intégrant l'évolution de la démographie, des taux de raccordement, du secteur industriel et du progrès technologique d'épuration et de dépollution, indique une réduction importante des apports ponctuels au cours du 21^e siècle, allant de 30 à 75% selon les polluants dans le scénario illustré en figure 6. L'impact de ce scénario est considérable sur les nutriments, et entraîne une amélioration notable de l'oxygénation et de l'eutrophisation. Le CC accentue la baisse de la biomasse algale mais contrecarre l'oxygénation du milieu. Ces impacts du CC s'expliquent essentiellement par le réchauffement de l'eau, alors que les changements de débits simulés n'ont pratiquement aucun impact (Ducharme et al., 2007 et 2008). En termes d'apports de nutriments à l'estuaire, les changements ci-dessus devraient se traduire par une augmentation des apports en nitrate, une baisse des apports en phosphate et une augmentation des apports en silice dissoute (du fait de la diminution des blooms de

diatomées dans les cours d'eau de la Seine).

Concernant la salinité, l'élévation du niveau marin également engendrer une modification des dynamiques estuariennes avec en particulier une remontée vers l'amont du gradient de salinité et du bouchon vaseux des estuaires. En Seine, cette remontée des gradients estuariens a été modélisée sur la base des hypothèses d'évolution des débits de Ducharne et al. (2009) et suivant les projections d'élévation du niveau marin du GIEC (Fig. 7).

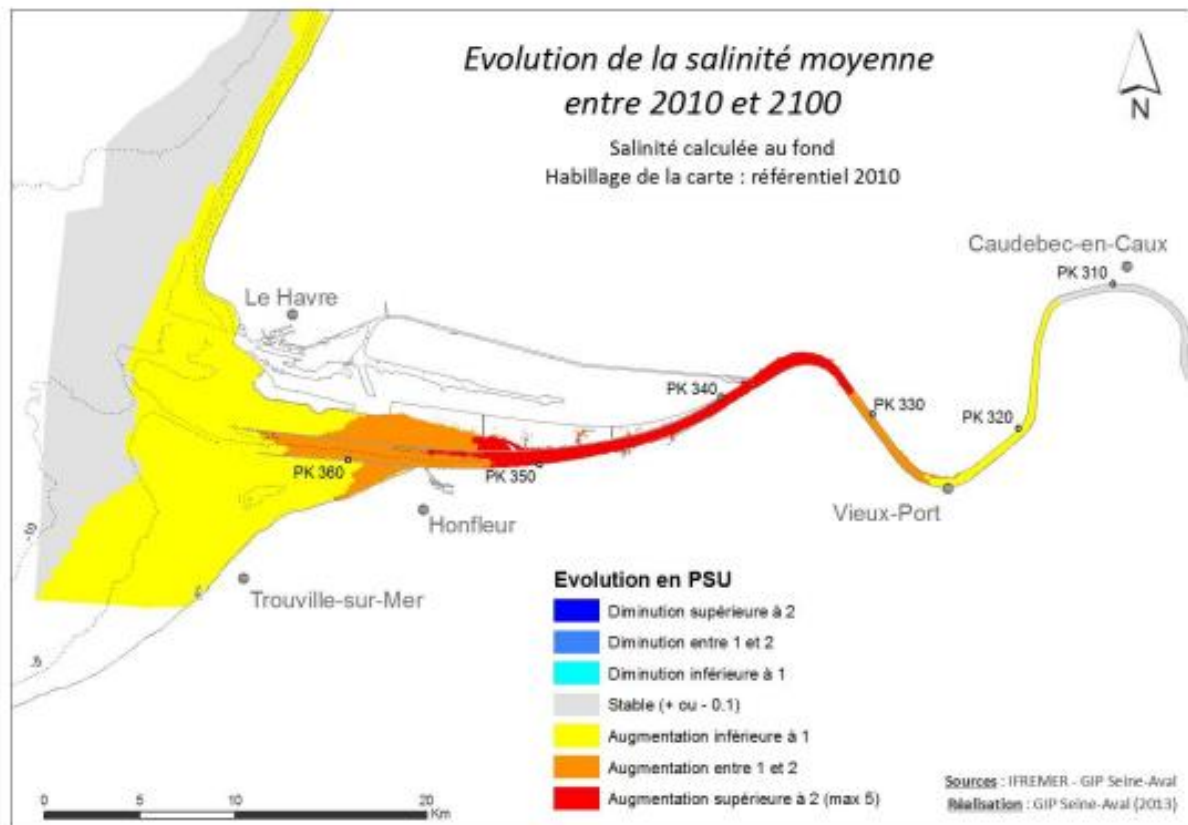


Figure 7 : Carte du différentiel de l'évolution de la salinité dans la partie aval de l'estuaire de la Seine entre la période 2010 et 2100 (Bacq et al., 2013).

3.3/ Sédiments et contamination

- Approche rétrospective

Dans l'estuaire, les forçages naturels gouvernent la dynamique des particules qui peuvent s'accumuler de manière temporaire ou pérenne dans différentes zones spécifiques (vasières latérales, bouchon vaseux, chenal...). Le dragage des chenaux d'accès et des zones portuaires (de par leurs profondeurs artificiellement excessives comparées à la morphologie naturelle) doivent être dragués pour permettre et sécuriser la navigation. Dans l'estuaire de la Seine, la sédimentation au niveau des accès portuaires est importante et nécessite un entretien journalier. Une synthèse des connaissances de la dynamique sédimentaire de l'estuaire de Seine a été proposée récemment par Lemoine (2021) et Fig. 8.

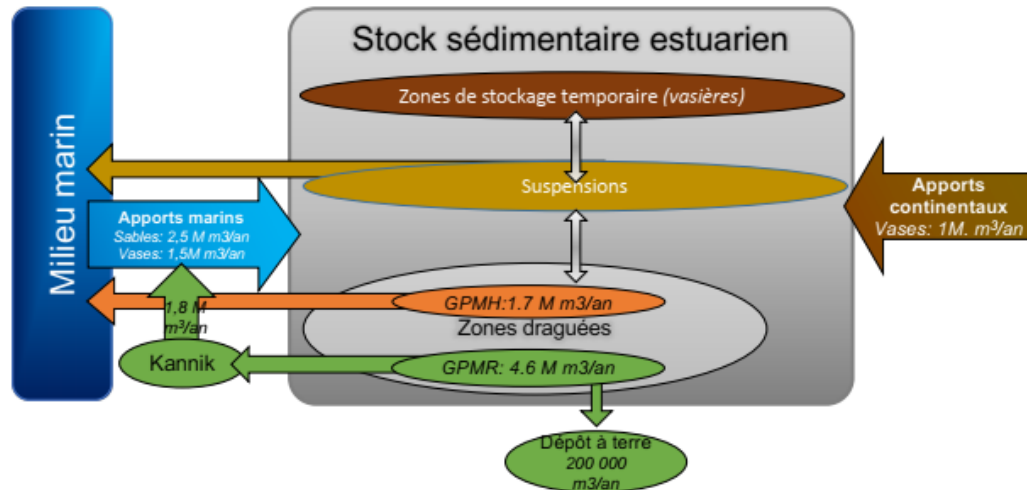


Figure 8 : Principaux flux sédimentaires naturels et anthropiques en estuaire, quantifiés d'après la bibliographie. Les flux sédimentaires induits par les dragages du GPMH et du GPMR sont indiqués en orange et en vert respectivement (Lemoine, 2021).

