Modifications physiques du littoral

L'Océan Atlantique au Truc Vert, Gironde © Stéphane Bujan

Coordination : **Bruno Castelle**

Rédacteurs : **Stéphane Abadie, Xavier Bertin, Bruno Castelle, Éric Chaumillon, Goneri Le Cozannet, Nathalie Long, Nicolas Rocle, Aldo Sottolichio**

Contributeurs : **Vincent Hanquiez, Vincent Marieu**

La Nouvelle-Aquitaine se caractérise par un littoral extrêmement diversifié de par son héritage géologique et par une forte vulnérabilité aux aléas d'érosion et de submersion marine en raison des nombreuses côtes basses et meubles et des forçages météo-marins énergétiques auxquels il est exposé. Le changement climatique impliquera un changement des régimes de vagues, des débits des fleuves et une élévation du niveau moyen des mers. En premier lieu, l'aléa submersion marine va être significativement accentué par l'augmentation du niveau marin. Dans les prochaines décennies, l'impact du changement climatique sur l'aléa érosion restera quant à lui difficile à distinguer de la forte dynamique des côtes dominées par les vagues et des impacts liés à la forte variabilité des vagues et des tempêtes, et aux activités anthropiques dans un contexte de pénurie sédimentaire. L'accentuation de l'aléa érosion, qui pourrait survenir plus tard dans la 2e partie du XXIe siècle, sera exacerbée par une probabilité accrue d'avoir des tempêtes avec des niveaux d'eau plus hauts. Des éléments de réflexion sur l'adaptation au changement climatique, la place des ouvrages dans la protection de la côte et sur les indicateurs littoraux sont discutés.

DIVERSITÉ DU LITTORAL

côtes rocheuses · plages · barrières sédimentaires · estuaires · embouchures tidales · baies · littoraux artificialisés

ÉROSION
ENVIRON **1 m/an** DEPUIS **70 ANS**

SUBMERSION
D'ICI 2100 ENTRE **0,3 à 1,5 m en +**

+ 3 mm/an Nouvelle-Aquitaine

avant · maintenant

tempêtes

FRÉQUENCE
100 ans
10 ans

niveau des mers plus haut de dégâts

- **1999** LOTHAR ET MARTIN
- **2009** KLAUS
- **2010** XYNTHIA
- **2013/14** SUCCESSION DE TEMPÊTES

1 INCERTITUDES
Ça avance, ça recule

2050 SUR LA PLUPART DE LA CÔTE LANDES/GIRONDE

− 65/100m

IMPORTANTE HÉTÉROGÉNÉITÉ **SPATIALE TEMPORAIRE**

2 VIVRE AVEC LE RISQUE
Nouvelle forme de gouvernance

CONCERTATION

Nouveaux modes de vie · Protection adaptée · Relocalisation · Réduction des gaz à effet de serre (CO_2)

3 GESTION DYNAMIQUE CONTRÔLÉE

Restauration des écosystèmes et résilience

1 INTRODUCTION

La région Nouvelle-Aquitaine se caractérise par un **littoral extrêmement diversifié**. Celui-ci inclut des côtes rocheuses, des plages et des barrières sédimentaires très développées (plus grande plage d'Europe avec 230 km de côte sableuse de l'estuaire de la Gironde au phare de Biarritz), des estuaires dont le plus grand d'Europe (estuaire de la Gironde d'une superficie de plus de 600 km²), des embouchures tidales, des baies et estrans tidaux et de très vastes plaines côtières dont les altitudes sont situées sous le niveau des plus hautes mers **[1]**. Cependant, cette région présente une cohérence naturelle car elle se superpose à une très grande partie du bassin aquitain ainsi qu'à des bassins versants majeurs, comme ceux de la Charente (10 549 km²), de la Garonne et de la Dordogne (56 000 km²) et de l'Adour (16 890 km²). Ses limites nord et sud correspondent respectivement au seuil du Poitou et aux Pyrénées occidentales. Cet héritage géologique (**Figure 1**) a une forte influence sur le littoral et ses évolutions contemporaines.

La partie nord du littoral (de la Sèvre Niortaise à la Gironde), de nature mixte rocheuse et sédimentaire, est découpée par des bras de mer subparallèles, de direction nord-ouest/sud-est, de plusieurs dizaines de kilomètres de long et de quelques kilomètres de large. Il s'agit des Pertuis Charentais et de l'estuaire de la Gironde. Ce sont des segments de vallées, partiellement ennoyés par la mer, et creusés de façon différentielle, lors de périodes glaciaires, selon des directions de faiblesses géologiques qui suivent les affleurements des différentes strates de roches ainsi que des failles majeures **[2] [3] [4]**. Ces structures imposent encore aujourd'hui la morphologie du littoral car elles sont à l'affleurement à l'extrémité nord du bassin aquitain. L'ensemble de ces structures et de leurs directions sont un héritage de l'histoire géologique de la région, incluant successivement la formation de la chaîne hercynienne (350-250 mA), l'ouverture du golfe de Gascogne (136-80 mA) et la formation des Pyrénées (65-40 mA). En revanche, la partie sud du littoral est essentiellement rocheuse (de la pointe St. Martin à la Bidassoa), en raison de la formation et du soulèvement des Pyrénées. Cependant, on ne retrouve pas de grandes vallées qui découpent le littoral, car le cours des fleuves principaux a été dévié vers le nord par le soulèvement pyrénéen. La partie centrale du littoral est sédimentaire car le socle rocheux y est profond et non affleurant, en raison de la subsidence qui a entraîné la formation du bassin aquitain **[5]**. La morphologie côtière est ainsi rectiligne car dominée par l'action des vagues qui a façonné la plus grande barrière sableuse littorale d'Europe. La principale interruption de cette barrière est l'embouchure du bassin d'Arcachon, dont la limite septentrionale suit également la faille de la Leyre de direction également hercynienne nord-ouest/sud-est. Plus au sud, l'embouchure de l'Adour et les courants landais (fleuves côtiers), de moindre extension et largement moins étudiés que les grandes embouchures du nord, constituent d'autres interruptions du littoral.

Ces morphologies littorales variées exercent un contrôle majeur sur les écosystèmes et sur les activités humaines. Ainsi les régions estuariennes sont des environnements peu profonds et semi-fermés. Ils abritent une très grande diversité d'espèces. Leur fonctionnement écologique est fortement influencé par leurs paramètres physiques **[6]**, ils sont des lieux de nourriceries, de refuge et de croissance. On y trouve de vastes estrans vaseux en pente douce qui sont des lieux de production primaire parmi les plus productifs de la planète et sont à la base de nombreuses chaînes alimentaires et des écosystèmes cultivés conchylicoles. Ces morphologies exercent également un contrôle sur les activités humaines littorales, puisqu'une grande partie d'entre elles dépend des ressources biologiques (pêche, conchyliculture).

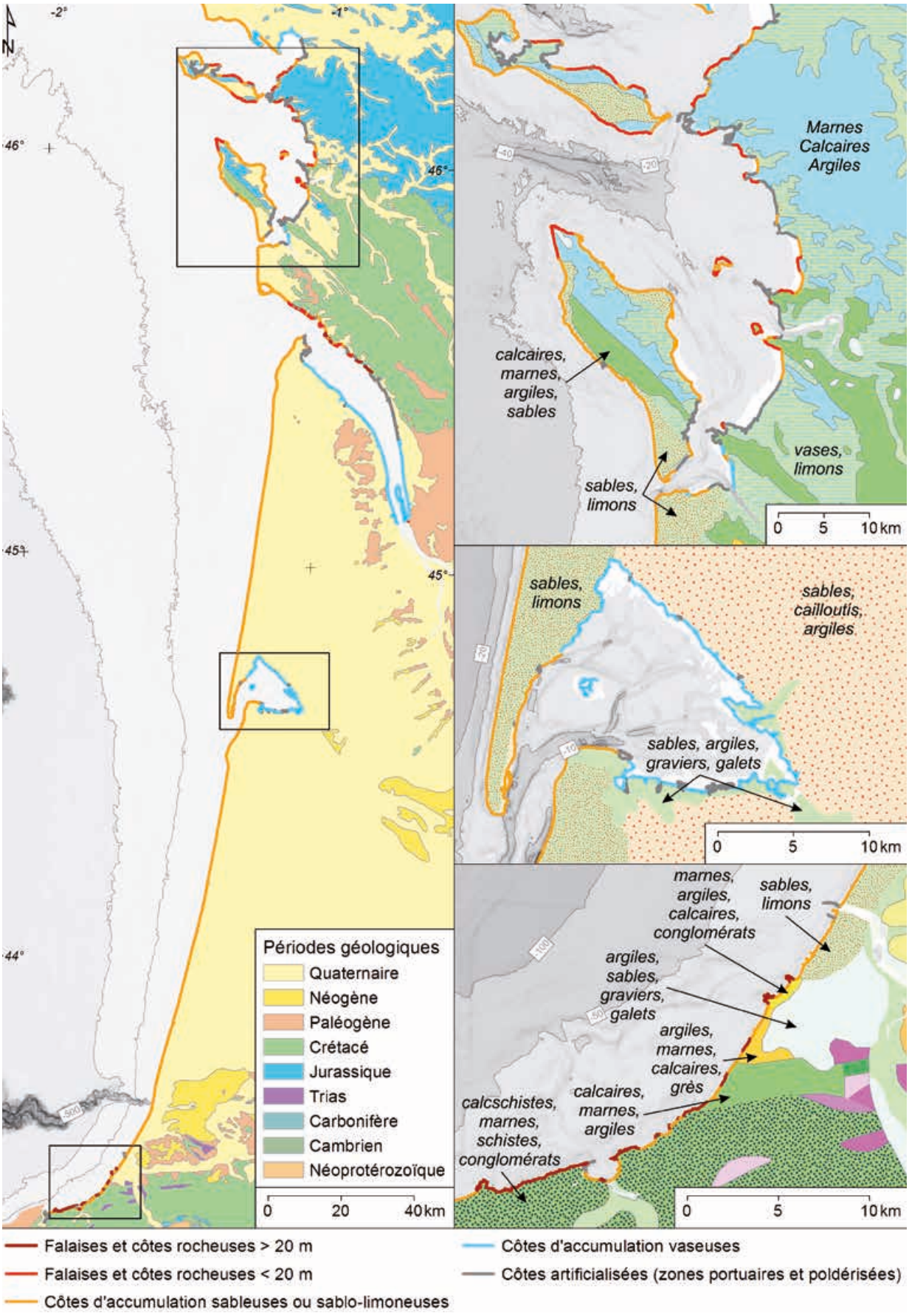

Figure 1 : *Carte géologique (BRGM) et nature du trait de côte (CEREMA) de la Nouvelle-Aquitaine. Les côtes artificialisées représentées ici concernent principalement les polders, les ports ou encore les digues de grandes dimensions. Certaines parties artificialisées (e.g. plages du Cap Ferret, de Pilat/mer, domaines de Certes et de Graveyron sur le Bassin d'Arcachon, certaines villes côtières comme Lacanau, Soulac et Montalivet) sont indiquées comme naturelles à cette échelle mais sont en réalité en majeure partie anthropisées.*

En outre, les environnements semi-fermés (pertuis, estuaires, baies) offrent des abris favorables aux activités portuaires et aquacoles, et sont aussi des voies de navigation privilégiées. Les littoraux naturels sont vastes en Nouvelle-Aquitaine, mais il existe aussi une forte proportion de littoraux artificialisés par des ouvrages de défense contre la mer principalement contre la submersion et dans une moindre mesure l'érosion côtière **Figure 1**. Les coûts de ces défenses des côtes sont très élevés par rapport aux capacités de financement de la puissance publique, ce qui obligera dans les décennies futures et sous les effets du changement climatique à un choix inévitable entre le maintien des défenses côtières et leur renforcement, une adaptation plus souple, voire l'abandon en cas d'élévation importante du niveau marin ou de recrudescence des tempêtes. Il est désormais nécessaire d'envisager des défenses alternatives et des adaptations, reposant sur des recherches approfondies et une meilleure connaissance des processus mis en jeu.

Le littoral de la Nouvelle-Aquitaine est exposé à plusieurs aléas qui seront amenés à prendre de l'ampleur dans le cadre du changement climatique. L'intrusion d'eau saline dans les nappes ou encore l'avancée dunaire vers l'intérieur des terres sont des aléas souvent jugés moins préoccupants que (**Figure 2**) : (1) **l'aléa érosion**, défini ici comme le recul du trait de côte, et (2) **l'aléa submersion marine**, défini comme l'inondation temporaire d'une zone côtière. Dans les baies et les estuaires, certains effets néfastes liés à aux phénomènes d'envasement, de comblement et d'accrétion seront également traités.

Au niveau de la Nouvelle-Aquitaine, ces thématiques sont devenues depuis quelques années au cœur des préoccupations des chercheurs des laboratoires, en interaction avec les objectifs plus appliqués de l'Observatoire de la Côte Aquitaine et du GIP Littoral Aquitain. En effet, l'histoire récente de la Nouvelle-Aquitaine a été marquée par des événements extrêmes majeurs comme les tempêtes Lothar et Martin (26, 27 et 28 décembre 1999), Klaus (24 janvier 2009), Xynthia (27 et 28 février 2010) et plus récemment celles nombreuses de l'hiver 2013/2014. Ces dernières ont par exemple fait reculer le trait de côte dans beaucoup de zones bien au-delà des projections à 2040 réalisées par Aubié *et al.* **[7]**, et la tempête Xynthia a douloureusement rappelé que les côtes basses de la Nouvelle-Aquitaine sont particulièrement vulnérables à l'aléa submersion. Les avancées scientifiques récentes sur ces événements et leur impact, ainsi que l'ajout du littoral du département de la Charente-Maritime ont entraîné une très importante mise à jour scientifique et géographique de ce chapitre par rapport à celui publié en 2013 **[8]**.

