

Travail réalisé par Estelle Beausir
sous la direction de :
François CLERC et
Jean-François FRANCK



Direction régionale de l'environnement
NORD-PAS-DE-CALAIS

Synthèse bibliographique

s'inscrivant dans le projet de caractérisation
des aléas naturels côtiers en intégrant les
conséquences du changement climatique



Juin 2007

Sommaire

Introduction7

Chapitre 19

I.	La vulnérabilité des territoires côtiers.....	11
A.	Des enjeux économiques et sociaux.....	11
B.	Le littoral et les zones arrière-littorales du Nord - Pas de Calais.....	12
II.	Une évolution permanente du littoral.....	14
A.	Les agents et les mécanismes responsables de l'évolution des côtes.....	14
1.	Définition du zéro hydrographique.....	14
2.	Quelques notions sur la marée et les courants.....	14
3.	Surcotes et décotes.....	17
4.	La houle et les vagues.....	18
5.	Synthèse sur les principaux phénomènes hydrodynamiques et climatiques des zones côtières.....	18
6.	Les mécanismes responsables de l'évolution des côtes.....	19
a.	Le domaine du large.....	19
b.	Le domaine côtier.....	20
c.	Impact des transits sédimentaires sur les dunes.....	20
d.	Impact des transits sédimentaires sur les falaises.....	21
B.	Les risques côtiers.....	22
1.	Les tsunamis.....	22
2.	L'érosion.....	22
3.	Les submersions marines.....	26
a.	Les principaux mécanismes responsables de la dégradation des digues	27
b.	Le recours aux géosynthétiques.....	28
c.	Le concept Crest Drainage Dike.....	30
d.	Le concept Sandy Dike.....	31
III.	Une évolution qui devrait s'accroître en raison du changement climatique.....	32
A.	Quelques généralités sur le changement climatique.....	32
1.	Quelques généralités.....	32
a.	Un peu d'histoire.....	32
b.	Définition : variabilité ou changement climatique ?.....	32
c.	La nécessité d'agir.....	33
2.	Les conséquences du changement climatique.....	36
a.	Les indicateurs climatiques.....	36
b.	Les indicateurs biologiques et physiques.....	40
c.	Les changements climatiques : effets positifs ou négatifs ?.....	42
3.	Comprendre l'impact des changements climatiques sur les zones littorales.....	43

B. Essai de régionalisation du changement climatique en France et dans la région Nord – Pas de Calais à l'horizon 2100	45
1. Les données françaises : évolution de la température et des précipitations à l'horizon 2100	45
a. Les températures.....	46
b. Les précipitations.....	50
c. Les événements météorologiques extrêmes	52
2. Des données européennes sur l'élévation possible du niveau moyen de la mer 53	
3. Les recherches en cours	54
IV. Conclusion	55
Chapitre 2	57
I. Description du Nord – Pas de Calais	59
A. Les caractéristiques morphologiques	59
1. La Côte d'Opale côté terre	60
a. La plaine maritime picarde	60
b. La plaine maritime flamande	60
c. Le Boulonnais	61
2. La côte d'Opale côté mer	63
3. Les phénomènes de subsidence le long de la Côte d'Opale	64
B. Les caractéristiques hydrodynamiques et climatiques	64
1. Les conditions hydrodynamiques.....	64
2. Les conditions climatiques.....	68
C. Une prise de conscience progressive des Autorités du Nord – Pas de Calais 71	
II. Etude des aléas côtiers	73
A. L'aléa tsunami	73
B. L'érosion	74
1. Les transits sédimentaires	74
2. Les phénomènes d'érosion	75
C. Etude de l'aléa submersion marine	82
1. L'étude PPR Côtes basses meubles du Pas de Calais.....	82
2. L'étude de l'aléa de submersion marine à Sangatte	84
3. L'aléa submersion marine dans un secteur de la région Dunkerquoise ...	86
4. Les cartographies des zones inondées constatées	89
D. Une première étude sur les aléas côtiers à l'horizon 2100	90
1. L'aléa érosion.....	91
a. La méthodologie employée	91
b. Les conclusions pour le Nord – Pas de Calais	91
2. L'aléa submersion marine.....	92
a. La méthodologie employée	92
b. Les conclusions pour le Nord – Pas de Calais	93
III. Discussion sur les difficultés et la fiabilité des résultats obtenus	95