L'impact du changement climatique sur la dynamique des sédiments en estuaire va induire essentiellement deux modifications majeures : 1. Une modification des flux en fonction des modifications de l'hydrodynamisme, par exemple une érosion des berges localement plus intense, 2. Une modification de la position des corps sédimentaires (bouchon vaseux, vasières) en raison de la modification de la physico-chimie des eaux et de l'hydrodynamique (déplacement du front de salinité, Fig. 8). On pourra citer par exemple la remontée du bouchon vaseux dans l'estuaire de la Seine ou l'augmentation de la quantité de vases au niveau de l'embouchure de la baie de Seine. En Baie du Mont Saint Michel, on enregistre diverses évolutions telles que le comblement de fond de la baie ou la forte érosion au nord.

- Approche prospective

L'une des approches de modélisation développée en estuaire de la Seine est la modélisation morpho-sédimentaire. L'objectif de cette approche est de simuler le devenir de la morpho-bathymétrie du secteur étudié, en couplant les processus hydrodynamiques, transports de sédiment et évolution de la morphologie (Fig. 9). Outre les scénarios climatiques à prendre en compte, il est nécessaire de prendre en compte les dragages menés par les autorités portuaires (Grasso et al., 2020). Toute évolution morphologique de l'embouchure est extrêmement dépendante des flux particuliers échangés en amont et en aval. Surtout, ces flux « naturels » sont considérablement modifiés par les flux anthropiques liés aux opérations de dragage. La réponse morpho-dynamique de l'estuaire dépend donc des stratégies de dragage, en particulier des possibilités de remaniement des dépôts de dragage et de retour éventuel vers l'estuaire des matériaux concernés (Grasso et al., 2020).

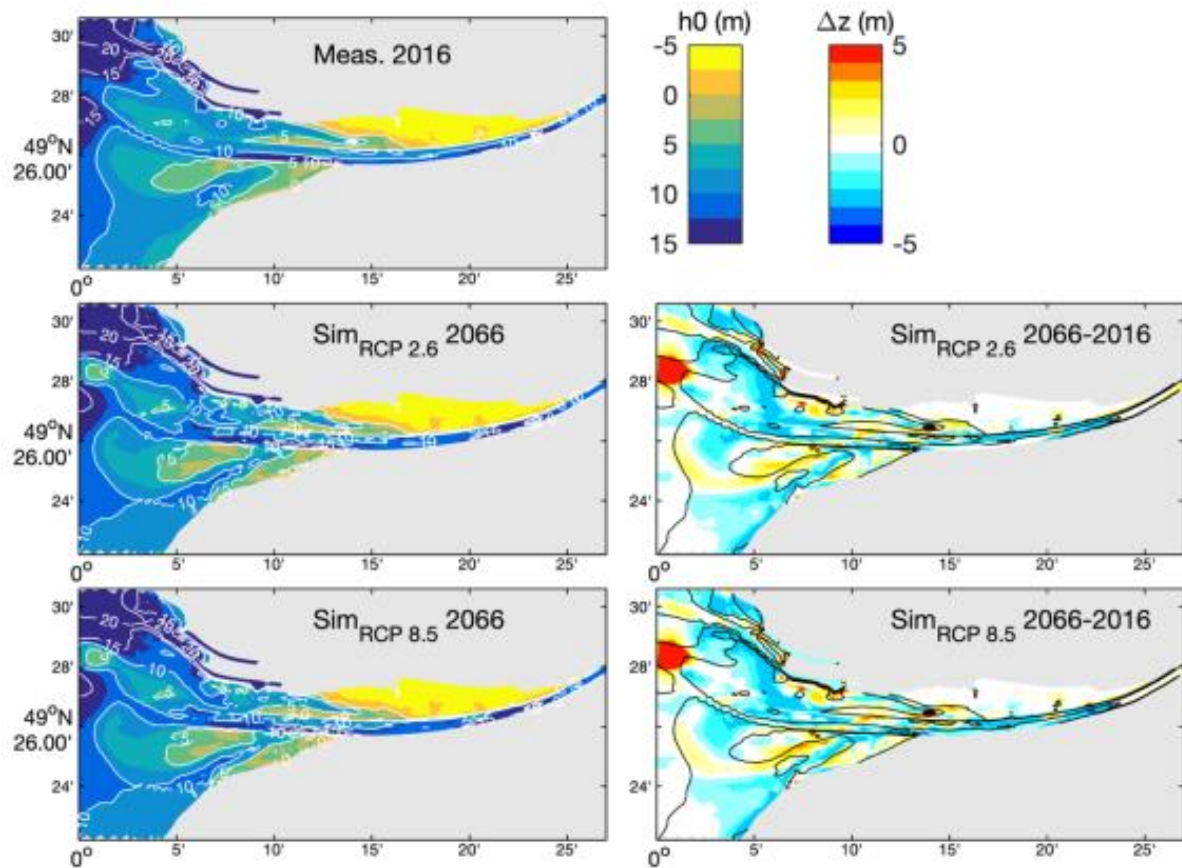


Figure 9 : Evolution morphologique de l'estuaire aval entre 2016 et 2066. (Gauche) Bathymétries h_0 et (droite) différentiels bathymétriques Δz , simulés avec une montée du niveau de la mer suivant les scénarios RCP 2.6 (+3 mm/an) et RCP 8.5 (+24 mm/an) in Grasso et al., 2020.

Pour les simulations prospectives, deux scénarios « extrêmes » de montée du niveau de la mer ont été testés (RCP 2.6, +3 mm/an et RCP 8.5, +24 mm/an, Sweet et al., 2017)). Il ressort de ces simulations que l'estuaire de Seine a la capacité de s'adapter et suivre la montée du niveau de la mer avec une accréation globale de l'embouchure. Cette adaptation se traduit par des estrans moyens et supérieurs ($h_0 = [2,5;-5]$ m) conservés après 50 ans. Il est important de noter que la montée du niveau de la mer n'est pas systématiquement associée à une perte des zones intertidales, en particulier si suffisamment de sédiments sont disponibles pour nourrir l'adaptation morphologique de l'estuaire.

Cependant ce genre d'approche, également développé sur la Loire (Le Hir et al., 2014) est un défi scientifique pour prédire les évolutions à moyen et long-terme (10-50 ans). Selon Grasso et al. (2020), l'essentiel est de déterminer les objets d'étude et de connaître les capacités (forces/faiblesses) des outils numériques mis en œuvre pour y répondre. Ce sera toujours en considérant ce rapport « confiance/incertitude » que nous pourrons aborder objectivement les réponses potentielles de l'estuaire face aux pressions climatiques et anthropiques.