Dans ce chapitre, après une description du fonctionnement actuel du littoral de la Nouvelle-Aquitaine et des aléas d'érosion et de submersion, l'évolution des principaux forçages et de leurs impacts sur les aléas d'érosion et de submersion dans le cadre du changement climatique seront explorés avant de discuter les méthodes d'adaptation à mettre en œuvre.

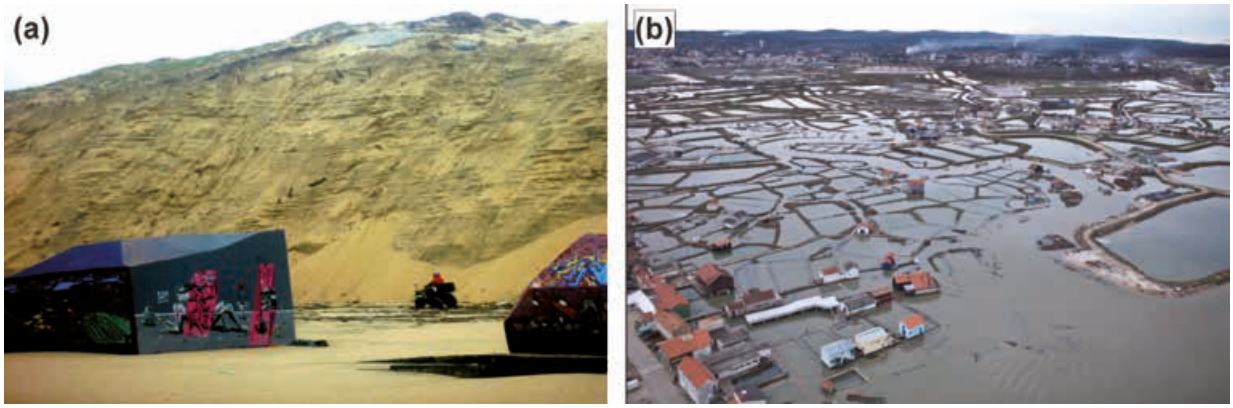

Figure 2 : Illustration des aléas d'érosion et submersion *en Nouvelle-Aquitaine : (a) érosion marine du cordon dunaire girondin à la sortie de l'hiver 2013/2014 (Cliché : B. Castelle) ; (b) submersion marine dans le secteur de la Tremblade au lendemain de la tempête Xynthia (Cliché : Philip Plisson).*

2 LES PRINCIPAUX FORÇAGES ET LEUR ÉVOLUTION DANS LE CADRE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

NIVEAU MOYEN DES MERS

Depuis environ 3 000 ans le niveau moyen des mers était relativement stable, avec une élévation ne dépassant pas 1 mm/an. Récemment, avec la mise en place de marégraphes depuis la fin du XIXe siècle, les mesures montrent depuis quelques décennies une **accélération de l'élévation du niveau moyen des mers** avec actuellement une augmentation de 3,3 +/-0,4 mm/an à l'échelle globale **[9]**. Le changement climatique va induire une augmentation encore plus rapide du niveau moyen des mers qui va impacter le littoral. La **Figure 3** présente les projections d'élévation du niveau de la mer pour deux villes de la région de la Nouvelle-Aquitaine : La Rochelle et Saint-Jean-de-Luz. Ces projections sont essentiellement similaires à celles du dernier rapport du GIEC **[10]**. La différence la plus importante est une prise en compte du risque d'une fonte rapide des calottes polaires contribuant à l'élévation **à l'élévation du niveau de la mer [11]**. Les projections de Kopp *et al.* **[12]** sont par ailleurs prolongées jusqu'en 2 200 en prenant en compte la subsidence. La **Figure 3** montre qu'au cours des deux prochains siècles, le niveau de la mer continuera à s'élever à Saint-Jean-de-Luz et à La Rochelle. En revanche, l'ampleur de ce phénomène sera très différente selon les efforts de réduction d'émissions de gaz à effets de serre : Kopp *et al.* **[12]** estiment qu'il y a au moins deux chances sur trois que le niveau de la mer ne s'élève pas de plus d'1 m d'ici à 2 200 dans le cas du scénario RCP 2.6 (compatible avec l'objectif des 2 °C). Au contraire, il existe au moins une chance sur deux de dépasser 1 m d'élévation du niveau de la mer dès 2150 pour les deux villes considérées, dans le cas du scénario extrême RCP 8.5 (pessimiste). Pour les deux villes, les incertitudes sont très importantes, et il n'est pas possible d'écarter la possibilité d'une élévation du niveau de la mer de plusieurs mètres par siècle, même dans le cas du scénario RCP 2.6 (le plus optimiste).

LES VAGUES

Le littoral de la Nouvelle-Aquitaine est exposé aux vagues générées par les dépressions extra-tropicales transitant d'ouest en est au-dessus de l'Atlantique Nord. Ces dépressions génèrent des vagues énergétiques principalement d'incidence ouest à nord-ouest avec des périodes de pic généralement comprises entre 8 et 16 secondes. La variabilité saisonnière de l'énergie des vagues incidentes est forte, avec des hauteurs moyennes en été et hiver variant du simple au double (e.g. 1,1 m et 2,4 m au sud de la côte girondine **[13]**).

Il existe aussi une forte variabilité interannuelle contrôlée par des modes de variabilité climatique dans l'Atlantique nord, principalement en hiver, représentés par les indices *North Atlantic Oscillation* (NAO, **[14] [15] [16]**) et *East Atlantic* (EA, e.g. **[17] [18]**). Toutefois, dans le golfe de Gascogne, l'ensemble de ces indices n'explique qu'une partie de la variabilité totale, c'est pourquoi un nouvel indice (*West Europe Pressure Anomaly*, WEPA) a été développé **[19]**. En Nouvelle-Aquitaine, cet indice WEPA reflète la variabilité de la différence de pression atmosphérique entre l'Irlande et les Canaries et améliore de 100 à 150 % l'explication de la variabilité interannuelle de la hauteur moyenne des vagues en hiver, jusqu'à plus de 250 % celle des vagues extrêmes. À cette variabilité temporelle des vagues se superpose une variabilité spatiale le long de la côte de la Nouvelle-Aquitaine, avec un gradient sud-nord tel que les vagues du large sont en moyenne 10 à 20 % plus hautes au nord qu'au sud. Toutefois, le plateau continental étant plus large et moins profond au nord qu'au sud (**Figure 1**), les vagues sont plus dissipées et arrivent par exemple avec moins d'énergie sur la côte ouest de l'île d'Oléron que sur la côte des Landes.

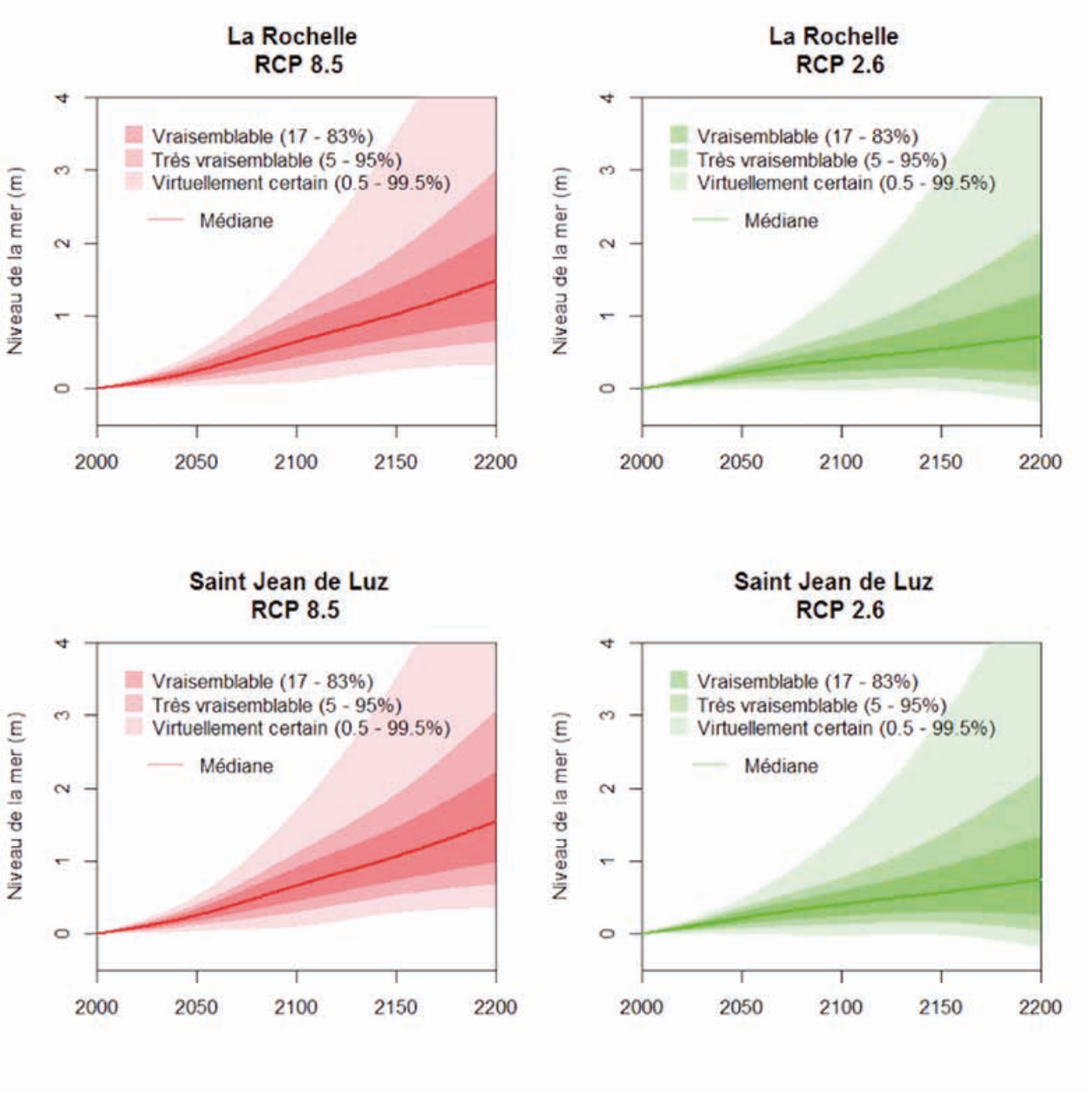

Figure 3 : *Projections d'élévation du niveau de la mer selon l'étude de Kopp et al. (12) pour deux villes de la région Nouvelle-Aquitaine (La Rochelle et Saint-Jean-de- Luz) et deux scénarios de changement climatique RCP 2.6 (optimiste) et 8.5 (pessimiste).*

En outre, plus localement, au niveau des côtes de la Charente-Maritime, l'ombrage énergétique et la réfraction/diffraction induite par les îles et les interactions avec les courants de marée modulent fortement les vagues incidentes à la côte, particulièrement sur les parties du littoral qui ne sont pas directement exposées aux houles atlantiques.

En modifiant les caractéristiques des régimes dépressionnaires à l'échelle de l'Atlantique Nord, le changement climatique affectera la climatologie des vagues, et l'intensité et la fréquence des événements extrêmes de vagues. Les simulations suggèrent que le golfe de Gascogne sera relativement épargné et pourrait même connaître une diminution de la hauteur moyenne des vagues d'hiver **[20]**. À plus haute résolution spatiale, Charles *et al.* **[21]** identifient également une baisse de l'énergie des vagues et un décalage vers le nord de leur orientation en été dans le golfe de Gascogne sur la base des résultats de modèles climatiques du 4e rapport du GIEC. Ces projections sur la moyenne hivernale des hauteurs statistiques portent sur les régimes de vagues moyens et restent incertaines. En outre, et alors qu'on peut considérer que le changement climatique se manifeste depuis déjà quelques décennies sur l'énergie incidente des vagues, les modèles et les observations montrent en réalité une augmentation récente de la hauteur moyenne des vagues en hiver (e.g. **[22]**), notamment dans le golfe de Gascogne (**[16] [23]**). La relative stabilité des hauteurs de vagues hivernales dans les prochaines décennies reste donc incertaine. En ce qui concerne les phénomènes extrêmes, les résultats de modèles de climat suggèrent une légère baisse de la fréquence des tempêtes **[24]**, mais d'autres simulations suggèrent une augmentation de la fréquence et de l'intensité des tempêtes en Europe de l'ouest, notamment en Nouvelle-Aquitaine **[25].** De plus, l'amplitude de cette augmentation dépend du scénario concerné, i.e. de nos futures émissions de gaz à effet de serre. Or plus que la moyenne des hauteurs de vagues, c'est bien l'intensité et la fréquence des tempêtes qui est primordiale dans les aléas d'érosion et de submersion. Enfin, il est important de rappeler que les modèles actuels peuvent, avec des incertitudes, fournir des projections du climat des vagues (e.g. hauteurs statistiques). Toutefois, ces modèles sont, et seront toujours, incapables de fournir une série temporelle des événements futurs à cause du caractère profondément stochastique des épisodes météorologiques générant les vagues. En d'autres termes, il ne sera jamais possible sur des échelles de temps supérieures à quelques semaines de prévoir l'occurrence et l'intensité des extrêmes, ni la chronologie des événements, alors que leur coïncidence avec des marées hautes de vives-eaux sera déterminante pour les aléas d'érosion et de submersion.