IV. Conclusion	97
----------------------	----

Chapitre 3	101
------------------	-----

I. La nécessité d'échanger	103
A. La création de réseaux régionaux, nationaux et internationaux	103
1. Aux niveaux nationaux et régionaux.....	103
a. Au sein de la recherche	103
b. Au sein des collectivités locales et des services de l'Etat.....	106
2. Au niveau international.....	107
B. Une volonté de communication avec le grand public	108
II. La gestion des zones côtières dans quelques pays européens	111
A. La stratégie de Gestion Intégrée des Zones Côtières (GIZC).....	111
B. La gestion des zones côtières dans les pays européens proches de la France.....	112
1. L'exemple du Royaume-Uni	113
a. Les impacts du changement climatique en Angleterre	113
b. La stratégie anglaise de défense côtière	119
2. L'exemple de l'Allemagne	123
a. Les impacts du changement climatique en Allemagne.....	123
a. La stratégie allemande de défense côtière	125
3. L'exemple du Danemark	129
a. Les impacts du changement climatique au Danemark	129
b. La stratégie de défense côtière danoise	130
4. L'exemple de la Belgique	132
a. Les conséquences du changement climatique en Belgique.....	132
b. La stratégie de défense côtière belge	133
5. L'exemple des Pays-Bas	138
a. Les conséquences du changement climatique aux Pays-Bas	138
b. La stratégie de défense côtière aux Pays-Bas.....	139
C. La gestion des zones côtières en France	143
1. Un bref historique sur la politique du littoral	143
2. La stratégie française de gestion intégrée des zones côtières.....	145
III. Conclusion	147

Conclusion	151
Lexique	155
Liste des acronymes	157
Bibliographie	159

Introduction

Les inondations, qu'elles soient d'origine marine ou continentale représentent un risque majeur en France. Manifestations naturelles et aléatoires du cycle terrestre de l'eau, elles façonnent les paysages et peuvent parfois engendrer des dommages importants aux conséquences socio-économiques lourdes.

Depuis tout temps, les populations et les Autorités tirent profit des expériences passées et travaillent à la réduction de la vulnérabilité des secteurs inondables. Ainsi, à l'époque romaine, des descendants d'anciennes tribus celtiques essayaient-ils déjà de préserver leur patrimoine en édifiant des digues en Flandre maritime, zone de plaine basse. Il faut cependant attendre l'avènement de la dynastie des Comtes de Flandre au IX^{ème} siècle pour voir apparaître les premiers travaux sérieux de défense contre la mer et la création de l'Institution des Wateringues. Suite à de violentes inondations au XI^{ème} siècle, les travaux de dessèchement se poursuivent et différentes chartes se succèdent pour répartir entre les abbayes et les paroisses les marais à assécher. La plupart sont transformés en terres arables ou productives tandis que de nouvelles digues apparaissent progressivement.

Les techniques d'assèchement se perfectionnent. Les lacs des Moères disparaissent peu à peu, grâce notamment à l'ingénieur et artiste Wenceslas Coebergher, né à Anvers en 1550 et décédé en 1634. Les grands canaux bien connus du Nord de la France apparaissent à cette époque. En 1746, le Comte d'Hérouville poursuit les initiatives de Coebergher en continuant le dessèchement des Moères. Malgré des événements historiques peu favorables, les efforts du Comte portent leur fruit. La récolte de blé de 1766 est abondante.

La réorganisation des Wateringues débute en 1797 avec notamment le curage du canal de Furnes, des travaux portuaires et la construction de la route entre Dunkerque et Gravelines. Le dessèchement à l'ouest de Dunkerque a, quant à lui, lieu en 1914 avant d'importants travaux destinés à réaliser un exutoire unique entre 1929 et 1939. Malheureusement, peu de temps après, la guerre éclate ; des inondations stratégiques sont pratiquées dans les années 1940 – 1941 et malgré les nombreux travaux effectués, la côte retrouve sensiblement, en 1944, le tracé qu'elle avait à la fin du XI^{ème} siècle. En 1946, les Moères sont définitivement hors d'eau.

Les Wateringues sont donc un excellent exemple de terrains gagnés sur la mer. Les interventions humaines et les processus naturels ont permis de faire de ce lieu une riche plaine cultivable et de répondre au besoin d'espace grandissant du fait d'une population toujours plus importante et de plus en plus attirée par la beauté de ces paysages fragiles.