L'ensemble des modifications des masses d'eau estuariennes (vitesses de courant, salinité, turbidité, oxygène) et des sédiments ont/auront des conséquences sur les écosystèmes et le relargage éventuel de contaminants historique dans l'environnement. Concernant ce relargage, il est extrêmement difficile de quantifier son impact, car il est dépendant de la pollution historique contenu dans les sédiments. Les zones de sédimentation contenant des sédiments contaminés peuvent être impactées par des événements extrêmes (par exemple des inondations ou des tempêtes) ou par les activités humaines (endiguement, dragage), ce qui peut entraîner une remise en suspension de ces sédiments dans les une nouvelle source de contamination. Il est alors nécessaire de déterminer leurs propres périodes de résilience (Gardès et al., 2020). Les familles de polluants concernés sont également variables spatialement (pollutions locales), un exemple de ce type d'approche (bassin versant de l'Eure) est présenté en figure 10 (Gardès et al., 2020).

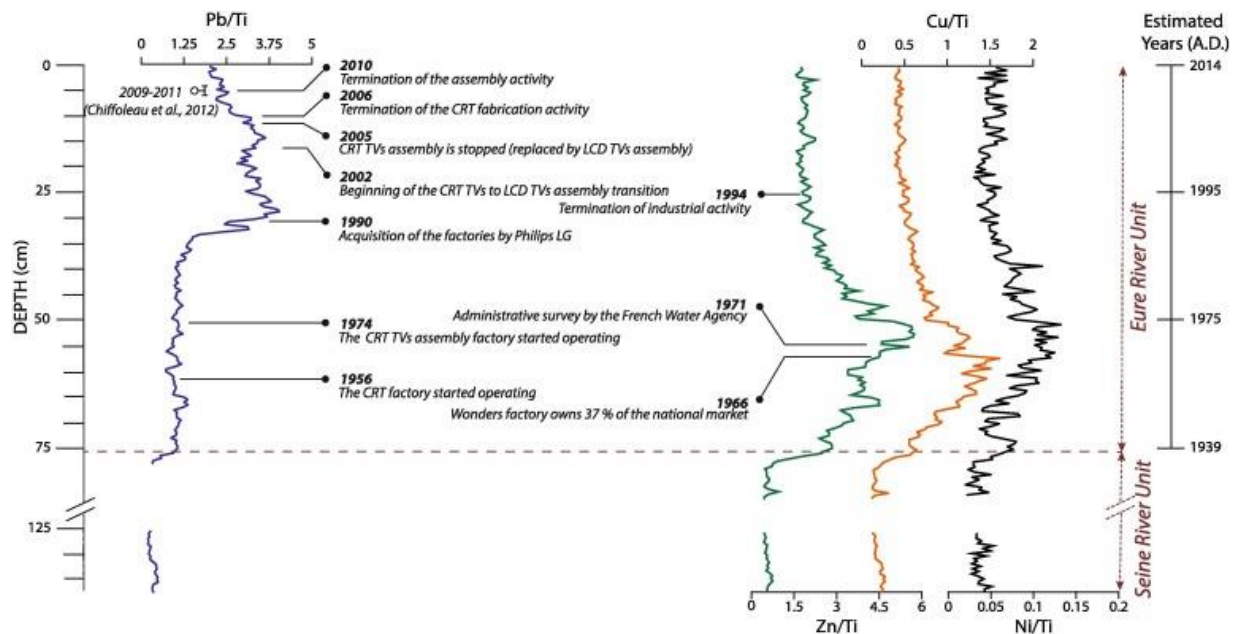


Figure 10 : Occupation du bassin versant de l'Eure et évolution des concentrations en Pb/Ti et Cu/Ti dans les carottes prélevées à l'embouchure de l'Eure.

- Impacts sur les Ecosystèmes (voir fiche Biodiversité Continentale et Marine)

Les impacts du CC pour la flore concernent une augmentation du niveau de la mer entraînant une remontée du front salin dans l'estuaire et donc un impact sur la flore des milieux associés (roselières, prairies sub-halophiles, prairies méso-hygrophiles) dont la flore pourrait ne pas supporter l'augmentation des teneurs en sels et se voir contrainte à la colonisation de nouveaux milieux dans le meilleur des cas ou bien à leur disparition. Plus particulièrement, les zones inondables seraient soumises à des fréquences de submersion plus importantes, à des temps de submersion plus longs, à une modification des teneurs en sel de l'eau se répercutant sur les sols, à des dynamiques sédimentaires peut-être plus marquées avec des zones de plus forte érosion ou de plus forte accrétion. Ces modifications physico-chimiques auront de fait une incidence sur les communautés vivant dans ces habitats et leur fonctionnement (disparition de certaines espèces, amplification d'autres, altération des interactions biotiques) ce qui induirait par *feed-back* une modification du fonctionnement de l'écosystème (e.g. modification du cycle de la MO, de l'activité bactérienne, des cycles de vie d'organismes marins). Cependant à l'heure actuelle, il est extrêmement complexe de construire des modèles prédictifs qui doivent se baser sur les trajectoires physico-chimique, biologique et fonctionnelle par des approches systémiques (Le hir et al., 2014). Ces approches nécessitent une base d'une connaissance fine du fonctionnement actuel et d'expérimentations élaborées pour tester les effets des scénarii climatique et marin attendus pour cette fin de siècle.

L'élévation du niveau marin également engendrer une modification des dynamiques estuariennes avec en particulier une remontée vers l'amont du gradient de salinité et du bouchon vaseux des estuaires (voir fiche Biodiversité Continentale et Marine). En Seine, cette remontée des gradients estuariens a été modélisée sur la base des hypothèses d'évolution des débits de Ducharme et al. (2009) et suivant les projections d'élévation du niveau marin du GIEC. Cette remontée implique une **modification des habitats aquatiques et des répercussions sur la faune et la flore** (Bacq et al., 2013).