LA MARÉE

La marée dans le golfe de Gascogne est semi-diurne avec une légère asymétrie diurne (marnage de la marée du matin environ 0,2 m plus élevé que celui de la marée de l'après-midi). L'amplitude de la marée augmente depuis le Pays Basque vers les Pertuis Charentais, du fait de l'élargissement du plateau continental **[26]**. Le marnage en mortes-eaux est inférieur à 1,5 m sur l'ensemble de la zone, tandis qu'en vives-eaux il atteint presque 5 m dans le Pays Basque et peut dépasser 6,5 m dans les Pertuis Charentais. En raison des faibles profondeurs, la marée présente de fortes distorsions à l'approche du littoral. Dans les Pertuis Charentais par exemple, cette distorsion aboutit à une double pleine mer lors des mortes-eaux **[27]**. Dans les estuaires, la distorsion se traduit typiquement par des asymétries entre le flot et le jusant. Dans l'estuaire de la Gironde **[28]**, le flot est plus court que le jusant tandis que dans le bassin d'Arcachon, où les estrans sont bien plus développés que les chenaux, c'est le flot qui est plus long **[29]**. Dans l'estuaire de la Charente, des inversions de l'asymétrie se produisent entre le déchet (lorsque le coefficient de marée diminue), où le flot est en général plus court que le jusant et le revif (lorsque le coefficient de marée augmente), où une situation inversée peut être observée **[27]**. Une autre distorsion importante dans les estuaires est l'amplification de la marée par la convergence des rives et la diminution des sections vers l'amont. Ainsi, dans la Gironde, une marée de marnage de 4 m à l'embouchure atteint plus de 5,6 m à 95 km en amont, avec une distorsion plus importante en mortes-eaux qu'en vives-eaux **[30].** L'asymétrie de l'onde se traduit par une asymétrie des courants, plus intenses lors des phases les plus courtes. Les courants de marée sont inférieurs à 0,5 m/s sur le plateau continental **[26]** et sur les estrans vaseux **[31]** ; mais ils peuvent dépasser 2 m/s dans les estuaires, embouchures tidales et chenaux de marée **[32] [33]**. Dans le cadre du changement climatique, la marée sera globalement peu affectée. Pourtant, l'élévation du niveau de la mer pourrait localement impacter la marée, avec toutefois des augmentations du marnage de vives-eaux inférieures à 2 % en Nouvelle-Aquitaine pour une augmentation du niveau moyen des mers de 0,6 m **[34]**. Il faut cependant rappeler que cette étude a été réalisée avec la morphologie littorale actuelle, alors que celle-ci est vouée à évoluer ce qui impactera (diminution ou augmentation suivant la zone considérée) significativement le marnage.

SURCOTES

Les surcotes correspondent aux variations du niveau de la mer rapides (e.g. à l'échelle d'une tempête), au contraire de l'augmentation du niveau moyen des mers décrite plus haut, et qui ne sont pas liées à la marée mais dont l'origine est météo-océanique. Ces surcotes se superposent donc à la marée évoquée ci-dessus et sont une cause importante des épisodes de submersion marine. Les variations de la pression atmosphérique entraînent des variations du niveau de la mer, de l'ordre de 0,01 m lorsque la pression s'écarte de 1 hPa autour de la pression atmosphérique moyenne (1 013 hPa). Ainsi, une dépression de 970 hPa entraînera une surcote atteignant localement 0,43 m. Le vent induit un déplacement des masses d'eau en surface et lorsque ce déplacement est dirigé vers la côte, l'eau s'accumule le long du rivage et provoque aussi une surcote.

Cette accumulation est d'autant plus importante que le plateau continental est large et que les littoraux sont bordés d'eaux peu profondes. Pour une intensité de tempête donnée, les Pertuis Charentais sont donc soumis à des surcotes plus fortes que les côtes girondines, landaises et basques. L'intensité de ce transport augmente comme le carré de la vitesse du vent. De plus, pour une vitesse de vent donnée, les caractéristiques des vagues peuvent fortement augmenter ce transport, comme lors de la tempête Xynthia **[35] [36]**. L'effet de Coriolis lié à la rotation de la Terre entraîne une déviation de ce transport vers la droite par rapport à la direction du vent (vers la gauche dans l'hémisphère sud), si bien qu'au niveau des littoraux de la **région Nouvelle-Aquitaine, des vents de sud-ouest créeront une surcote plus forte que des vents de nord-ouest ayant les mêmes caractéristiques (vitesse, fetch, durée).** À la marée et à cette composante atmosphérique s'ajoute le déferlement des vagues qui provoque une surélévation du niveau d'eau le long du rivage *(wave setup)*, qui peut se propager vers des zones abritées du déferlement, comme des ports ou des estuaires **[36]**. Arnaud et Bertin **[37]** ont montré que lors de la tempête Klaus (janvier 2009), ce phénomène avait contribué à la surcote à hauteur de 0,5 m dans l'estuaire de l'Adour et le Bassin d'Arcachon. Les plus fortes surcotes observées au niveau de la région sont celles associées aux tempêtes Martin à Pauillac (2 m ; **[38]**) ; Klaus à Arcachon (1,7 m ; **[37]**) et Xynthia à La Rochelle (1,6 m ; **[36]**). L'évolution des surcotes sera donc directement impactée par le changement climatique à travers l'augmentation du niveau moyen des mers et l'évolution des régimes de tempêtes.

DÉBITS FLUVIAUX LIQUIDES ET SOLIDES

Les débits fluviaux sont particulièrement importants pour les environnements estuariens. Les eaux douces sont le principal vecteur de sédiments, mais surtout ils conditionnent les gradients de densité qui contrôlent la circulation résiduelle et, par extension, le flux net de sédiments retenus ou exportés à l'océan. Les crues fluviales contribuent aux surcotes et aux submersions, au même titre que les forçages météo-océaniques, mais avec des effets surtout dans les sections estuariennes amont, plus étroites que celles proches des embouchures. La synthèse d'Etcheber *et al.* **[39]** sur la Garonne et la Dordogne fait état d'une forte variabilité annuelle des débits respectivement 30-900 m^3/s et 210-480 m^3/s, mais surtout d'une diminution significative de ces derniers sur les cinquante dernières années (de 25 à 30 % pour la Garonne et de 20 % pour la Dordogne). Les modifications du milieu physique d'origine anthropique rendent difficiles l'identification des liens entre les variabilités climatiques et les variabilités hydrologiques. Toutefois, il est maintenant admis que la variabilité hydrologique de la Garonne à son exutoire est influencée par la NAO. La période d'étiage est quant à elle de plus en plus marquée avec des débits fluviaux de plus en plus faibles, chute aggravée par le pompage de l'eau dans le bassin versant. Les apports solides sont une variable cruciale car ils participent au comblement des baies et des estuaires, permettant l'ajustement topographique des marais pour compenser l'élévation du niveau marin **[40]**. Concernant les matières en suspension, les données de la littérature scientifique sont éparses pour les systèmes régionaux mais des études existent sur la Charente et la Seudre **[41] [42]**, ainsi que sur la Garonne et la Dordogne. En effet, Schäfer *et al.* **[43]** ont ainsi évalué en Garonne un flux entrant moyen de 3,2 millions de tonnes entre 1990 et 1999, dont une grande partie reste piégée dans l'estuaire puisque le flux de matière en suspension exporté à l'océan était évalué par Jouanneau *et al.* **[44]** **à 2,5 millions de tonnes/an. Les apports actuels de sable à l'entrée amont des estuaires sont considérés comme faibles mais n'ont pas fait l'objet d'études récente**s.

Les projections de différents modèles climatiques globaux sur l'hydrologie de la France à l'horizon 2100 **[45]** indiquent une modification des précipitations dans les bassins versants de la Loire, la Garonne et le Rhône. En plus du débit des fleuves, cette modification impactera l'altération des côtes à falaise par les eaux continentales. L'étude de Dayon **[45]** ne donne toutefois pas d'information sur l'évolution des extrêmes qui seront importants pour les submersions fluvio-marines au niveau des estuaires. Même si les autres bassins versants et fleuves régionaux n'ont pas été abordés dans cette étude, les exemples de la Garonne et de la Loire donnent une indication des tendances à prévoir pour les systèmes fluviaux aquitains. Les projections de Dayon **[45]** indiquent une diminution des débits selon un gradient nord sud, la diminution des débits étant plus forte au sud, dans des proportions allant de 20 à 50 % selon le scénario envisagé. L'augmentation de la température globale de 2 °C par rapport à l'ère préindustrielle implique une diminution des débits en été et en automne sur les quatre grands bassins versants français (Seine incluse). En été, les débits diminuent d'environ 20 % sur la Garonne, de 15 % sur la Loire. En hiver, ils diminuent d'environ 10 % sur la Garonne et la Loire. Une des conséquences supposées est que les expulsions de sédiments en mer seront plus limitées. Toutefois, l'évolution des débits solides futurs est incertaine, et à l'heure de cette synthèse nous n'avons pas identifié d'étude scientifique spécifique traitant de ce sujet.

3 LES DIFFÉRENTS ENVIRONNEMENTS LITTORAUX

LES ENVIRONNEMENTS SABLEUX DOMINÉS PAR L'ACTION DES VAGUES

En dehors des environnements estuariens et des plages adjacentes aux embouchures, les vagues sont le moteur principal du mouvement des masses d'eau et du transport sédimentaire en domaine littoral **[46]**. C'est notamment le cas sur la majorité de la côte ouverte de l'ancienne région Aquitaine **[47] [48]**. Lorsque les vagues arrivent avec une certaine obliquité à la côte, elles génèrent un courant de dérive, parallèle à la côte, maximum dans la zone de déferlement. Ce courant transporte de grandes quantités de sable le long du littoral, transport qu'on appelle dérive littorale et dont la variabilité spatiale explique une partie de l'évolution pluridécennale du trait de côte. Les flèches sableuses (Pointe de Gatseau à l'île d'Oléron, Pointe de la Coubre, Cap Ferret) constituent des barrières pluri kilométriques, délimitant des environnements semi-fermés, principalement construites par l'action de la dérive littorale **[32] [49] [50] [51]**. Sur des échelles de temps de l'ordre de quelques heures (tempête) à plusieurs mois/années, la variabilité de l'énergie incidente des vagues impacte fortement l'évolution du trait de côte. Les vagues de tempête arrachent le sédiment de la plage, et parfois de la dune, et le transportent dans la zone sous-marine au niveau des barres prélittorales **[52]** qui protègent le littoral pendant les tempêtes en dissipant l'énergie des vagues, au large, par déferlement **[53]**. Par contre, sur des échelles de temps plus longues (jours, mois), les vagues plus modérées ramènent le sable sur le haut de plage **[54]**. Ces vagues doivent être toutefois suffisamment énergétiques pour ramener le sable vers la plage. Ceci a des implications importantes puisque, par exemple, contrairement à ce que l'on pourrait penser, une augmentation de la hauteur moyenne des vagues n'implique pas forcément une accélération de l'érosion. À cause de cette dynamique transversale, contrôlée par l'énergie incidente des vagues, les événements extrêmes, les variabilités saisonnières et interannuelles se répercutent directement sur la variabilité du trait de côte sur les littoraux ouverts **[55] [56] [57].** Sur des échelles temporelles plus grandes, l'évolution chronique des plages sableuses ouvertes est aussi contrôlée par l'augmentation du niveau moyen des mers (actuellement environ 3,3 +/-0,4 mm/an à l'échelle globale **[9]**) et par les stocks sédimentaires disponibles sur le plateau continental et charriés par les fleuves qui contrôlent les bilans sédimentaires.

LES ENVIRONNEMENTS DOMINÉS PAR LA MARÉE

Ces environnements sont ceux considérés à l'abri de l'action des vagues, et sont relativement fermés par rapport au domaine océanique. À l'échelle de la Nouvelle-Aquitaine, il s'agit des estuaires (Sèvre Niortaise, Charente, Seudre, Gironde, Adour), du Bassin d'Arcachon, des baies de l'Aiguillon et de Marennes. La littérature scientifique est assez inégale entre ces différents systèmes, la Baie de Marennes et l'estuaire de la Gironde étant largement les plus documentés du point de vue de leur fonctionnement hydro-sédimentaire **[31] [58]** et de leurs évolutions morphologiques **[59]**. Dans les estuaires, de manière générale, les gradients de salinité produisent un blocage des sédiments en suspension apportés par les fleuves **[60]**. L'action périodique des courants de marée provoque des cycles de remise en suspension, transport et dépôt. Leur action naturelle est donc de combler les estrans par la décantation de sédiments fins en suspension, et de maintenir les chenaux à des

profondeurs relativement importantes, comme il a été vérifié par des suivis bathymétriques aux échelles du siècle **[59] [61]**. L'asymétrie de l'onde de marée contribue à piéger les sédiments en suspension à l'intérieur de l'estuaire, formant un « bouchon vaseux » qui est la principale source de sédimentation dans les estuaires **[62]**. Les baies tidales fonctionnent comme les estrans estuariens, et la décantation des particules y produit un comblement résiduel seulement contrarié par l'action érosive des vagues **[31]**.