Ces aménagements ne sont pourtant pas sans risques. En 1953, un raz de marée affecte l'ensemble des côtes de la Mer du Nord à l'origine de pertes humaines et matérielles considérables. Ce journal d'époque retrace les faits :

CETTE SEMAINE-LÀ

1^{er} février 1953 : raz de marée sur les côtes. Ce dimanche-là, un raz de marée provoqué par une tempête d'une rare violence en mer du Nord déferle sur la Hollande, la Grande-Bretagne, la Belgique et le Nord de la France. On dénombre plus de 1 500 morts, dont 1 400 aux Pays-Bas, où un sixième du territoire est anéanti. Vingt-deux personnes périssent noyées sur le littoral belge. A Dunkerque, la haute marée dépasse de 2 m 40 le niveau maximum prévu. La digue Tixier est rompue en deux endroits. Au port, le dock flottant rompt ses amarres. En raison des inondations, 150 personnes sont évacuées. A Malo-les-Bains et Bray-Dunes, les digues de mer sont démantelées par les flots. A Gravelines, les jetées sont gravement endommagées. Ouverte le 6 février par notre journal, une souscription en faveur des sinistrés permet de recueillir plus de six millions de francs en un mois.

Figure 1 : Article d'époque concernant l'inondation de 1953, retrouvé dans un grenier personnel

Cet article montre l'importance de prendre en compte les aléas naturels littoraux, en particulier les phénomènes de tsunamis, d'érosion et de submersion marine pour les intégrer dans les politiques d'aménagement du territoire et ainsi limiter au maximum les dommages potentiels. Les effets du changement climatique pourraient contribuer à fragiliser davantage ces milieux côtiers précaires, en constante évolution sous l'effet de paramètres naturels et anthropiques.

Face à ce constat, la DIREN Nord – Pas de Calais a lancé en 2006 une étude de caractérisation des aléas naturels littoraux avec une attention particulière portée sur l'aléa de submersion marine intégrant les conséquences du changement climatique à l'horizon 2100.

La présente synthèse bibliographique s'inscrit dans ce projet d'étude. Elle aborde, dans une première partie, quelques notions générales destinées à comprendre les enjeux d'une telle étude et à poser les bases techniques nécessaires à la compréhension de la suite du rapport. La seconde partie est une étude approfondie des aléas côtiers dans la région Nord – Pas de Calais tandis que la troisième partie vise à recenser l'ensemble des études et projets d'études existant sur le sujet aux niveaux national et international. Elle s'intitule « la protection contre les aléas côtiers : quelques exemples nationaux et internationaux ». Une telle connaissance est, en effet, nécessaire pour appréhender pleinement la question des aléas naturels littoraux en tirant profit des expériences et connaissances d'autrui.

Chapitre 1

Quelques notions générales

I. La vulnérabilité des territoires côtiers

A. Des enjeux économiques et sociaux

Le littoral est un espace fragile caractérisé par une grande diversité biologique où se mêlent différentes activités parfois conflictuelles entre elles. Si le tourisme se présente comme un élément essentiel au dynamisme économique, il contribue parfois à déstabiliser ces milieux précaires dont certains aspects sont encore méconnus malgré l'intérêt porté par la communauté scientifique depuis quelques années. La beauté des paysages rend ces lieux attractifs, nécessitant ainsi le développement de structures d'accueil.

Une étude menée par l'Observatoire du littoral a permis de quantifier la part de territoires artificialisés au détriment des terres agricoles.

L'artificialisation des zones côtières est particulièrement prononcée dans la région Nord - Pas de Calais qui a le plus fort taux de territoires artificialisés. Elle est par contre la seule façade littorale métropolitaine à avoir une évolution positive des milieux naturels depuis 1990.