Finalement, la connaissance scientifique des milieux estuariens et in fine l'impact du changement climatique sur ces zones est extrêmement variable en Normandie. L'estuaire de la Seine possède la plus large connaissance quelque-soit la discipline abordée et bénéficie de la présence d'observatoire en continu du milieu (par exemple le CPIER vallée de Seine). Sur d'autres systèmes, la recherche est un peu moins développée (Mont-Saint-Michel, Baie des Veys ou estuaire de l'Orne), mais les travaux existants permettent de proposer des solutions d'adaptation au changement climatique (par exemple projet Européen Adapto). Les plus petites interfaces entre les domaines continentaux et côtiers sont de manière générale assez peu étudiés. Au final, de nombreuses études liées au changement climatique dans les estuaires de Normandie sont menées. Cependant, **l'éparpillement des données entre les acteurs** (e.g : Agence de l'eau, ports, météo-France, BRGM, DREAL, GIP seine-aval...). La

constitution d'une base de données centralisée et uniformisée des paramètres permettant l'évaluation du CC et de sa prédiction, en renforçant l'acquisition de données sur les « petits » systèmes. L'une des grandes caractéristiques de ces systèmes est l'interactions entre les masses d'eau continentales, marines et sous-terraines (nappes). En effet, les environnements estuariens de Normandie couplent une pluviosité importante, des nappes puissantes et des marées de type hypertidale. Dans les grands systèmes, les pressions anthropiques sont nombreuses : dragages des chenaux et ports, extraction de granulats, aménagement des rives... **L'étude des concomitances** (préconisé par le GIEC) et des **phénomènes de blocage** issue des interactions entre les compartiments marins (élévation du niveau marin, augmentation des fréquences/intensité des tempêtes) et continentaux en surface (crues et déficits hydriques) et en sous-terrain (niveaux des nappes). La complexité de l'impact des changements climatiques sur les estuaires nécessite de développer plus fortement les **recherches proposant des approches couplées** permettant le croisement entre sédimentologie, écologie, chimie et socio-économie. En outre, ce type d'approche permet de proposer des solutions plus pertinentes permettant l'adaptation des sociétés aux changements climatiques. Enfin, le **développement d'outils** (e.g. machine learning, multi-capteurs, modélisation morphologique...) pour lever les verrous liés aux transferts d'échelles qui limitent notre connaissance des impacts du CC (et plus particulièrement des événements extrêmes) en Normandie.

4. La prise en compte des changements globaux dans les projets de territoire et la restauration des écosystèmes

Résumé :

- . Un premier constat : les changements globaux sont encore peu pris en compte dans les projets de territoire.
- . Les plans, projets et programmes élaborés par les diverses institutions dans la région, à des échelles très variables, prennent peu ou pas en considération les changements globaux.
- . Problème de pas de temps, échelle territoriale et précision des données disponibles.
- . Néanmoins, plusieurs initiatives d'ampleur modeste permettent d'entrevoir le cadre politique, méthodologique, juridique et financier de cette prise en compte.

4.1/ Les principes à suivre

- Favoriser la résilience du littoral

Depuis une trentaine d'années, des indicateurs océaniques et climatiques convergents mettent en évidence des trajectoires de recul des côtes (sous l'effet de l'élévation du niveau de la mer et de l'érosion sédimentaire) et des menaces d'appauvrissement de la qualité écologique des espaces marins. La rémanence d'aléas, comme les phénomènes météorologiques exceptionnels (tempêtes sur les côtes de France métropolitaine, comme l'épisode Xynthia du 27 au 28 février 2010, ouragans tropicaux) conjuguée à la présence croissante de constructions crée un risque accru pour les biens et les personnes et la perte d'habitats et d'espèces (même s'il peut y avoir gain de territoires et d'espèces marines). Aussi, l'hypothèse d'un « retrait stratégique » des ensembles bâtis les plus exposés est à l'ordre du jour. En outre, les stratégies de gestion des écosystèmes côtiers destinées à consolider les fonctionnalités de ces derniers sont vouées à se développer. En effet, elles garantissent souvent des gains sur le plan de la régénération écologique en même temps qu'elles accentuent la résilience de toute une façade littorale avec ses habitants et son potentiel économique. Les communautés humaines littorales doivent donc mobiliser des technologies, mais aussi transformer leurs réflexes acquis pour « composer » avec une nouvelle complexité. Il faut maintenant faire partager à la société et aux acteurs politiques l'utilité et la nécessité de protéger une parcelle de dune ou un hectare de marais dans une optique de prévention, d'anticipation, d'accompagnement des effets liés à un risque majeur. Il s'agit ainsi de réarticuler le petit et le grand, le contenu (la parcelle, la zone stratégique à protéger) et le contenant, c'est-à-dire le littoral en général où hommes, biens, animaux sont « embarqués » ensemble.

- Les enjeux d'interface terre-mer

Ils sont analysés à l'aune de l'importance et de la qualité ou non qualité des continuités ou connexions entre la terre et la mer. Ils concernent également les zones sujettes à des phénomènes d'érosion ou de submersion qui nécessitent la mise en œuvre d'une gestion souple et intégrée du trait de côte.

Les sites du Conservatoire sont au cœur d'un espace soumis à des évolutions permanentes et très fortes qu'il ne peut ignorer. Ses interventions doivent s'adapter à ces évolutions et pour certaines d'entre elles, les anticiper voire les encourager, comme par exemple la transition énergétique et écologique.

- Quatre grands mouvements sont à prendre en considération pour l'adaptation des projets de territoire aux changements globaux

La décentralisation des niveaux de décision et la demande croissante de participation de la part des citoyens devraient se poursuivre. La gouvernance des sites, c'est-à-dire la manière dont sont organisés l'information, les échanges et les prises de décision, doit permettre de s'adapter à ces évolutions.

Le caractère urbain ou péri urbain des territoires littoraux s'accroît au détriment des espaces ruraux sous l'effet d'une attractivité du littoral qui ne se dément pas. Celui-ci devrait se poursuivre, notamment sur l'espace rétro-littoral. Il en résultera des pressions nouvelles sur les espaces protégés, qu'il faudra contenir (par l'intervention foncière ou par le renforcement de certaines mesures de surveillance par exemple) tout en assurant un accueil de qualité et la satisfaction des attentes sociales respectueuses de la sensibilité des sites.

La dynamique côtière et les problématiques liées à l'élévation progressive du niveau de la mer conduisent à adopter une gestion évolutive de l'interface entre la terre et la mer, notamment dans les zones basses. Cela s'accompagnera d'évolutions des perceptions sociales et de l'adaptation du cadre juridique, qu'il convient de préparer ou d'anticiper dans un contexte sensible du fait des aléas et risques d'érosion et de submersion. Les sites du Conservatoire, leurs usages, notamment agricoles et, plus globalement, leur gestion, devront s'engager dans des démarches d'adaptation au changement climatique.

La biodiversité de la bande côtière va évoluer du fait des changements globaux prévisibles par les évolutions d'habitats naturels et d'aires de répartition d'espèces. De nouveaux modes de gestion devront être choisis au profit d'écosystèmes capables de s'adapter tout en gardant leur capacité d'accueil des espèces sauvages, par exemple en « migrant » au fur et à mesure du recul du trait de côte. Il s'agit donc de privilégier des écosystèmes « résilients » c'est-à-dire capables de retrouver leurs qualités et fonctions initiales après une perturbation.

4.2/ Quelques initiatives en Normandie (document complet en annexe 5).

- **Le Conservatoire du littoral en Normandie,**

Avec ses 73 sites d'intervention répartis tout au long du littoral normand est « en première ligne » pour observer, expérimenter et proposer aux acteurs du littoral des projets de territoire ou s'y associer.