LES ENVIRONNEMENTS MIXTES

Les embouchures des estuaires et des lagunes comportent des unités morphologiques caractéristiques comme des chenaux de marée, des deltas de jusant et de flot, des flèches sableuses et des bancs larges d'embouchure. Ces environnements littoraux sont exposés à la fois aux forçages des vagues et de la marée. Ce double forçage combiné à la présence de chenaux et de bancs peu profonds induit une forte dynamique et des évolutions morphologiques qui peuvent être très rapides **[32] [50]**. En général, les courants de marée sont plus forts au jusant qu'au flot, ce qui contribue à l'export de sédiments vers le large alors que les vagues induisent un transport de sédiments vers l'intérieur des systèmes, si bien qu'un équilibre s'opère entre ces deux forçages. Cet équilibre évolue donc à l'échelle des saisons mais également à l'échelle interannuelle, du fait de la forte variabilité des climats de vague. Ainsi, les chenaux de marée et bancs tidaux peuvent migrer de plusieurs centaines de mètres en quelques mois et les littoraux adjacents aux embouchures peuvent présenter des reculs bien supérieurs à ceux des côtes ouvertes **[63] [64].** En effet, les plus forts taux d'érosion observés en Nouvelle-Aquitaine correspondent au sud-ouest de l'île d'Oléron, à la pointe du Médoc et au Cap ferret et ces trois secteurs correspondent à des littoraux adjacents à des embouchures. Du nord au sud de la **région, les systèmes d'embouchure soumis aux vagues et à la marée correspondent au Pertuis Breton, au Pertuis d'Antioche, à la Baie de Marennes-Oléron, au Pertuis de Maumusson, à l'embouchure de la Gironde, au bassin d'Arcachon, aux Courants Landais (Mimizan, Contis, Huchet et Souston), à l'embouchure de la lagune de Capbreton, à l'embouchure de l'Adour**, de la Nivelle et de l'Uhabia et de la Baie de Saint-Jean-de-Luz.

LES CÔTES À FALAISE

Les falaises résultent des processus d'érosion littorale. Au contact des formations géologiques dures, l'océan façonne une côte sous forme de falaise associée à une plate-forme d'abrasion. La dynamique marine locale a également une action de déblaiement du pied de falaise, empêchant la formation d'un profil d'équilibre. L'eau douce continentale impacte aussi la stabilité globale de ce type de côte. Sur le long terme, elle intervient en effet dans l'altération des matériaux, offrant des formations géologiques meubles, altérées sur un grand linéaire de côte. De manière combinée, l'eau douce est un facteur déclencheur de mouvements de terrain ainsi qu'un agent de transport des matériaux érodés. Dans ce type d'environnement, les plages sont souvent limitées dans l'espace par des caps rocheux extrémités et constituées de sédiments meubles plus ou moins fins (plages dites « de poche » de sables essentiellement mais parfois graviers). Elles sont soumises à des conditions de circulations sédimentaires particulières dépendant notamment de la géologie héritée (e.g. **[65] [66]**). De manière générale, les transports sédimentaires sont préférentiellement transverses à la côte et chaque plage de poche peut être considérée comme étant une cellule sédimentaire fermée. Une grande partie des côtes à falaises se trouvent dans la partie sud de la Nouvelle-Aquitaine, de Biarritz à Hendaye. Dans cette zone, des aménagements ont été réalisés pour retarder le recul des falaises. On constate en effet que leur dégradation est passée d'un recul lent et progressif de la ligne de côte à un recul discontinu qui s'effectue par des glissements de grande envergure, généralement sous forme de glissements circulaires comme dans les altérites de Bidart et Guéthary, plans sur les flyschs de la Corniche Basque entre Saint-Jean-de-Luz et Hendaye ou d'éboulements sur les calcaires et marnes à Biarritz. Genna *et al.* **[67]** ont mis en évidence la présence d'une altérite le long de cette côte dont l'évolution latérale contrôle l'évolution du trait de côte avec l'apparition ou non de plages en pied de falaise suivant le type de roche présent en haut de falaise. Au nord de Saint-Jean-de-Luz, l'épaisseur de la barre de calcaire est très faible et l'érosion attaque directement les altérites induisant des évolutions rapides pouvant conduire à terme au creusement d'une baie comme par exemple la plage actuelle d'Erromardie. Il existe également des côtes à falaises dans le nord de la région, au niveau des Pertuis Charentais et de la rive droite de la Gironde. Les taux d'érosion sont modérés (< 0,5 m/an) et varient en fonction de la nature lithologique des falaises et de la présence ou absence de failles tectoniques **[68]**.

LES CÔTES AMÉNAGÉES

Les ouvrages côtiers de la Nouvelle-Aquitaine regroupent les typologies suivantes selon leur(s) vocation(s) :

1. les ouvrages dont la vocation est de fixer le trait de côte : épis en enrochements pour le transit latéral, jetées qui stabilisent les sorties de fleuves ou rivières, et ouvrages de front de mer ou perrés qui fixent le trait de côte en amont de zones urbanisées mais aussi les ouvrages de stabilisation des falaises rocheuses (masque poids, drain, etc.).
2. les ouvrages qui protègent de la submersion : principalement les digues ou levées sachant que certains ouvrages ont double vocation.

La prise en compte du littoral de la Charente-Maritime dans la Nouvelle-Aquitaine a considérablement augmenté le linéaire de côtes aménagées par rapport au premier bilan. En effet, en Charente-Maritime il y a 290 km de digues de premier rang sur un linéaire total de 463 km.

Ce contexte particulier est un héritage qui provient d'une politique historique d'assèchement des marais (poldérisation dès le Moyen Âge puis Édit de 1599 d'Henri IV). Cette artificialisation intense du trait de côte a abouti à une extrême vulnérabilité du département aux submersions marines avec 45 à 50 % de la bande côtière des 10 km (depuis le trait de côte, du sud de la Vendée à l'estuaire de la Gironde exclue) comprenant des zones basses ayant des altitudes situées sous le niveau des plus hautes eaux astronomiques **[1]**. Entre l'estuaire de la Seudre et la Vendée, en dehors de la plage d'Aytré et des îles, le littoral ne comporte que très peu de cordons dunaires (e.g. Marais d'Yves) qui pourraient limiter les submersions marines. Plus au sud, des digues en béton ou en terre (et des quais pour les secteurs urbains) protègent aussi le linéaire du bassin d'Arcachon et de l'estuaire de la Gironde sur plus de 350 km. Construits de manière hétérogène depuis le XVII^e^ siècle, de nombreux ouvrages de protections de l'estuaire de la Gironde sont jugés peu ou pas entretenus. Leur entretien fait l'objet des préoccupations actuelles de la part des gestionnaires (***www.smiddest.fr***). La côte basque possède enfin également un linéaire de côte aménagé important dans lequel on retrouve tous les types de protections marines allant de la digue mixte protégeant la baie de Saint-Jean-de-Luz contre les submersions répétées, à la jetée de l'embouchure de l'Adour **[69]**, aux perrés de front de mer de Biarritz ou Capbreton, jusqu'aux épis des plages d'Anglet.

En termes de fonctionnement, si dans la plupart des cas la fonction primaire de l'ouvrage est assurée au moins partiellement, des effets secondaires non désirés et mal contrôlés sont souvent observés. Ainsi, on remarque que les épis contribuent à l'érosion des tronçons de littoral en aval (par rapport à la dérive littorale) de la commune protégée **[70]**. Les perrés longitudinaux provoquent des affouillements au contact des structures et empêchent le trait de côte de s'adapter. Les jetées modifient de manière significative et parfois de manière négative **[71]** le transport sédimentaire naturel. Enfin, dans des conditions de submersion extrêmes, les ouvrages de protection sont des points durs du littoral peu résilients et parfois mal dimensionnés. Ils protègent en effet les zones urbaines situées en arrière de ces ouvrages, mais leur rupture ou leur sous-dimensionnement peut engendrer des conséquences catastrophiques (e.g. la submersion sur la presqu'île de la Faute-sur-Mer lors de la tempête Xynthia). C'est pourquoi, outre les défenses en dur, des méthodes de protection souple sont aussi mises en œuvre en Nouvelle-Aquitaine. C'est notamment le cas des rechargements de plage de grande ampleur inspirés des USA et des Pays-Bas (e.g. Chatelaillon (17), Anglet (64)) ou encore du système de *bypass* (transfert artificiel du sable pour contourner un obstacle) à Capbreton afin de rétablir le transit littoral naturel.

Ville de Lacanau. *© Julien Lestage*

4 L'ALÉA ÉROSION DANS LA NOUVELLE-AQUITAINE

SITUATION ACTUELLE

L'aléa érosion, en Nouvelle-Aquitaine comme pour la majorité des côtes dans le monde, concerne les côtes sableuses et rocheuses. Il est observé à l'inverse dans la plupart des régions du monde une tendance au comblement des baies et des estuaires non deltaïques, et donc à une accrétion pouvant affecter directement les écosystèmes subtidaux. En effet, il existe de nombreuses côtes régressives, dès l'instant où les apports sédimentaires sont suffisamment importants pour colmater l'espace disponible (somme de l'élévation globale du niveau marin et de la subsidence). La région Nouvelle-Aquitaine ne fait pas exception à cette règle. Aux échelles de temps longues (millénaires, siècles, décennies), ces zones régressives correspondent pour l'essentiel aux zones semi-fermées et dominées par la marée : estuaires **[72]**, lagunes **[61]** et baies tidales **[32] [50] [59]**. Le comblement sédimentaire des environnements semi-fermés a été amplifié par la déforestation **[73]**, les augmentations des précipitations **[42]** et la conchyliculture **[74]**. Le comblement naturel des environnements semi-fermés constitue un aléa majeur pour les voies navigables, les zones portuaires et la conchyliculture et génère des coûts très importants en termes de dragages.

La **Figure 4** s'appuyant sur CEREMA **[75]** donne une vision synoptique et diachronique de l'évolution du trait de côte ces 70 dernières années. La côte a globalement reculé entre 1950 et aujourd'hui. En dehors des zones présentant des ouvrages de défense ou autres constructions, ou encore celles où les données manquent (e.g. côte nord-ouest de l'île d'Oléron), les évolutions présentent une large variabilité spatiale. Les pertes de surfaces ont été les plus importantes (1) le long des littoraux sableux, (2) globalement au nord de la région et (3) au niveau des plages adjacentes aux embouchures (Maumusson et Arcachon), hors courants landais, et celles adjacentes à l'estuaire de la Gironde.

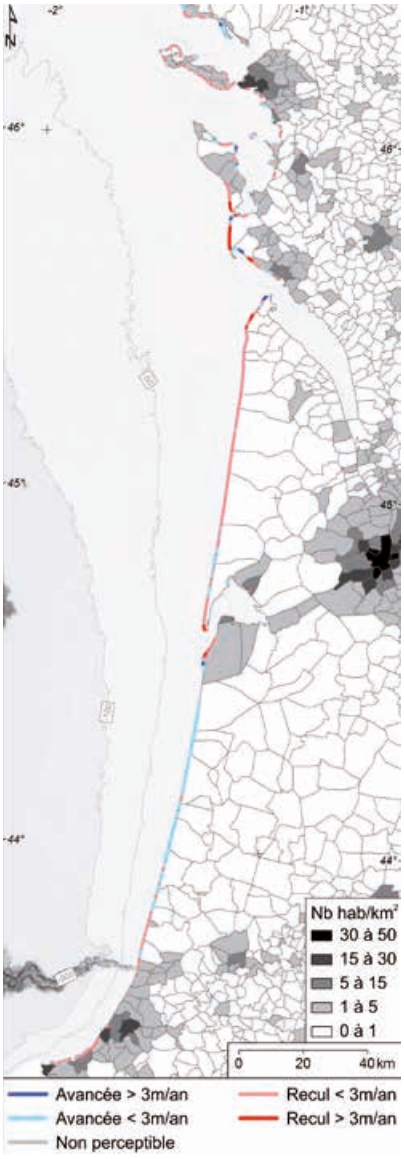

Figure 4 : *Taux d'évolution du trait de côte au cours de ces 70 dernières années (CEREMA) et densité de population dans les différentes communes. Comme indiqué dans le texte, les données de cette carte doivent être utilisées avec prudence.*

Toutefois, dans l'étude de CEREMA **[75]**, le trait de côte actuel de référence date, suivant les secteurs concernés, de 2008 à 2013, ce qui ne permet pas d'appréhender l'impact de l'hiver 2013/2014. Or, cet hiver très énergétique (cf. **ENCADRÉ 1**) a induit une érosion massive du trait de côte sur tout le littoral de la Nouvelle-Aquitaine (voir **[76]** pour l'Aquitaine). Par exemple, plusieurs portions du littoral de la Nouvelle-Aquitaine qui étaient jusqu'ici stables (e.g. la plupart du secteur sud des Landes) ont subi un recul du pied de dune dépassant souvent la dizaine de mètres **[77]**. D'autres secteurs qui étaient en recul chronique de l'ordre de 1 m/an ont subi un recul du pied de dune atteignant parfois 30 à 40 m **[76]**, voire même 60 m au sud de l'île d'Oléron **[63]**. Ces érosions massives et généralisées à l'ensemble du littoral ont fait que, sur une grande partie du littoral, le trait de côte s'est retrouvé à la sortie de l'hiver 2013/2014 proche, voire au-delà dans les terres, de l'estimation à l'horizon 2040 réalisée par Aubié *et al.* **[7]** qui ont depuis été actualisé par Bernon *et al.* **[78]** pour l'Aquitaine.

ENCADRÉ 1 : L'HIVER 2013/2014, UN ÉPISODE EXCEPTIONNEL ?