	Surface en ha	Part du territoire en 2000			Evolution des surfaces en ha			Part du territoire affecté par des changements d'occupation du sol		
		Territoires artificialisés	Terres agricoles	Milieux naturels	Territoires artificialisés	Terres agricoles	Milieux naturels	Territoires artificialisés	Terres agricoles	Milieux naturels
59	15 024	44,90%	38%	11,70%	14	-137	123	0,09%	-0,91%	0,82%
62	38 178	22,20%	52,10%	21,70%	210	-301	-17	0,55%	-0,79%	-0,04%
Nord - Pas de Calais	53 202	28,60%	48,10%	18,90%	224	-438	106	0,42%	-0,82%	0,20%
littoral	2 225 489	13,10%	41,70%	36,30%	14 064	-7718	-6 635	0,63%	-0,35%	-0,30%

Tableau 1 : Occupation des sols en 2000 et évolution depuis 1990 sur l'ensemble du littoral et dans la région Nord – Pas de Calais, site de l'Observatoire du littoral, Institut Français de l'Environnement IFEN

1,3 % des communes littorales sont soumises à de fréquents changements d'occupation des sols, contre 0,3 % en moyenne en métropole. Les causes sont d'origine naturelle ou anthropique. Citons par exemple la stratégie de réalignement qui consiste à abandonner ou à déplacer des biens situés dans les zones soumises à une forte érosion ou la construction de nouveaux logements pour accueillir une population en nette augmentation depuis 1968 dans les communes de 2500 à 200 000 habitants.

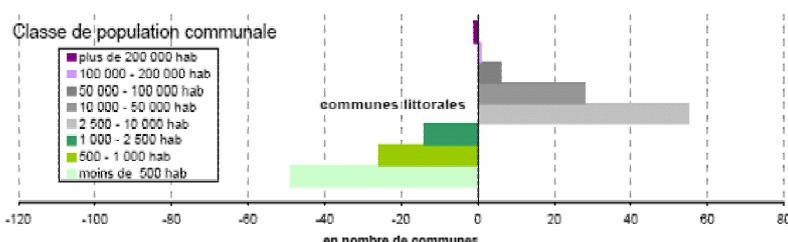


Figure 2 : Evolution du nombre de communes par classe de population sur le littoral entre 1968 et 1999. Source site de l'Observatoire du littoral, IFEN

Les communes littorales abritent aujourd'hui près de 5.8 millions d'habitants permanents, ce qui équivaut à une densité de population 2.5 fois supérieure à la moyenne métropolitaine d'après l'Institut Français de l'ENvironnement.

Les enjeux des espaces littoraux sont donc forts, de part la densité de population présente, la diversité des activités économiques et culturelles et la préservation des espaces naturels ainsi que de la faune associée. Il convient également de rappeler que la mobilité intrinsèque de la frange côtière est, dans la plupart des cas, à l'origine du recul du trait de côte alors que les installations humaines obéissent davantage à une logique inverse de progression vers la mer. Ces dynamiques contraires renforcent donc la vulnérabilité de la frange côtière.

Face à ce constat, les Universités d'Artois, du littoral Côte d'Opale, de Lille 1 et de Montpellier ont travaillé sur la mise en place d'un indicateur permettant d'évaluer les degrés de vulnérabilité des espaces côtiers. Il intègre à la fois les paramètres morphologiques du territoire, le contexte socio-économique, la gestion des risques et la perception de ceux-ci par la population. Des graphiques en radar synthétisent le profil de chaque commune en fonction de son degré de vulnérabilité. Chaque branche est graduée de 0 (non vulnérable) à 5 (très vulnérable).

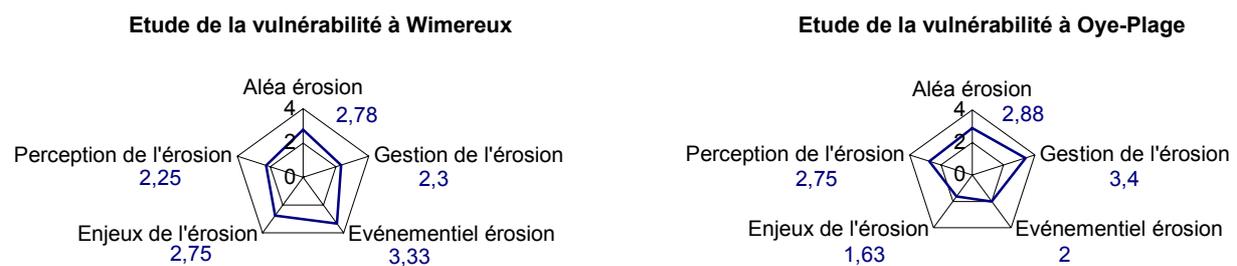


Figure 3 : Radars des communes de Wimereux et Oye-Plage, source Programme National d'Environnement Côtier, site Internet <http://www.ifen.fr/littoral/lettres/lettre5/pages/erosion.htm>