En matière de réchauffement climatique, le Conservatoire a réalisé plusieurs études depuis plus d'une décennie. En 2004, une estimation des effets physiques de la montée des eaux marines a montré que 20 % de son domaine pourrait être plus ou moins fréquemment submergé entre 2050 et 2100. En 2012, une étude prospective de ces changements, suivie d'un Atelier, a permis de tester différents scénarii appliqués à différents faciès littoraux (zones humides, estuaires...) : résister, subir ou s'adapter.

En matière de réchauffement climatique, le Conservatoire a réalisé plusieurs études depuis plus d'une décennie. En 2004, sur l'ensemble du littoral métropolitain une estimation des effets physiques de la montée des eaux marines a montré que 20 % de son domaine pourrait être plus ou moins fréquemment submergé entre 2050 et 2100. En 2012, une étude prospective de ces changements, suivie d'un Atelier, a permis de tester différents scénarii appliqués à différents faciès littoraux (zones humides, estuaires...) : résister, subir ou s'adapter. Depuis 2012, le Conservatoire participe activement aux travaux de la Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte.

De 2011 à 2014, **le programme franco-anglais LiCCo** (Littoral et changements côtiers, ou Living with a changing coast) a permis d'accompagner étroitement des sites expérimentaux en Normandie et en Angleterre, au plus près des acteurs du littoral. Pour la partie normande les sites étaient les suivants : la basse vallée de la Saône (Seine-Maritime), l'estuaire de l'Orne (Calvados), la baie des Veys (Manche), le littoral du Val de Saire (Manche) et le havre de la Sienne (Manche).

L'ensemble des informations et données produites est accessible sur le site du réseau d'observation du littoral normand : <https://www.rolnp.fr/rolnp/index.php/152-actualites-et-agenda/projets/396-licco-littoraux-et-changements-cotiers-living-with-a-changing-coast>.

Initié en 2015, en association avec de nombreux partenaires locaux et nationaux, **le programme Adapto** développe et valorise des solutions de protection par la nature, en accord avec le Plan Climat du gouvernement de 2017. En Normandie, le site de l'estuaire de l'Orne fait partie des dix sites sélectionnés au plan national.

Pour en savoir plus : <https://www.lifeadapto.eu/estuaire-de-l-orne.html>.

- **Notre littoral pour demain**

Suite à la tempête Xynthia en 2010, la prise de conscience de l'importance des risques en milieux littoraux et de leur augmentation ces dernières années s'est fortement accrue.

Dans ce contexte, la Région Basse Normandie a lancé en 2014 un appel à projets intitulé « Notre littoral pour demain », destiné à accompagner les collectivités bas normandes vers la gestion plus durable de leurs littoraux.

Six cycles de trois modules ont ainsi été réalisés sur tout le littoral bas normand entre les mois de février 2015 et février 2016 afin de permettre aux élus locaux une appropriation collective des enjeux présents sur les littoraux bas normands. L'opération a été reprise par la nouvelle région Normandie qui l'a étendue à l'ex Haute Normandie (voir en annexe).

Pour en savoir plus :

<https://www.coutancesmeretbocage.fr/lesprojets/notre-littoral-pour-demain/>

<https://www.normandiecabourgpaysdauge.fr/gestion-des-dechets-assainissement/notre-littoral-pour-demain/>

<http://www.ccbdc.fr/environnement/>

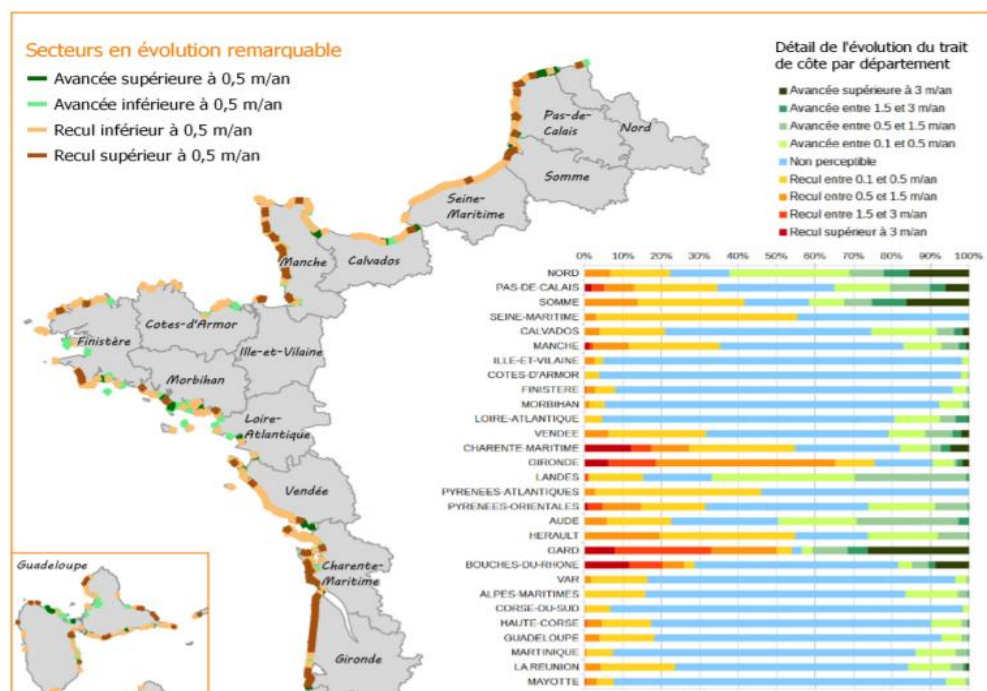
<https://www.caenlamer.fr/notre-littoral-pour-demain>