L'hiver 2013/2014 a été caractérisé par une succession de houles de tempête (i.e. pas forcément associées à des vents violents à la côte, cf. la houle de tempête Hercules le 7 janvier 2014) qui ont durablement affecté le littoral atlantique européen **[79]**, dont celui du littoral de la Nouvelle-Aquitaine **[77]**. Masselink *et al.* **[79]** ont réalisé une simulation rétrospective du champ de vagues dans l'Atlantique nord depuis 1948 et ont démontré que, de loin, ce fut l'hiver le plus énergétique en Europe de l'ouest depuis au moins ces 68 dernières années. Celui-ci n'est capturé par aucun des indices climatiques classiques (NAO, EA), mais l'est par le nouvel indice WEPA **[13]**. Le littoral de la Nouvelle-Aquitaine s'est retrouvé au maximum de cette « anomalie » où la moyenne des hauteurs de vagues enregistrée était supérieure de 45 % à la moyenne hivernale depuis 1948 **(Figure 5a).** Il n'y a pas eu d'événements « exceptionnels » à proprement parler, mais ce fut la succession des événements qui fut exceptionnelle (**Figure 5b**), certains coïncidant avec des marées de vives-eaux (e.g. tempête Christine le 3 mars 2014). Il n'y a pas encore de preuve scientifique que cet hiver est une manifestation du changement climatique, toutefois, le fait que 2 ans après l'hiver 2015/2016 se classe également 4e en termes d'énergie arrivant à la côte depuis 1968, pourrait laisser penser que la fréquence de ces hivers très énergétiques va s'accélérer dans les prochaines décennies.

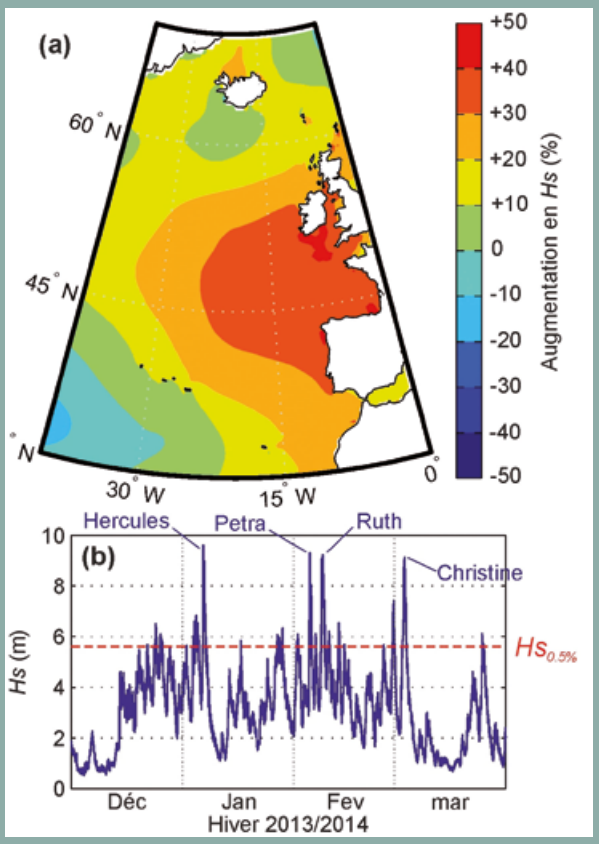

Figure 5 : *En haut : augmentation en % de la hauteur moyenne des vagues par rapport à la moyenne des hivers depuis 1948. En bas : série temporelle des hauteurs significatives des vagues mesurées au large du Cap Ferret pendant l'hiver 2013/2014 avec indication des 4 tempêtes les plus énergétiques. Reproduit avec la permission d'Elsevier (19) (77).*

Même si l'étude du CEREMA **[75]** permet d'avoir une vision spatiale couvrant quasiment l'ensemble du linéaire côtier de la Nouvelle-Aquitaine, celui-ci a plusieurs limites outre celle d'exclure les impacts de l'hiver 2013/2014. Par exemple, la précision de l'unique trait de côte ancien est faible, ce qui peut expliquer la situation estimée stable de la plupart de la côte landaise qui est pourtant en érosion sur plusieurs secteurs. L'étude présente surtout la limite de ne s'appuyer que sur 2 dates pour calculer les taux d'érosion, ce qui ne permet pas d'appréhender la dynamique temporelle des évolutions. La **Figure 6** qui s'appuie sur l'analyse diachronique des photos aériennes depuis 1950 sur le littoral ouvert de la Nouvelle-Aquitaine incluant l'hiver 2013/2014 **[64]**, et qui corrobore les observations décrites dans Bernon *et al.* **[78]**, révèle que la position du trait de côte peut présenter des trajectoires très différentes qui sont déterminantes pour comprendre l'aléa. Par exemple, l'érosion est relativement constante à la Pointe de la Négade depuis 1950 (~4,6 m/an), alors qu'au milieu de la côte ouverte du sud de l'île d'Oléron, celle-ci ne s'est mise en place qu'autour de 1970, avec un recul moyen de 8 m/an qui s'est ensuite sensiblement accéléré ces 10 dernières années. Cette même côte était en accrétion jusqu'au milieu du xxe siècle et ce changement de régime est corrélé au basculement de l'embouchure de Maumusson vers le sud **[32] [50]**. Ces observations corroborent celle de Chaumillon et Bigot **[63]** qui, à partir d'une analyse diachronique des photos aériennes et de profils topographiques en Charente-Maritime entre 1824 et 2015, montrent que les évolutions du trait de côte sont très variables dans le temps, avec toutefois une accélération notable de l'érosion en moyenne pour les côtes dominées par les vagues. D'autres sites comme la côte sauvage de la presqu'île d'Arvert se sont largement érodés jusqu'en 1970, mais sont restés relativement stables depuis ces 40 dernières années. D'autres littoraux sont relativement stables (e.g. sud Landes, secteur du Truc Vert au sud Gironde, **Figure 6).** Ainsi, l'aléa érosion est un phénomène complexe qui nécessite d'être appréhendé sur des évolutions pluridécennales, en s'attachant à caractériser la dynamique temporelle des évolutions.

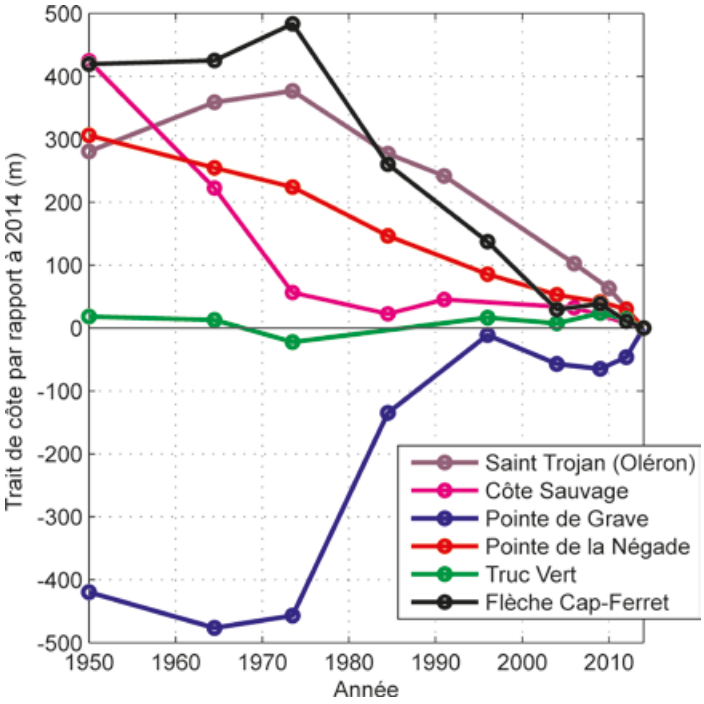

Figure 6 : *Évolution du trait de côte (0 correspond à la position du trait de côte à l'automne 2014) sur plusieurs sites représentatifs du littoral de la Nouvelle-Aquitaine. Reproduit avec la permission d'Elsevier (64).*

La forte variabilité spatiale et temporelle de l'évolution du trait de côte montre bien que l'augmentation du niveau moyen des mers, qui est la même dans tout le golfe de Gascogne et qui n'a connu qu'une légère accélération au cours de ces dernières décennies, n'est pas la cause des évolutions observées à court et moyen terme. De plus, en moyennant l'ensemble de l'évolution morphologique du littoral sableux ouvert de la Nouvelle-Aquitaine entre l'Adour et le milieu de l'île d'Oléron, on constate que l'érosion moyenne au cours de ces 70 dernières années est de 1,1 m/an **[64]**. C'est un ordre de grandeur au-dessus du recul induit par l'augmentation du niveau moyen des mers estimé avec la loi de Bruun **[80]**, loi certes assez critiquée mais qui permet d'estimer sous certaines conditions le recul du trait de côte en considérant une translation de tout le profil de plage sur de grandes échelles de temps. Cela démontre bien que, sur le littoral de la Nouvelle-Aquitaine comme sur beaucoup de littoraux sableux dans le monde, d'autres phénomènes sont en jeu. Le principal reste celui lié au déficit des stocks sédimentaires sur le plateau qui, après avoir permis la construction de la côte sableuse au cours de ces 3 000 - 4 000 dernières années (e.g. **[81]**), ne se résument parfois qu'à de simples placages sableux sur le plateau interne **[82]**. D'autres phénomènes naturels comme les gradients de dérive littorale **[83]** peuvent expliquer l'érosion chronique, notamment le long de la côte girondine. Les évolutions les plus complexes sont souvent celles des littoraux adjacents aux embouchures (e.g. nord Médoc, sud de l'île d'Oléron). Sur ces plages, la migration cyclique des passes ou l'accolement des bancs des deltas de jusant entraînent de fortes modifications voire des inversions de la dérive littorale, qui impactent les évolutions du trait de côte sur de larges échelles spatio-temporelles (e.g. **[32] [49] [50] [84]**).

À l'heure de rédiger ce rapport, le littoral qui présente l'évolution la plus préoccupante reste le sud de l'île d'Oléron (~30 m/an depuis 2000 à la pointe de Gatseau). Toutefois, cette section du littoral concentre des enjeux faibles (forêt domaniale). Le risque lié à l'aléa érosion est beaucoup plus prégnant dans les zones telles que la pointe de la Négade ou la flèche du Cap Ferret qui reculent de plusieurs mètres par an et abritent des enjeux plus importants (cf. bâtiment le Signal au sud de Soulac). Néanmoins, les évolutions ne sont pas toutes érosives. Certaines zones comme les flèches sableuses (la Pointe de Grave, la Pointe de Bellevue, la Pointe de la Coubre) s'engraissent de manière significative depuis plusieurs décennies **[85] [51] [64]**. D'autres zones, qui étaient stables avant de reculer massivement pendant l'hiver 2013/2014 sont à nouveau en accrétion (e.g. plage du Truc Vert, **[19]**). Enfin, certaines zones à forts enjeux sont protégées par des structures de défense qui sont jusqu'ici efficaces dans leur rôle de fixation du trait de côte, même si les paysages et les services écosystémiques y ont été définitivement altérés.

Le long des côtes rocheuses, l'érosion des plages confinées (dîtes de poche : Erromardie, Saint-Jean-de-Luz, etc.) suit les processus de base décrits précédemment tandis que les parties rocheuses évoluent au grès des mouvements de terrains localisés d'origine continentale et/ou marine. Les taux de recul moyens annuels du trait de côte allant de l'embouchure de l'Adour à celle de la Bidassoa ont été quantifiés à partir des traits de côte de 1954 et 2014 dans Bernon *et al.* **[78]**, le trait de côte retenu correspondant au haut de falaise. Les résultats montrent des reculs moyens de l'ordre de 0,6-0,8 m/an sur le littoral anthropisé d'Anglet, Abadie *et al.* **[71]**, de 0,15-0,3 m/an entre Biarritz et Bidart et une érosion très stable et homogène de l'ordre de 0,15 m/an au sud de Bidart (Guétary – Hendaye). Le littoral de Charente-Maritime n'était pas étudié dans Bernon *et al.* **[78]**. Dans ce département, les taux de recul des falaises côtières exposées aux vagues sont plus faibles que ceux des côtes sédimentaires et les données sur leurs évolutions sont peu nombreuses. Un suivi pluridécennal (1950-2010) de la Pointe du Chay (Angoulin sur mer) montre des reculs variables de 0,1 à 0,3 m/an essentiellement en fonction de la nature lithologique des falaises **[68]**. Un suivi à plus haute fréquence (2014-2016) de la falaise de Chef de Baie (La Rochelle) montre des taux d'érosion de 0,15 à 0,2 m/an **[86]**.

ÉVOLUTIONS LIÉES AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Quantifier les impacts du changement climatique sur l'érosion des côtes sableuses est un véritable défi scientifique et il n'existe pas d'approche générique pour s'attaquer à ce problème **[87]**. L'augmentation du niveau moyen des mers, la diminution du débit des

fleuves et des sédiments charriés vers les littoraux, l'augmentation possible de l'intensité et de la fréquence des événements extrêmes seront autant de facteurs qui vont aggraver les tendances passées et actuelles d'érosion, même si on estime les conditions moyennes de vagues changeront peu. Même si, localement, on pourrait observer des tendances d'érosion s'inverser vers l'accrétion, en particulier au niveau des littoraux adjacents aux embouchures, ou sur des échelles de temps courtes (quelques années), en réponse à une succession d'années peu énergétiques liée à la variabilité climatique naturelle dans l'Atlantique nord, l'érosion chronique, à long terme et globale à la Nouvelle-Aquitaine, sera poursuivie et accélérée. L'évolution de l'érosion sur la majorité du littoral dans le cadre du changement climatique ne pourra être réellement évaluée qu'à travers l'acquisition de longues séries de données du trait de côte afin d'en isoler les évolutions saisonnières, interannuelles ainsi que la signature des événements extrêmes.