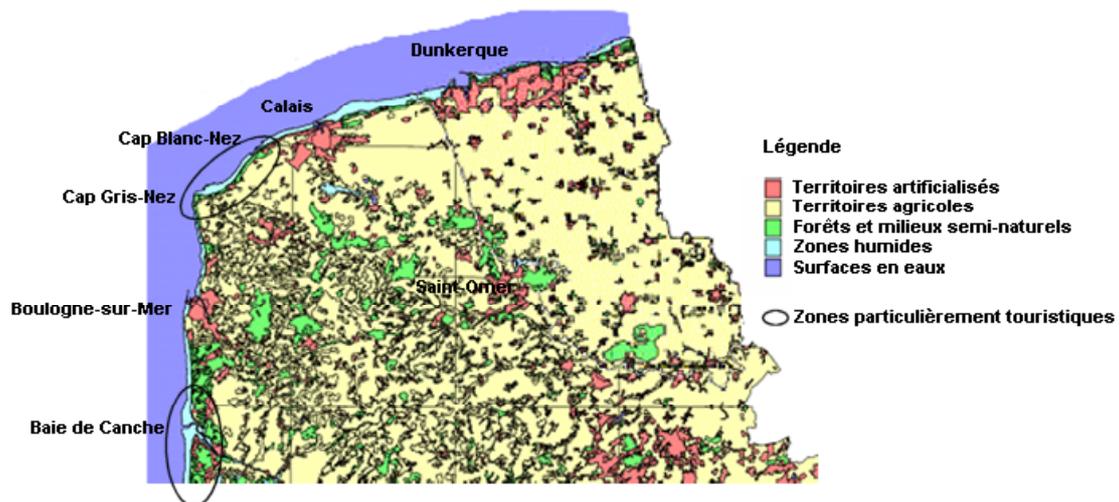
Ainsi Oye-Plage est par exemple plus vulnérable que la commune de Wimereux bien que les aléas et les enjeux soient forts pour Wimereux. Ceux-ci sont toutefois compensés par une politique de gestion efficace et une forte prise de conscience du risque, contrairement à Oye-Plage où les mesures de gestion sont considérées comme trop ponctuelles et la connaissance des facteurs de risques par les usagers relativement faible.

Cet indicateur permet ainsi de définir des priorités quant aux politiques d'intervention à mettre en œuvre pour une meilleure gestion des zones côtières.

B. Le littoral et les zones arrière-littorales du Nord - Pas de Calais

Le littoral du Nord – Pas de Calais regroupe 800 000 habitants dont 45% vivent sur la frange côtière, l'essentiel de la population étant située dans les agglomérations de Calais, Boulogne-sur-Mer et Dunkerque. Avec 657 habitants/km², le littoral du Nord – Pas de Calais est la deuxième région côtière la plus densément peuplée après la Provence – Alpes – Côtes d'Azur. Depuis 1977 l'urbanisation n'a

cessé de croître et on note une augmentation de +15.7% entre 1977 et 1992 dans une bande littorale de deux kilomètres. Cette forte pression urbaine est renforcée par le tourisme, la Côte d'Opale étant par exemple un véritable carrefour de l'Europe du Nord-Ouest, ou par les activités industrielles comme la zone portuaire de Dunkerque.



d'acquisition des données satellitaires : 1989 – 1992, source DIREN Nord – Pas de Calais & données du Plan Littoral d'Actions pour la Gestion de l'Erosion (PLAGE)

A ces enjeux forts s'ajoutent ceux liés aux zones arrière-littorales, en particulier dans la zone des Wateringues. Situé en Flandre Maritime dans le triangle Calais – Saint-Omer – Dunkerque, le territoire des Wateringues s'étend sur 85 000 ha. Son altitude moyenne est inférieure au niveau des plus hautes mers compris entre 0 et 5 m. Le secteur des Wateringues est donc particulièrement vulnérable face au risque d'invasion marine et de crue, d'autant plus qu'il regroupe 430 000 habitants, d'importants espaces agricoles, des zones humides ainsi qu'une faune et une flore très variées. Aussi l'Institution Interdépartementale des Wateringues a-t-elle été créée pour réaliser des ouvrages d'évacuation des crues à la mer, assurer leur exploitation et leur entretien. Actuellement le secteur compte près de 100 stations de pompage, plus de 1500 km de Watergangs¹ et 150 km de canaux domaniaux.