Références

- Bacq N., Lemoine J.P., Moussard S., Le Hir P., Lobry J., 2013. *Projet MESSCENE : Modélisation des fonctions écologiques de l'Estuaire de la Seine et ScENarios d'Évolution – rapport final*. Rapport du GIP Seine-Aval, projet financé par la fondation de France, 69p.
- Ducharne, A., Baubion, A., Beaudoin, M. Benoit, G. Billen, N. Brisson, J. Garnier, H. Kieken, S. Lebonvallet, E. Ledoux, B. Mary, C. Mignolet, X. Poux, E. Sauboua, C. Schott, S. Théry, P. Viennot, 2007. Long term prospective of the Seine River system: Confronting climatic and direct anthropogenic changes, *Science of The Total Environment*, Volume 375, Issues 1–3, Pages 292-311, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.12.011>.
- Ducharne, A., 2008. Importance of stream temperature to climate change impact on water quality. *Hydrology and Earth System Science*, 12, 797-810.
- Ducharne A, Habets F, Déqué M, Evaux L, Hachour A, Lepaillier A, Lepelletier T, Martin E, Oudin L, Pagé C, Ribstein P, Sauquet E, Thiéry D, Terray L, Viennot P, Boé J, Bourqui M, Crespi O, Gascoin S, Rieu J, 2009 - *Rapport final du Projet RExHySS : Impact du changement climatique sur les Ressources en eau et les Extrêmes Hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme*. 62 p.
- Druine, F., 2018. *Flux sédimentaire en estuaire de Seine : quantification et variabilité multi-échelle sur la base de mesure de turbidité*. Thèse de Doctorat, Université de Rouen, Normandie, 429p.
- Gardes, T., Debret, M., Copard, Y., Patault, E., Winiarski, T., Develle, A.L., Sabatier, P., Dendievel, A.-M. Mourier, B. Marcotte, S., Leroy, B, Portet-Koltalo, F., 2020. Reconstruction of anthropogenic activities in legacy sediments from the Eure River, a major tributary of the Seine Estuary (France), *CATENA*, Volume 190, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104513>.
- Graff, K., 2020. *Contribution à la cartographie multirisques de territoires côtiers : approche quantitative des conséquences potentielles et des concomitances hydrologiques (Normandie, France)*. Thèse de Doctorat, Université de Caen Normandie,
- Grasso et al., 2020. *Modélisation de l'évolution morphosédimentaire de l'estuaire de la Seine*. Rapport du programme de Recherche Seine aval 6, 74p.
- Le Hir, P et al., 2014. *Conséquences du changement climatique sur l'écogéomorphologie des estuaires (projet C3E2)*. Rapport final. Novembre 2014.
- Lemoine, J.P., 2021. *Dynamique morpho-sédimentaire de l'estuaire de la Seine : Rôle des dragages d'entretien*. Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale, 240p.
- Lemoine J.P., 2015. *Analyse par modélisation de l'impact de l'élévation du niveau marin sur les niveaux de pleine mer dans l'estuaire de la Seine*. Étude réalisée par le GIP Seine-Aval, 34p.
- Lesourd, S., Lesueur, P., Fisson, C., & Dauvin, J.-C., 2016. Sediment evolution in the mouth of the Seine estuary (France): A long-term monitoring during the last 150 years. *Comptes Rendus Geoscience*, 348(6), 442-450.
- Sweet, W. V., Kopp, R. E., Weaver, C. P., Obeysekera, J., Horton, R. M., Thieler, E. R., & Zervas, C., 2017. *Global and regional sea level rise scenarios for the United States*.