Là où l'évolution de la fréquence des épisodes de submersion marine sur les côtes basses peut être un indicateur pertinent du changement climatique, il est beaucoup plus complexe de développer des indicateurs basés sur l'érosion des côtes. En effet, il est à l'heure actuelle impossible sur la plupart des côtes de distinguer l'impact des évolutions « naturelles », de l'impact anthropique et de celui du changement climatique. Même s'ils ont souvent été rapidement oubliés par le citoyen, les événements extrêmes ont depuis plusieurs siècles affecté le littoral de la Nouvelle-Aquitaine, **[88]**. Il n'est pas encore possible de démontrer de manière irréfutable que les tempêtes récentes (Martin, Klauss, Xynthia, hiver 2013/2014) sont la conséquence du changement climatique, et que l'érosion induite en est également une. Cela rend particulièrement difficile le développement d'indicateurs du changement climatique en domaine littoral, outre les indicateurs simples d'augmentation du niveau moyen des mers ou de sa température.

Les indicateurs tels que l'évolution de la période de retour des événements de submersion ou le recul du trait de côte ne donneront de réelles indications sur les impacts du changement climatique que d'ici plusieurs décennies, lorsque les autres phénomènes (e.g. variabilité naturelle intrinsèque du climat et événements extrêmes associés) pourront être filtrés.

Face à cette complexité et à l'impossibilité de réaliser des simulations déterministes quant à l'évolution du trait de côte, des approches probabilistes deviennent indispensables et doivent être encouragées. En utilisant une approche simplifiée, Le Cozannet *et al.* **[89]** ont intégré les incertitudes des différents forçages dans un modèle d'évolution du trait de côte d'un littoral sableux.

Les auteurs ont montré que l'augmentation du niveau des mers n'expliquera une augmentation de l'érosion généralisée des côtes sableuses que vers la fin du siècle, alors que dans les prochaines décennies la variabilité du trait de côte sera toujours principalement expliquée par le bilan sédimentaire et la variabilité des épisodes de tempête. Toutefois, cette étude fait l'hypothèse que l'intensité et la fréquence des événements de tempête ne seront pas affectées par le changement climatique, hypothèse qui pourra être affinée dans les prochaines années.

L'approche décrite ci-dessus constitue un premier pas vers les simulations probabilistes plus robustes, du type de celles utilisées en climatologie, qui permettront de réaliser des projections probabilistes d'évolution du trait de côte au cours du XXIe siècle. Toutefois ce type de simulations préliminaires nécessite encore beaucoup de travaux de recherche. Globalement, le recul généralisé du trait de côte, même si le taux moyen est extrêmement incertain, est le scénario le plus probable d'ici la fin du XXIe siècle. Il reste aussi possible qu'une partie du littoral reste relativement stable en moyenne, notamment dans certains secteurs du sud gironde et des Landes, où le littoral avance à nouveau depuis l'hiver 2013/2014 même s'il est loin d'avoir à ce jour retrouvé sa position pré-2014. Sur ces secteurs, c'est bien l'évolution des vagues hivernales, qui reste très incertaine, qui sera déterminante dans la stabilité du trait de côte. Cette notion d'évolutions très incertaines est souvent incompatible avec les contraintes auxquelles les décideurs font face. Les décideurs sont en effet en attente de valeurs chiffrées, déterministes, en termes de positions du trait de côte d'ici plusieurs décennies de manière à mettre en place des stratégies de gestion de la bande côtière adaptées, telle que le réalise le GIP Littoral Aquitain pour le littoral de l'ancienne région Aquitaine ; ou des plans de prévention des risques littoraux (PPRL) par les services de l'État. C'est en partie pour répondre à ces besoins, mais également dans l'objectif plus général d'actualiser la connaissance de l'aléa érosion datant de 2011 **[7]**, qu'une approche simple a été développée par l'Observatoire de la Côte Aquitaine pour cartographier des traits de côte prospectifs aux horizons 2025-2050 à l'échelle de l'ancienne région Aquitaine **[78]**. La méthode utilisée pour estimer les évolutions prévisionnelles s'appuie sur le prolongement des tendances passées (mesures du trait de côte *in situ* et par photo-interprétation pour la période 1966/2009), en ajoutant implicitement l'hiver 2013/2014 et l'augmentation du niveau moyen des mers.

À l'horizon 2050, un recul moyen du trait de côte du littoral sableux Landes/Gironde est estimé à 65 m et à plusieurs centaines de mètres le long des secteurs déjà les plus mobiles, notamment au droit des zones d'embouchure. Toutefois, il faut rappeler qu'il s'agit d'une projection déterministe utile pour les décideurs, mais qui fait abstraction des nombreuses variables telles que les variations climato-océaniques et hydrosédimentaires précitées. L'étude propose une approche visant à qualifier ces différentes sources d'incertitudes de manière à informer les gestionnaires des précautions nécessaires qu'il convient de prendre pour l'utilisation de ces données dans les stratégies de gestion et les PPRL. Pour ce qui est de la côte rocheuse, les projections ont également été réévaluées dans le même rapport. Les résultats montrent que les reculs à venir sont moins conséquents sur la côte rocheuse que sur la côte sableuse. Aux horizons 2025 et 2050, les valeurs moyennes de recul sur les secteurs rocheux sont respectivement de l'ordre de 10 m et 27 m et les surfaces exposées à l'aléa recul du trait de côte de 0,47 km^2 à l'horizon 2025 et de 1,12 km^2 à l'horizon 2050 **[78]**.

5 L'ALÉA SUBMERSION MARINE DANS LA NOUVELLE-AQUITAINE

SITUATION ACTUELLE

La submersion marine est un aléa qui touche principalement les côtes dominées par les marées en raison de la présence de vastes territoires de faible altitude et de l'absence de massifs dunaires et de barrières sédimentaires développées. Elles sont surtout localisées au sein des Pertuis Charentais, dans l'estuaire de la Gironde, dans le bassin d'Arcachon et dans les estuaires et baies du Pays Basque. Les submersions au niveau des côtes dominées par les vagues sont généralement plus localisées (e.g. Mimizan, Capbreton, St-Jean-de-Luz, Hendaye) mais avec de fortes vitesses d'écoulement de l'eau au niveau de brèches dans les barrières sédimentaires et les dunes **[90]**. Les levés topographiques réalisés en 2010 après la tempête Xynthia ont permis pour la première fois de quantifier avec précision les altitudes des plaines côtières et ont montré l'extrême vulnérabilité des Pertuis Charentais aux submersions marines avec 45 à 50 % de la bande côtière (à 10 km du littoral) située sous les plus hautes marées de vives-eaux (**[1]**, **Figure 7**). Un autre facteur géomorphologique de la vulnérabilité des côtes dominées par les marées à la submersion est lié à l'effet d'entonnoir crée par la géométrie des estuaires (rives convergentes vers l'amont) et de certaines baies, qui amplifie la marée mais également les surcotes. Ainsi les zones soumises aux plus hauts niveaux d'eau sont aussi les zones les plus abritées des vagues et donc dépourvues de barrières sédimentaires.

Lorsque de fortes surcotes sont en phase avec une marée haute de vives-eaux, le niveau marin résultant peut dépasser la cote altimétrique des ouvrages de défense de côte et des cordons dunaires (submersion par débordement), entraîner leur rupture et induire une submersion des zones basses du littoral (submersion par rupture).

C'est notamment ce qui s'est passé lors de la tempête Xynthia dans la partie centrale du golfe de Gascogne **[91]**. De tels phénomènes ne sont pas exceptionnels, ainsi Breilh *et al.* **[88]** ont montré que 5 autres événements avaient entraîné des submersions marines d'étendue comparable dans la partie centrale du golfe de Gascogne au cours du siècle passé (1924, 1940, 1941, 1957 et 1999). Depuis 1500, date qui correspond au début des archives historiques valorisables pour les submersions, 46 submersions ont pu être identifiées, ce qui donne une fréquence moyenne d'une submersion tous les 11 ans **[88]**. Ces mêmes auteurs montrent que, dans la partie centrale du golfe de Gascogne, de tels phénomènes ne peuvent se produire que lorsqu'une forte surcote a lieu à marée haute, pendant des marées de vives-eaux. Dans le détail, plusieurs configurations météo-océaniques peuvent entraîner des submersions marines : (1) la combinaison d'une surcote supérieure à 1,5 m en phase avec des marées hautes de vives-eaux moyenne (Xynthia, 2010), (2) la combinaison d'une surcote > 2,0 m en phase avec une marée haute de petites vives-eaux (Martin, 1999) et (3) la combinaison d'une surcote de l'ordre de 1,0 m avec une marée haute de vives-eaux exceptionnelle (tempête de 1957). Dans le sud du golfe de Gascogne, le plateau continental est plus réduit si bien que les contributions relatives des vagues et de la pression atmosphérique peuvent devenir dominantes par rapport à celle du vent.

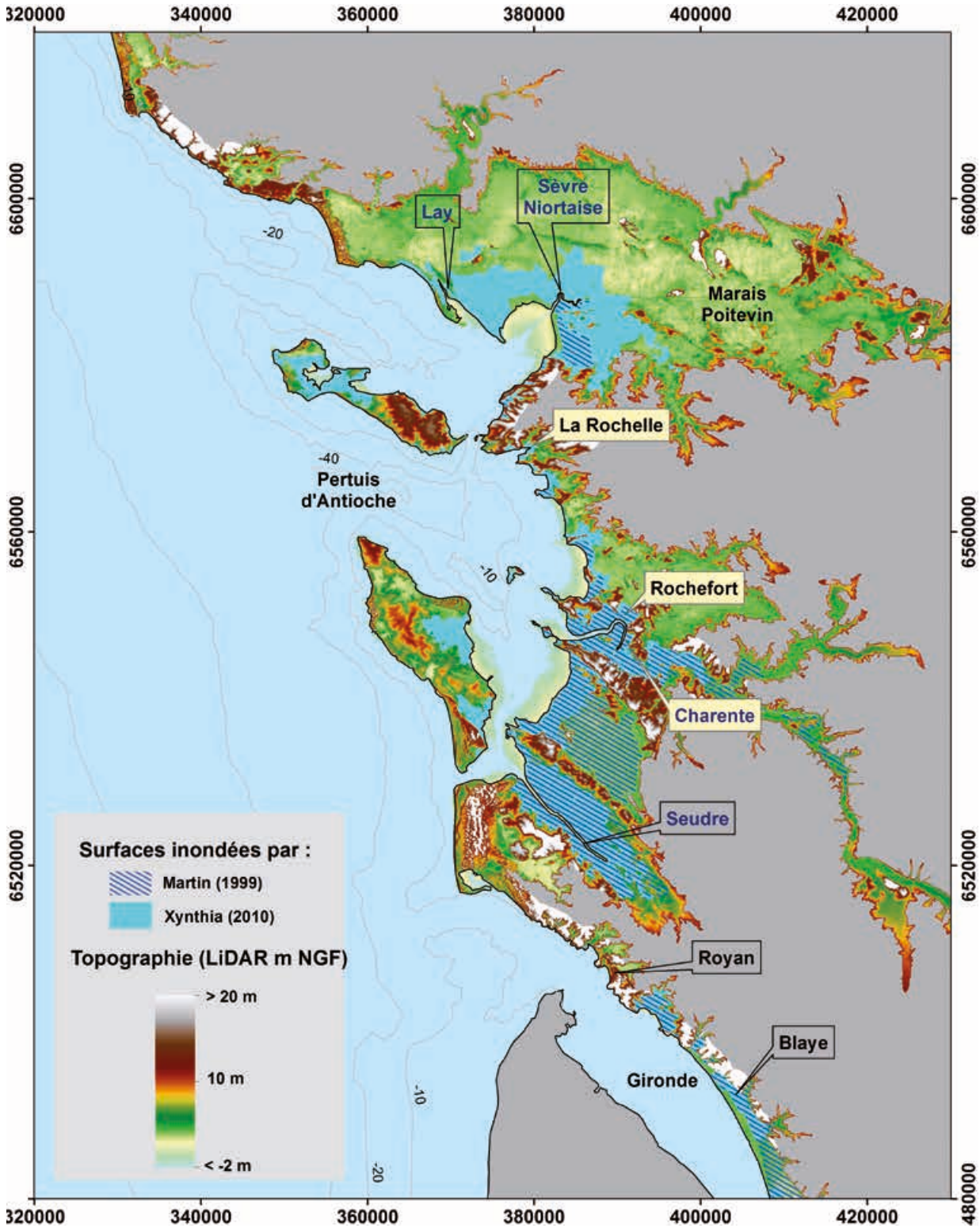

Figure 7 : *Topographie des littoraux bas de Charente-Maritime et indication des surfaces inondées pendant les tempêtes Martin (1999) et Xynthia (2010). Reproduit avec la permission d'Elsevier (88).*

La tempête Martin (décembre 1999) a produit une surcote estimée à plus de 2 m dans l'estuaire de la Gironde **[8]**. Les installations de la centrale nucléaire du Blayais ont été sérieusement menacées par le franchissement des digues, puisque trois des quatre réacteurs ont été successivement mis à l'arrêt et un plan d'urgence interne a été déclenché. Cet événement a conduit d'ailleurs à réévaluer les conditions extrêmes et les défenses dans ce secteur **[38]**. La tempête Martin s'est déroulée pendant une marée de coefficient modéré (77) et sans que les fleuves ne soient en crue. Le site du Blayais étant très abrité des vagues océaniques, seule une mer de vent a pu contribuer à la submersion, et des vagues de 1,5 à 2 m ont été estimées **[38]**. Ainsi dans ce cas de tempête, ce sont essentiellement la dépression atmosphérique (987 hPa) et la force exceptionnelle du vent (pointes à 200 km/h enregistrées au phare de Chassiron) qui ont généré cette surcote exceptionnelle dans la Gironde.