Il est toutefois essentiel de noter qu'aucune invasion marine n'a été observée jusqu'à présent dans l'intérieur des terres en raison de la réelle prise de conscience du phénomène par la population et les Autorités locales qui ont su tirer parti de ce handicap naturel pour développer leurs activités économiques.

Nous pourrions néanmoins nous demander si les conséquences de l'évolution des niveaux marins et autres paramètres climatiques ont été prises en compte pour le dimensionnement des systèmes d'évacuation et donc des ouvrages de défense.

Face aux enjeux forts présents dans la frange littorale du Nord – Pas de Calais et à la situation topographique particulière de la zone des Wateringues, il paraît

¹ Les Watergangs sont des émissaires recueillant les eaux collectées par les réseaux de drainage ou les fossés particuliers. Ces eaux sont acheminées vers les canaux grâce à des stations de relèvement.

naturel et primordial de s'intéresser à la caractérisation de l'aléa de submersion marine afin d'intégrer ce phénomène dans la stratégie de développement des communes et de réaliser des politiques publiques relativement souples et dynamiques adaptées à l'évolution permanente du littoral.

II. Une évolution permanente du littoral...

A. Les agents et les mécanismes responsables de l'évolution des côtes

Les littoraux sont continuellement soumis à l'action d'agents naturels d'origine météorologique ou marine qui modifient les paysages. Les précipitations contribuent à l'évolution des côtes à falaises par le biais du ruissellement et de l'infiltration tandis que la température, en influant sur l'eau contenue dans les strates argileuses des falaises, provoque des actions mécaniques sur les matériaux. La formation de fissures et l'érosion sont deux conséquences directes de ces facteurs météorologiques auxquels il faut ajouter les vents. Ces derniers sont responsables de la génération des houles, des surcotes-décotes² de marée et du transport de sable sur l'estran³ et dans les dunes.

1. Définition du zéro hydrographique

Le zéro hydrographique ou zéro des cartes marines est le niveau de référence à partir duquel sont déterminées les hauteurs de marées. Il correspond en France au niveau des plus basses mers astronomiques mais il s'agit avant tout d'un niveau théorique sous lequel le niveau de la mer ne descend que très exceptionnellement.

2. Quelques notions sur la marée et les courants

La marée est la variation du niveau de la mer due à l'action gravitationnelle de la Lune et du Soleil. Deux forces s'exercent sur les océans : une force centrifuge constante et une force gravitationnelle variable en fonction de la distance Terre – Lune.

On note M_T la masse de la Terre, M_L celle de la Lune, r le rayon de la Terre et R la distance Terre – Lune. On considère également un point P sur la croûte terrestre situé à un angle ψ par rapport à l'équateur.

La force centrifuge au point P s'écrit alors $F_c = \frac{G.M_T.M_L}{(R - r \cos \psi)^2}$

La force gravitationnelle s'écrit $F_g = \frac{G.M_T.M_L}{R^2}$

² Il y a **surcote** lorsque la marée prédite est inférieure à la marée observée. A l'inverse, si la marée observée est inférieure à la marée prédite, on parle de **décote**.

³ L'**estran** est, en géographie, la partie du littoral située entre les plus hautes et les plus basses mers connues. Les termes *zone de marnage* ou *zone intertidale* sont également employés.

Ainsi, en soustrayant les deux forces et en faisant l'hypothèse que le rayon de la Terre est négligeable devant la distance Terre – Lune, la force de marée en P s'écrit :

$$F_M = \frac{4.G.M_T.M_L.r.\cos\psi}{R^3}$$

La force de la marée étant en $1/R^3$, plus le point P à la surface de la Terre est proche de la Lune et plus la force de marée sera importante.