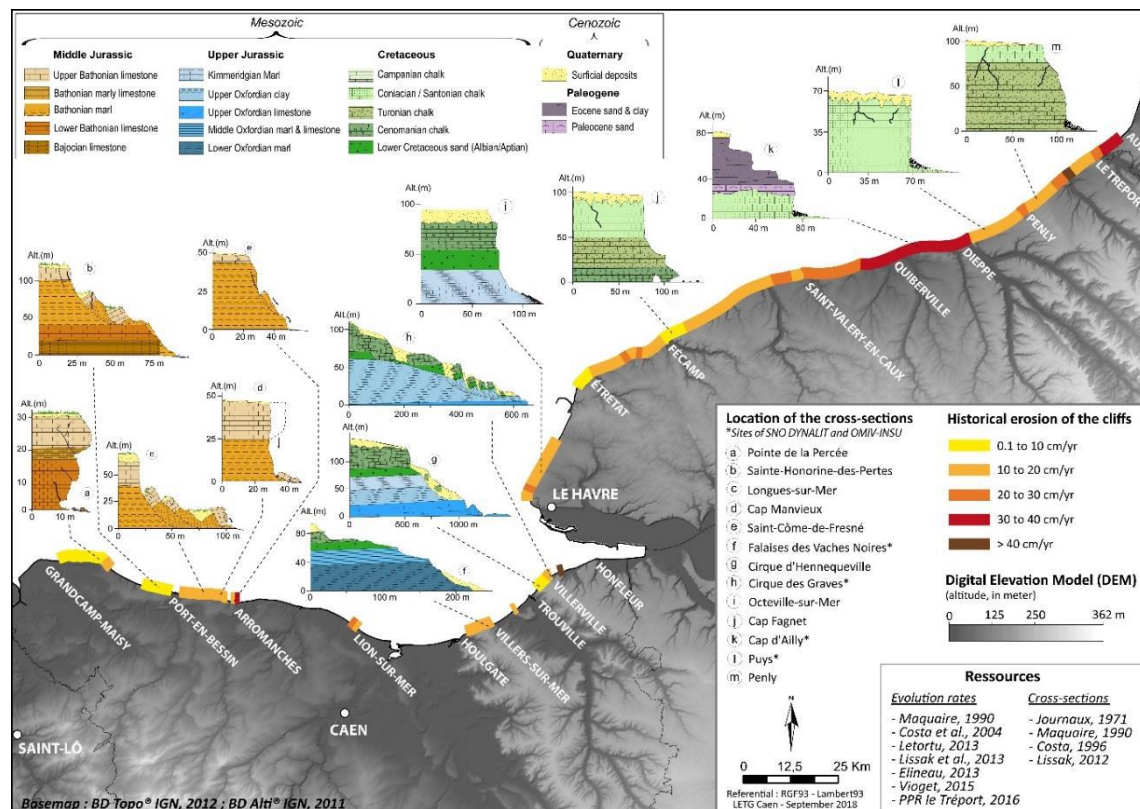
Annexes

Annexe 1



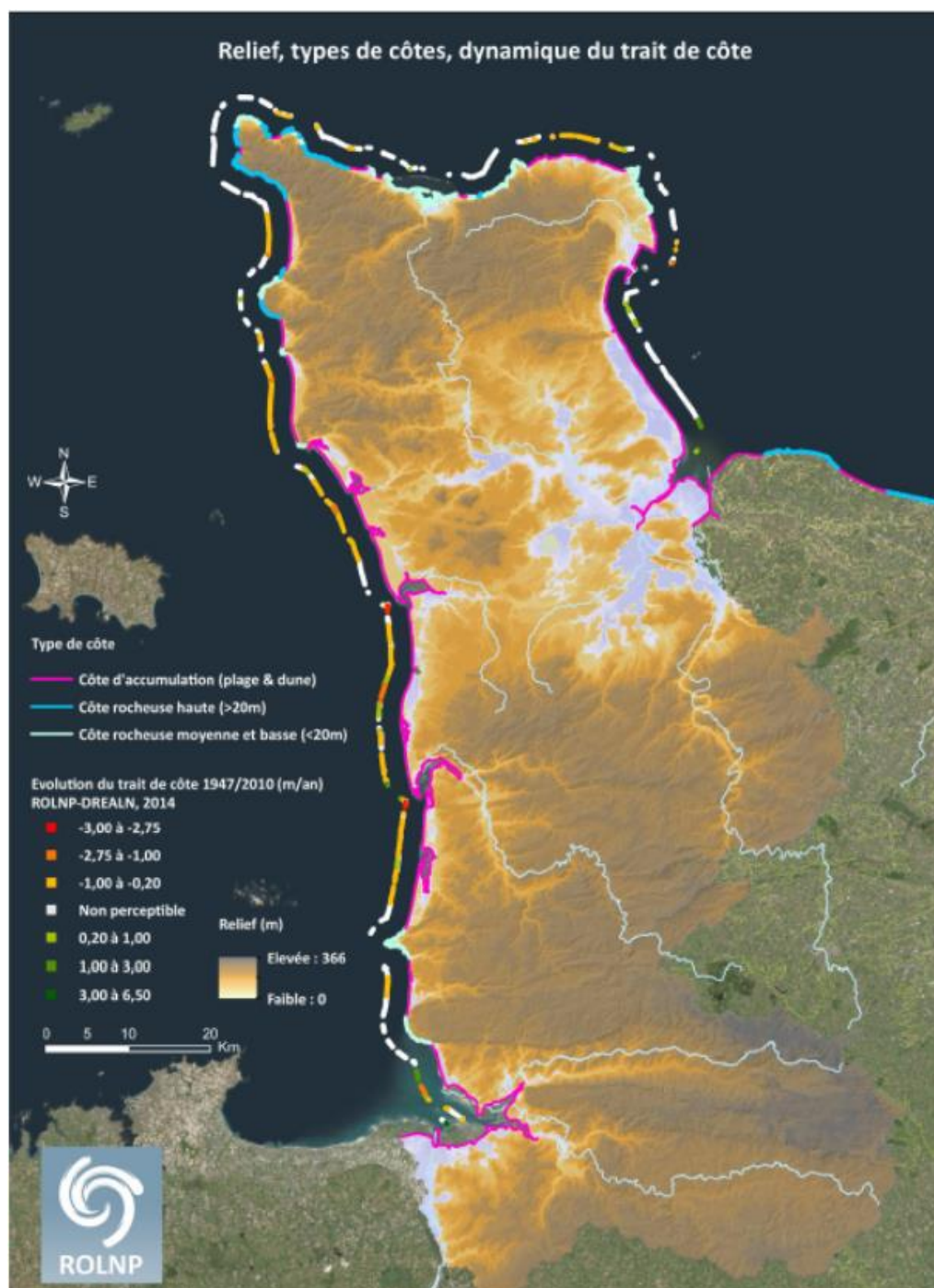
Indicateur National de l'érosion côtière (MTES, Cerema, 2015).

Annexe 2



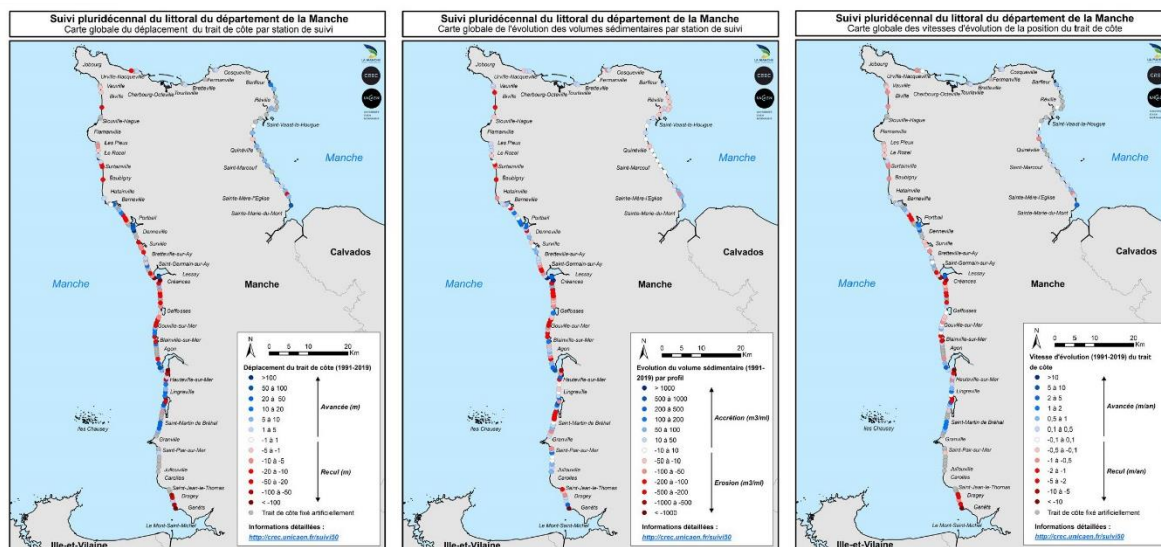
Vitesses de recul historiques des falaises sédimentaires normandes (en cm/an). (Costa et al., 2019).

Annexe 3



Dynamique du trait de côte du littoral de la Manche entre 1947 et 2010 (ROL/Dreal Normandie, 2014).

Annexe 4



Evolution du trait de côte et des volumes sédimentaires sur les plages sableuses du littoral de la Manche (CREC-Unicaen, 2019).

Annexe 5 - Exemples de projets d'adaptation du littoral en Normandie et de projets de renaturation



Conservatoire du littoral



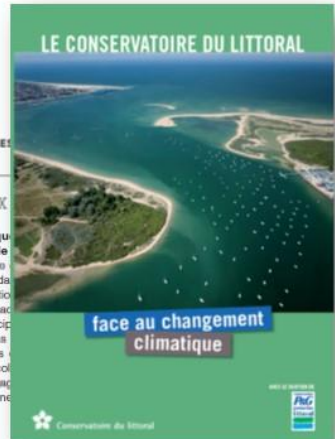
RÉGION NORMANDIE

Quelques exemples d'adaptation du littoral en Normandie et de projets de renaturation

L'action du Conservatoire du littoral en lien avec l'adaptation au changement climatique
une stratégie à long terme : 2050 (anticiper les rivages de demain)



STRATÉGIE D'INTERVENTION 2015-2050
Rivages de Normandie



LE CONSERVATOIRE DU LITTORAL
face au changement climatique

<http://www.conservatoire-du-littoral.fr/38-changement-climatique.htm>

Le site de Fréval (commune de Fermanville - 50)

avec des « solutions fondées sur la nature » (renaturation d'un cours d'eau, déplacement du sentier du littoral / GR 223)