ENCADRÉ 2 : XYNTHIA

La tempête Xynthia a traversé le golfe de Gascogne dans la nuit du 27 au 28 février 2010, avec une pression atmosphérique minimum de 970 hPa et des vents moyens de sud-ouest de l'ordre de 100 km/h (rafales à plus de 150 km/h sur les îles de Ré et d'Oléron). Du fait de la trajectoire atypique de la tempête du sud-ouest vers le nord-est, la zone de génération des vagues était réduite à quelques centaines de kilomètres et de fortes vagues de courte période se sont développées, augmentant fortement la rugosité de la surface de l'océan et décuplant l'effet du vent, induisant une surcote dépassant localement 1,6 m dans les Pertuis Charentais (**Figure 8**, **[35] [36]**). Cette surcote était en phase avec une marée haute de vives-eaux (coefficient de marée de 102) si bien que le niveau d'eau a atteint la valeur extrême de 8,0 m CM par rapport au zéro des cartes marines (4,5 m NGF), une valeur jamais atteinte depuis l'installation d'un marégraphe permanent en 1997. Le niveau marin a dépassé la crête de nombreuses défenses de côte t cordons dunaires, occasionnant une submersion massive et plus de 2 milliards d'euros de dégâts **[92]**. Cette surbmersion marine a surtout causé 47 décés.

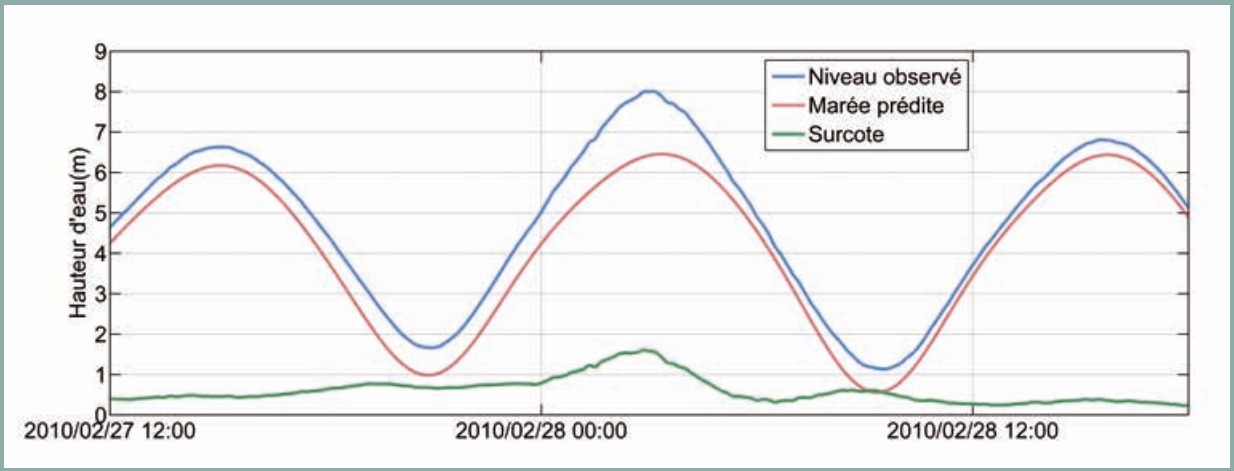

Figure 8 : *Niveau observé (bleu) et marée astronomique (rouge) par rapport au zéro des cartes marines, et surcote (vert) observées à La Pallice lors de la tempête Xynthia, montrant le développement d'une surcote d'1,6 m en phase avec une marée haute de vives-eaux d'après Bertin et al. (35).*

ÉVOLUTION DANS LE CADRE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Aujourd'hui, on constate déjà une augmentation des niveaux marins extrêmes liée à l'élévation du niveau de la mer **[93] [94] [95]**. À l'avenir, si les régimes de tempêtes météorologiques évoluent peu, l'élévation du niveau de la mer entraînera mécaniquement une augmentation de la fréquence et de l'intensité des submersions marines. Ce phénomène est particulièrement inquiétant pour les zones basses côtières. Pour s'en convaincre, il suffit de remarquer que les écarts actuellement observés entre les niveaux d'eau atteints par des tempêtes centennales et décennales sont de l'ordre d'un demi-mètre à La Rochelle **[96]**. Or, il est attendu que l'élévation du niveau de la mer soit au moins de 30 cm à la fin du siècle, quel que soit le scénario d'émissions de gaz à effet de serre (**Figure 3**). Localement différents phénomènes hydrodynamiques peuvent modérer ou exacerber cette augmentation des niveaux marins extrêmes : modifications des vagues **[21] [97]**, modifications de la marée induite par l'élévation du niveau de la mer ou des changements bathymétriques **[34]**. Néanmoins, toutes les études de sensibilité réalisées jusqu'à présent indiquent que l'élévation du niveau de la mer est le facteur d'évolution majeur pour l'aléa submersion marine. Ceci est démontré notamment par Marcos *et al.* **[24]** dans le cas de ports du golfe de Gascogne.

En ce qui concerne les environnements semi-fermés, de nombreuses incertitudes existent quant aux impacts futurs de la submersion. Comme explicité précédemment, ces environnements se comblent naturellement par les apports sédimentaires.

Les zones d'estran en particulier voient, en principe, leur topographie s'élever par aggradation (accrétion sédimentaire verticale), en s'ajustant ainsi à l'élévation progressive du niveau de la mer. La tendance régressive qui accompagne l'accrétion verticale a été exploitée par l'homme pour créer de vastes polders ; toutefois ces polders se retrouvent aujourd'hui isolés des eaux marines et continentales par des digues et des levées, et sont privés des apports sédimentaires. Leur morphologie est donc figée et ils ne peuvent plus s'adapter à l'élévation du niveau marin par aggradation. Si l'apport sédimentaire est insuffisant, l'équilibre morphologique verra les marais disparaître et évoluer vers un environnement subtidal (**[40], Figure 9**). Au contraire, dans les environnements semi-fermés « naturels » non endigués ou non poldérisés, si l'apport sédimentaire est suffisant, le taux de sédimentation peut compenser l'élévation du niveau marin et les marais sont ainsi préservés sur le long terme **[40] [98]**. Sans accrétion sédimentaire suffisante, les polders néo-aquitains vont donc devenir des zones de plus en plus vulnérables en cas de franchissement ou rupture des digues, comme l'ont déjà montré les tempêtes récentes **[88]**, car la différence de hauteur entre le niveau marin et le polder ne fera que s'accentuer. La sédimentation dans les environnements semi-fermés a, par le passé, entraîné également un comblement des chenaux estuariens et une diminution de leurs sections mouillées **[32],** entraînant des changements de propagation de l'onde de marée. Dans l'estuaire de la Gironde (marégraphe de Bordeaux), une augmentation moyenne du marnage de 60 cm a déjà été observée entre 1953 et 2014, par suite des changements morphologiques **[99]**. Cette amplification suppose des niveaux d'inondation plus élevés, indépendamment de l'élévation du niveau marin. Mais la sédimentation accrue dans les chenaux pourrait, au contraire, amortir la marée dans certains secteurs dans le futur, par comblement des sections. Ainsi, outre l'incertitude de l'élévation du niveau marin, il y a une incertitude encore plus forte sur les apports sédimentaires. Ceux-ci dépendent des débits solides amont (eux-mêmes contrôlés par les débits fluviaux) et de leur redistribution par la marée, qui elle-même pourra s'amplifier ou s'amortir en fonction de l'intensité des changements morphologiques. À ces incertitudes, déjà nombreuses, s'ajoutent celles liées aux activités humaines, comme les barrages et les dragages qui modifient les écoulements hydrodynamiques et les apports sédimentaires. De même, les digues de protection, selon qu'elles soient maintenues, déplacées, ou supprimées auront une forte influence sur l'expansion latérale de l'onde de marée, les crues, ainsi que l'hydrodynamique globale dans les chenaux.

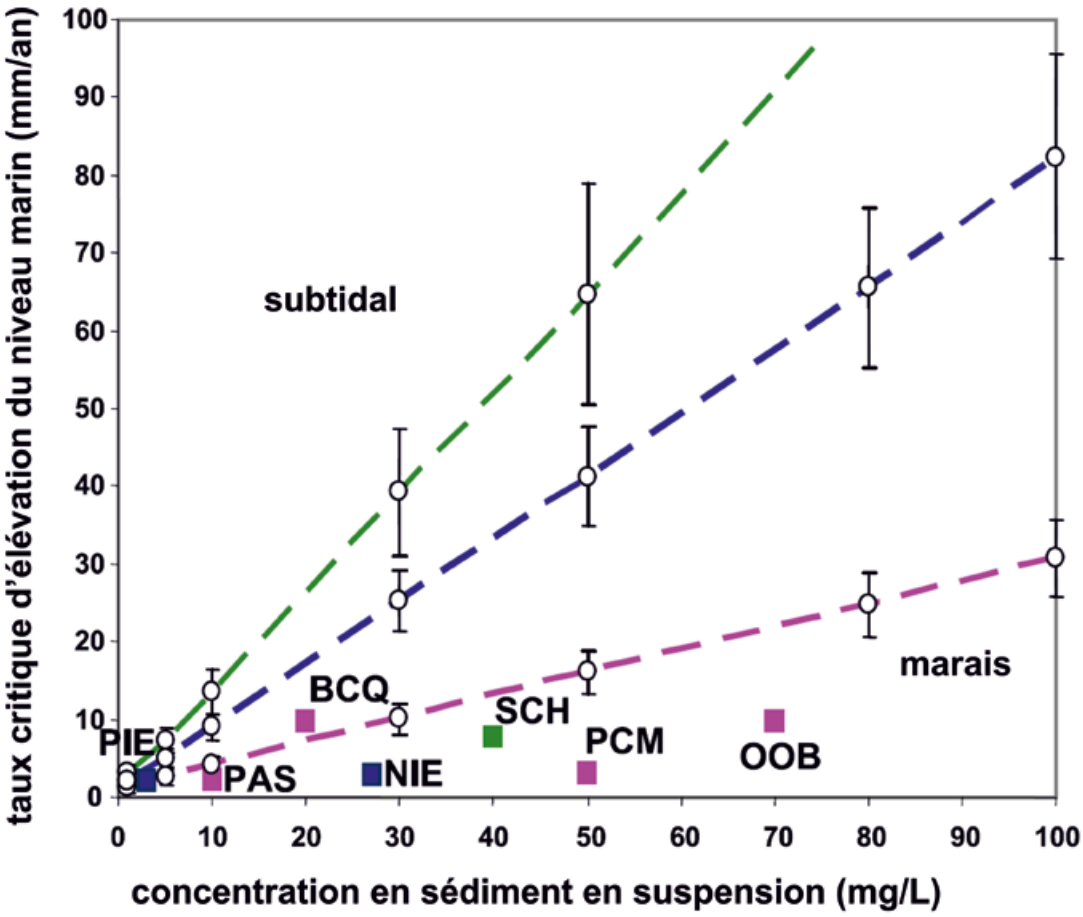

Figure 9 : *Limites théoriques de stabilité des marais estuariens et de leur remplacement par des zones subtidales en fonction du taux de remontée du niveau marin et de l'apport sédimentaire, exprimé par la concentration en sédiment en suspension. Lignes verte, bleue et rose : marnage de 5 m, 3 m et 1 m respectivement. Les carrés en couleur représentent des marais estuariens mondiaux avec différentes combinaisons de taux historiques de remontée du niveau marin, marnage et concentration en sédiments en suspension. D'après Kirwan et al. (40).*

6 ADAPTATION

L'adaptation des écosystèmes et anthroposystèmes littoraux au changement climatique et à ses conséquences (augmentation de la température et baisse du pH des océans, élévation du niveau marin, changement du climat des vagues, changement du débit des fleuves), conjugué aux pressions anthropiques croissantes (augmentation de la pollution, des infrastructures côtières et littoralisation de la société) et aux évolutions naturelles, est un questionnement majeur et pluridisciplinaire en raison des interactions multiples entre les nombreux processus physiques, biologiques et sociétaux mis en jeu.

Le littoral de la Nouvelle-Aquitaine est donc soumis à deux aléas principaux, submersion marine et érosion côtière, qui dans un contexte de changement climatique pourraient se renforcer et/ou augmenter en intensité. Pendant plusieurs siècles l'Homme s'est protégé de la mer et a conquis de vastes espaces maritimes, mais l'élévation prévue du niveau marin, l'érosion accrue, doivent obliger à reconsidérer ces stratégies. Un simple calcul coût/bénéfice montre qu'il n'est plus, de nos jours, soutenable d'avoir une telle stratégie de conquête et d'expansion sur l'ensemble du territoire et sur le moyen terme (quelques décennies). En effet, la protection en dur n'est plus la seule et unique stratégie à adopter pour s'adapter aux impacts du changement global ; il s'agit aujourd'hui d'envisager de vivre avec le risque. Le cinquième rapport d'évaluation du GIEC définit l'adaptation au changement climatique comme « une démarche d'ajustement au climat actuel ou attendu, ainsi qu'à ses conséquences. Dans les systèmes humains, il s'agit d'atténuer ou d'éviter les effets préjudiciables et d'exploiter les effets bénéfiques. Dans certains systèmes naturels, l'intervention humaine peut faciliter l'adaptation au climat attendu ainsi qu'à ses conséquences ». Il s'agit alors d'anticiper et de limiter les dégâts, d'organiser des moyens de remise en état rapide et surtout de faire évoluer les modes de vie.

En ce qui concerne le littoral, il y a trois types d'adaptation aux aléas possible : i) la protection, ii) la relocalisation ou le repli stratégique, iii) l'atténuation ou la mitigation. La protection, tout d'abord permet une action contre l'aléa lui-même, il s'agit de se protéger par exemple de l'aléa submersion marine par la construction de digue ou la mise en place d'enrochements. Ces actions sont fondées sur du génie côtier afin de dimensionner au plus juste les structures en fonction des scénarios choisis. En revanche, l'atténuation ou la mitigation vise plutôt à revenir vers un fonctionnement naturel des littoraux pour que ces derniers jouent leur rôle de zone tampon, d'amortissement des aléas marins. Enfin, la dernière stratégie, la relocalisation, vise plus spécifiquement les enjeux structurels et sociétaux. Il s'agit alors d'envisager de rendre ou de redonner des espaces à la mer (comme la dépoldérisation) et de relocaliser les activités et les biens.

Suite à un appel à projets lancé en 2012 par le MEDDE, sur l'expérimentation de la relocalisation des biens et des activités, trois communes de la région Nouvelle-Aquitaine accompagnées du GIP Littoral Aquitain ont été retenues comme cas d'études (Lacanau, La Teste-de-Buch, Labenne). Sur la commune de Lacanau, l'objectif a été d'étudier la faisabilité d'une relocalisation d'une partie de l'urbanisation pour redonner sa dynamique naturelle au littoral. Plusieurs scénarios ont été envisagés et ont permis de mettre en évidence plusieurs problèmes : le premier, qui consistait à poursuivre la protection par une défense lourde, montrait que l'on ne faisait que repousser le problème dans le temps et que la gestion des édifices finirait par être insupportable en termes financiers ; les autres scénarios prévoyaient plutôt la relocalisation et ont démontré un vide juridique quant à la possibilité de déconstruire des biens privés à titre préventif face au risque d'érosion ou de submersion sur un littoral sableux et la difficile réimplantation de construction sur ces territoires littoraux déjà très contraints en termes d'urbanisation par la législation.

Autre cas, actuellement, l'immeuble Le Signal sur la commune de Soulac-sur-Mer est un exemple concret et actuel où les responsabilités juridiques ne sont pas clairement identifiées et où, par conséquent, les décisions tardent à être prises. Dans l'avenir, ces situations pourraient se multiplier sur les territoires littoraux français. Pour choisir le type de stratégie d'adaptation aux risques littoraux, réalisable et acceptable, une approche économique coût/bénéfice est à privilégier, même si cette dernière ne conclut pas nécessairement que le projet le plus « rentable » est celui qui présente le moins de contraintes techniques, réglementaires et financières. Le scénario retenu doit être présenté comme une opportunité d'améliorer l'aménagement et la pratique du territoire concerné et non comme une contrainte. D'après l'étude d'André *et al.* **[100]**, l'adaptation doit plutôt être appréhendée par une approche intégrée où la réflexion est menée conjointement entre protection (qui ne doit être que temporaire), relocalisation ou mitigation, dans le cadre d'un projet de territoire intégrant toutes les composantes de l'aménagement. Il s'agit ici d'avoir une approche échelonnée dans le temps et de définir à partir de quel moment le risque n'est plus acceptable par la société et la collectivité. Il est nécessaire de penser une mise en œuvre progressive d'un projet d'adaptation, avec un volet de concertation et de sensibilisation. En effet, au-delà des conditions financières et réglementaires qui échappent en grande partie à l'échelle locale de décision, de multiples expérimentations en France et à l'étranger, ouvertes à la confrontation de points de vue et à la coconstruction de connaissances, sont porteuses de nouvelles formes de participation et riches d'enseignements pour engager des acteurs locaux dans l'exploration collective de solutions face à l'élévation du niveau de la mer.

ENCADRÉ 3 : ÉTUDIER LA FAISABILITÉ D'UNE RELOCALISATION : EXEMPLE DE LACANAU

Depuis 2012, une analyse sociologique est menée sur la commune de Lacanau afin d'observer les dynamiques collectives face au problème de l'érosion marine et de son accentuation possible par suite de l'élévation du niveau de la mer et d'événements extrêmes. L'objectif de la démarche, menée par le GIP Littoral Aquitain et la commune de Lacanau dans le cadre d'un appel à projets sur la relocalisation des biens et des activités portés par le Ministère de l'Écologie de 2012 à 2015, était de bâtir différents scénarios de relocalisation et un scénario de protection à l'horizon 2100, afin d'explorer les trajectoires possibles d'adaptation face à l'érosion marine (protection, ajustement et/ou relocalisation). Il s'agissait également d'identifier toutes les difficultés qui pourront être rencontrées aux plans juridiques, financiers, techniques et sociopolitiques pour mettre en œuvre une opération de relocalisation d'un périmètre recouvrant plusieurs centaines de logements, des infrastructures publiques et des activités commerciales liées au tourisme et aux loisirs.

Afin de mener une telle démarche, un processus participatif a été mené auprès d'habitants, de professionnels et de représentants associatifs locaux, sur une commune où ces populations présentent déjà un fort degré de concernement et de connaissance de la problématique **[101]**. Cette expérimentation, considérée comme pionnière en France, a permis d'engager l'ensemble des acteurs locaux dans un régime d'exploration des possibles, ouvert à l'imagination, à l'expérience du débat contradictoire et aux « surprises » qui peuvent s'observer face aux situations projetées dans des récits prospectifs.

Les idées et propositions principales mises en avant par les participants ont porté sur les enjeux à prendre en compte dans la scénarisation (et les stratégies associées) de l'identité et des modes de vie à Lacanau, incluant des arguments en termes de cohésion sociale de la future station balnéaire, etc. L'articulation maintenue entre un dispositif d'expérimentation sociale et un espace de concertation et d'exploration collective des futurs a bénéficié d'un engagement important des élus locaux, d'une animation prospective propice à ce régime d'exploration et d'une posture d'ouverture et d'écoute chez la plupart des participants. Le maintien du comité de concertation pour le suivi de la stratégie locale de gestion de la bande côtière résulte pour partie de ces dynamiques d'apprentissage social.

Malgré toutes les avancées permises par cette démarche, le choix entre protection et relocalisation n'a jusqu'à présent pas été acté faute de certitudes aux plans réglementaires et financiers. De nouvelles lignes de débat ont cependant été ouvertes au regard de la législation actuelle sur l'aménagement littoral, ainsi que de nouvelles propositions d'outils juridiques et financiers consistant à permettre à des habitants de pouvoir conserver leur logement en fonction des temporalités du risque et de permettre la relocalisation du bâti et des activités à ces horizons de temps **[100] [102]**. Certaines propositions ont été retravaillées dans le cadre du comité de suivi de la stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte puis formalisées dans une proposition parlementaire de loi déposée en juillet 2016 **[103]**.

Le choix de la meilleure adaptation au changement climatique reste très complexe et dépend des échelles de temps abordées (cf. Stratégie Locale de la Gestion de la Bande Côtière de Lacanau) mais aussi profondément de l'objet et de l'aléa concernés. Par exemple, le long des littoraux ouverts d'Aquitaine, où les enjeux demeurent localisés et les rechargements de plage non pérennes, la gestion équilibrée des systèmes dunaires par l'ONF doit être poursuivie. Cette méthode doit laisser un espace d'accommodation au système plage-dune afin d'optimiser la résilience du système et réduire considérablement les aléas d'érosion et de submersion. Lorsque l'érosion chronique est faible à modérée, alors certains ouvrages comme les épis peuvent être maintenus, mais lorsque l'érosion chronique est intense et les enjeux faibles, comme dans certains secteurs adjacents aux embouchures, alors la mise en place de nouveaux épis et de brise-lames doit être découragée. Au niveau des systèmes abritant de nombreux enjeux, e.g. certaines plages de poche du Pays Basque, si la présence d'enjeux le justifie et qu'une analyse multicritère le démontre, les aménagements côtiers devraient être renforcés pour fixer durablement le trait de côte et les rechargements poursuivis voire accélérés pour maintenir des plages suffisamment larges et/ou stabiliser le pied des ouvrages. Plus spécifiquement pour l'aléa submersion, qui devrait croître le long des côtes basses, notamment en Charente-Maritime, la remontée systématique des digues n'est pas la seule solution.

En effet, comme démontré dans Bertin *et al.* **[90]**, rabaisser les digues et laisser inonder des zones à faibles enjeux pourrait permettre de réduire significativement les niveaux d'eau et réduire la submersion dans d'autres zones proches abritant des enjeux forts. La mise en place de grandes plaines d'inondation avec des digues de second rang pourrait donc être envisagée. À ce titre, dans des espaces naturels où les enjeux sont moindres (Mortagne sur Gironde, Marais d'Yves, Marais de Brouage, Île Nouvelle ou Île de Malprat dans le bassin d'Arcachon), des mesures d'adaptation naturelle (abandon des digues de premier ordre) ont déjà été choisies. Les avantages sont nombreux : coût moindre pour les défenses de côte, accroissement des zones de nurseries pour les poissons et coquillages et des zones d'habitats pour les oiseaux migrateurs, épuration naturelle des eaux, zones d'expansion des eaux en cas de surcotes limitant l'élévation du niveau marin et protégeant les zones à plus forts enjeux **[90] [91]**.

Ces mesures récentes, permettent à des secteurs côtiers de retrouver une évolution naturelle et il serait pertinent d'étudier l'adaptation de ces véritables laboratoires naturels aux effets du changement climatique. Un constat proche peut être dressé sur certains secteurs dunaires où, sous contrôle de l'ONF, le système sédimentaire est en libre évolution. Il faudra explorer dans quelle mesure cette gestion de dynamique contrôlée peut améliorer la résilience du système tout en améliorant les services écosystémiques de la dune. Dans les prochaines années, le Conservatoire du Littoral pourrait avoir un rôle encore plus important à jouer dans la sanctuarisation de ces littoraux en libre évolution (e.g. actuellement la dépoldérisation à l'île Graveyon, Malprat).

7 CONCLUSION

La région Nouvelle-Aquitaine se caractérise par un littoral extrêmement diversifié et vulnérable aux aléas d'érosion et de submersion. Des événements météo-marins récents (e.g. Martin en 1999, Xynthia en 2010, hiver 2013/2014) ont durement rappelé que ce littoral actuel est fragile. Dans ce contexte, l'augmentation prévue du niveau moyen des mers et les possibles modifications de l'intensité ou de la fréquence des tempêtes renforcera certainement ces aléas. La complexité et la diversité des processus hydro-sédimentaires mis en jeu et de leurs interactions font qu'il est aujourd'hui souvent impossible de distinguer les contributions respectives du changement climatique de celles des autres facteurs sur l'évolution de l'érosion du trait de côte. Au contraire, la contribution du changement climatique à l'aléa de submersion est plus directe, l'augmentation du niveau moyen des mers se superposant à un régime de surcotes lui-même encore trop mal connu, mais souvent supposé stationnaire au cours des dernières 70 années.

Prévoir l'évolution du trait de côte au cours des prochaines décennies se heurte à la complexité des phénomènes. En outre, la plupart des forçages ne sont pas déterministes. Ainsi, et par exemple, la chronologie des houles ou l'occurrence et l'intensité d'un événement extrême ne pourront jamais être prédits de manière déterministe au-delà de quelques semaines. Comme la chronologie des événements est déterminante pour la réponse du trait de côte, de la même manière que pour les épisodes de submersion (e.g. coïncidence avec une marée de vives-eaux), même avec un forçage climatique juste et précis, il serait impossible de donner une projection déterministe du trait de côte au-delà de quelques jours, et le développement d'approches probabilistes est indispensable.

Dans la Nouvelle-Aquitaine, il existe une forte proportion de littoraux artificialisés par la défense contre l'érosion ou la submersion.

Renforcer ces défenses, envisager et développer des alternatives et des adaptations est extrêmement complexe et dépend à la fois de l'objet considéré et des enjeux à protéger. Ces décisions devront être réalisées en concertation avec les différents acteurs et les citoyens, dans un contexte de finances publiques restreintes et de vide juridique. Globalement, il n'existe pas de solutions d'adaptation génériques. Parmi ces approches, sanctuariser des zones à faibles enjeux afin de les laisser en libre évolution permettra de mieux comprendre la résilience naturelle de ces systèmes au changement climatique. A contrario, certains littoraux abritant des enjeux forts devront voir leurs ouvrages de défense renforcés, au moins de façon transitoire.

Les efforts de réduction d'émissions de gaz à effets de serre permettront de réduire l'intensité et la fréquence des événements extrêmes ainsi que le risque d'une élévation du niveau de la mer très rapide, atteignant ou excédant 1 cm par an à la fin du XXIe siècle. Aussi, en Nouvelle-Aquitaine comme ailleurs, une politique publique d'atténuation du changement climatique, en plus de l'adaptation, pourrait faciliter la gestion des aléas littoraux sur le très long terme. Cela pourrait éviter que la seule mesure d'adaptation possible ne devienne dans beaucoup de secteurs la relocalisation des enjeux vers 2100 et au-delà.

Dans ce chapitre, il a été fait le choix d'aborder l'évolution du littoral dans un contexte de changement climatique à travers le prisme de la physique, de la géomorphologie, de la géographie et de la géologie. L'étude des interactions avec l'économie, les sciences humaines ou encore la gouvernance et le droit de l'environnement à travers une approche profondément transdisciplinaire est un défi majeur pour nos communautés scientifiques.