Un site qui évolue fortement :

en 2016



en 2018



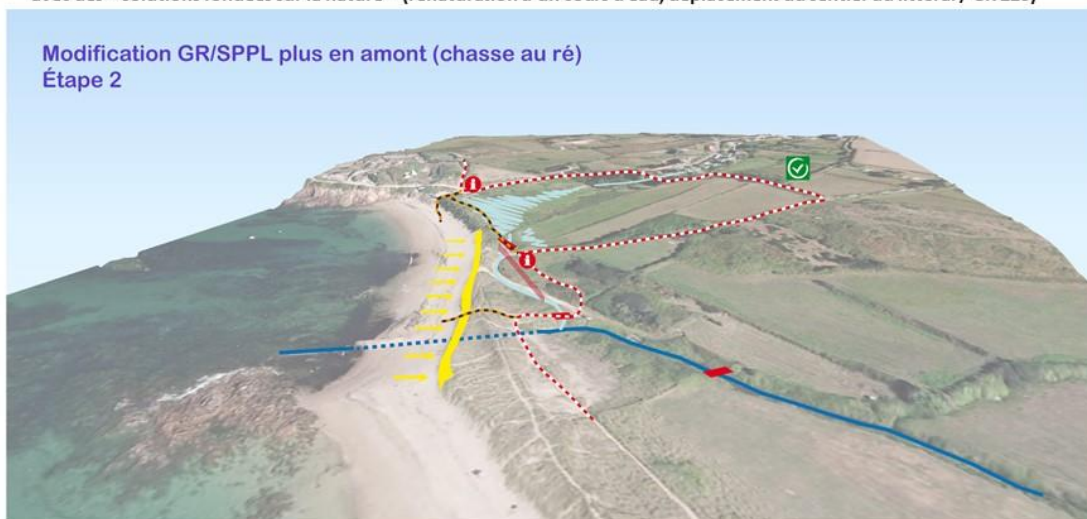
en 2020



Le site de Fréval

avec des « solutions fondées sur la nature » (renaturation d'un cours d'eau, déplacement du sentier du littoral / GR 223)

Modification GR/SPPL plus en amont (chasse au ré)
Étape 2





Le site de l'estuaire de l'Orne, programme Life Adapto :

l'approche paysagère afin d'envisager le territoire de Caen à la mer à la mer, le marais de Cagny comme site d'anticipation
(concertation monde agricole, lien collectivités locales, Ports de Normandie)



©Conservatoire du littoral / F Larrey



L'estuaire de l'Orne, programme Life Adapto :

l'approche paysagère afin d'envisager le territoire de Caen à la mer à la mer, le marais de Cagny comme site d'anticipation
(concertation monde agricole, lien collectivités locales, Ports de Normandie)

Le **grand paysage** pour changer d'échelle spatiale et temporelle

Envisager l'avenir à l'échelle de l'estuaire c'est-à-dire de Caen à la mer

Coopération avec l'Ecole Nationale supérieure de paysages de Versailles – Marseille

Programme Life adapto :
Rapport téléchargeable sur :
<https://www.lifeadapto.eu/>

école
nationale
supérieure de
paysage
Versailles Marseille



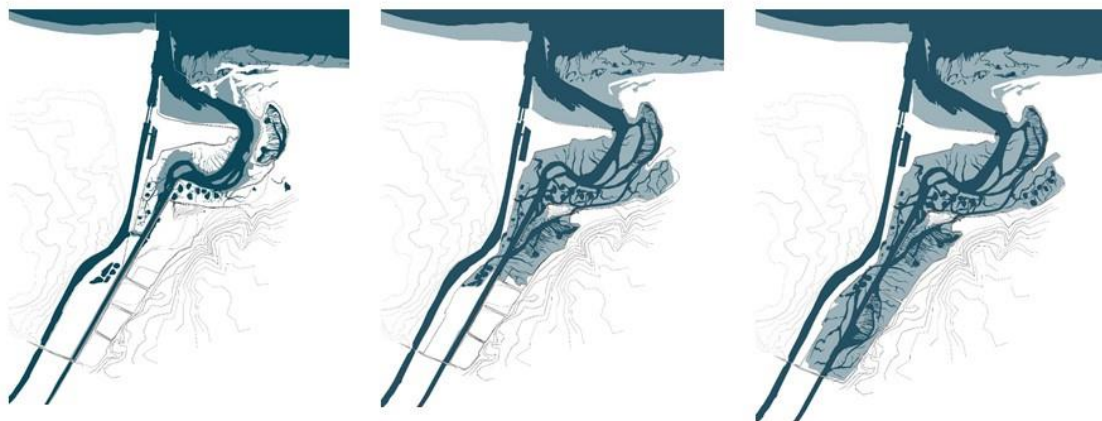
L'estuaire de l'Orne, programme Life Adapto :

réalisation de la 1^{ère} carte des paysages de « Caen à la mer » : à la fois rétrospective et prospective



L'estuaire de l'Orne, programme Life Adapto :

Envisager une trajectoire d'évolution de l'estuaire et du territoire : anticiper pour ne pas subir (de 2025, 2030 à 2050), Préparer les futures reconnections terre-mer (enjeux de restauration de la biodiversité, enjeu agricole...)



Le projet territorial de la Saône (76),
premier projet de recomposition spatiale d'un territoire littoral
(maintien de l'attractivité économique, diminution du risque, restauration de la biodiversité)

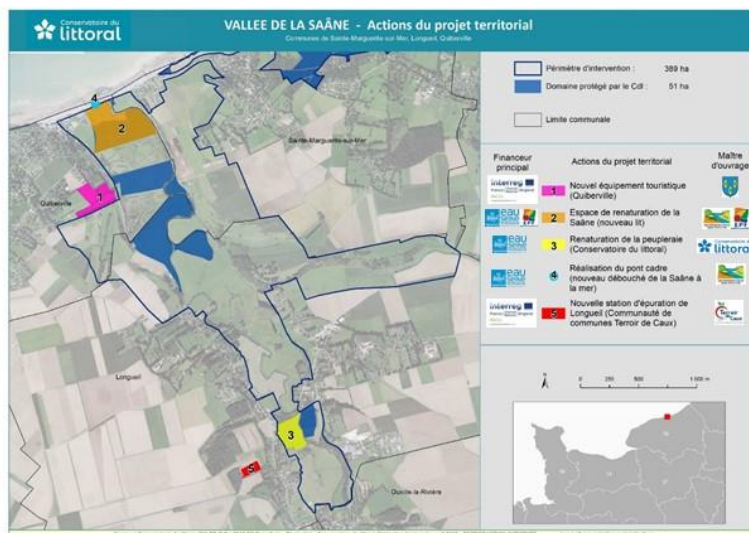
- D'un territoire vulnérable à un territoire résilient
- Un projet de recomposition spatiale et d'adaptation du littoral au changement climatique



Le projet territorial de la Saône,
premier projet de recomposition spatiale d'un territoire littoral
Une gouvernance dédiée à un tel projet... de nombreux partenaires !



Le projet territorial de la Saône, Les étapes du projet de recomposition spatiale (fin des travaux en 2025)



Le projet territorial de la Saône, L'engagement de l'Union Européenne, le projet PACCo L'engagement de la Région, du Département de Seine Maritime & de l'Agence de l'Eau Seine Normandie dans le projet

Au total ce sont près de 18 M€ qui seront engagés sur le territoire de la basse vallée de la Saône d'ici 2025

- Répartition des principaux contributeurs :
- Union Européenne via Interreg PACCo 8 M€
 - AESN 5,5 M€
 - Département de Seine Maritime 571 386 €
 - Région Normandie 376 683 €
 - Etc.