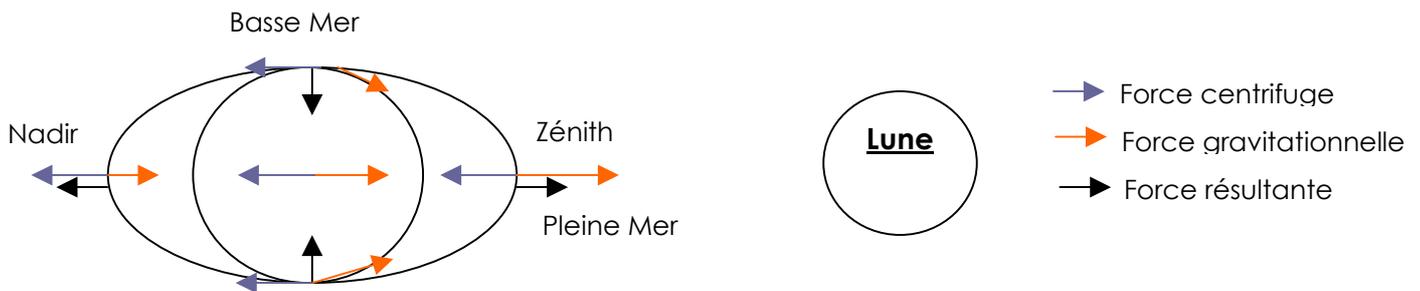


Figure 5 : Schématisation des forces responsables des pleines et basses mers. En pratique, la lune n'étant généralement pas dans le plan équatorial, le bourrelet situé au nadir est plus faible que celui situé au zénith. Les pleines mers sont alors alternativement faibles et fortes, à l'origine de la composante diurne⁴ de la marée. Cette composante peut être négligeable, comme sur la façade atlantique.

L'alternance des pleines et basses mers provient donc de l'effet de la rotation de la Terre et il existe quatre types de marées :

- Dans la marée de **type semi-diurne**, les composantes diurnes sont négligeables devant les composantes semi-diurnes. Il existe donc deux pleines mers et deux basses mers par jour d'importance sensiblement égale.
- Dans les marées de **type diurne**, les composantes semi-diurnes sont négligeables devant les composantes diurnes. Il y a alors une pleine mer et une basse mer par jour.
- Il existe également des **marées semi-diurnes à inégalité diurne**, ce qui signifie que les deux pleines et les deux basses mers consécutives par jour peuvent avoir des hauteurs différentes.
- Enfin, dans les marées de **type mixte**, il peut y avoir tantôt deux pleines et deux basses mers par jour tantôt une pleine et une basse mer par jour.

Sur le littoral Nord - Pas de Calais, la marée est de type semi-diurne. On lui affecte généralement un coefficient de marée compris entre 20 pour les morte-eaux et 120 pour les vive-eaux.

⁴ La marée peut être considérée comme une somme de marées élémentaires strictement périodiques appelées composantes harmoniques. Parmi celles-ci les deux groupes les plus importants sont les **ondes semi-diurnes** de période voisine de 12 heures et les **ondes diurnes** de période voisine de 24 heures.

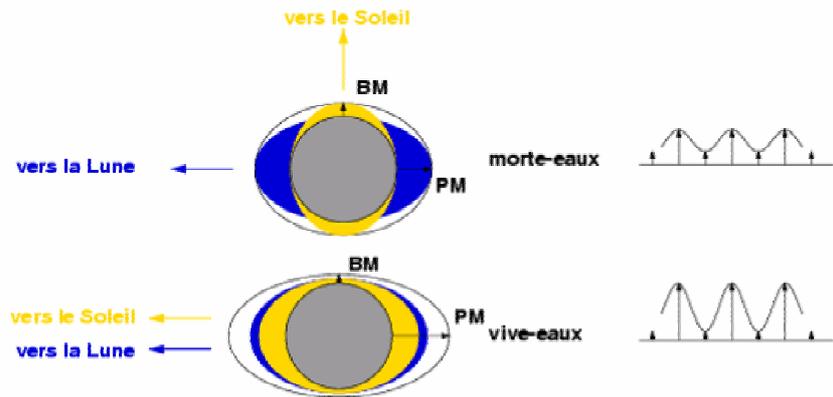


Figure 6 : Schéma explicatif de l'alternance des vive et morte-eaux. Le marnage⁵ est beaucoup plus fort en période de vive-eaux qu'en période de morte-eaux, source site Internet Ifremer.

La marée se manifeste comme une onde progressive en l'absence d'obstacles. Elle progresse à la vitesse $C = \sqrt{g.H}$ où H représente la profondeur et g l'accélération de la pesanteur. En présence d'un obstacle, la composante de l'onde de marée perpendiculaire à celui-ci donne naissance à une onde réfléchie, qui en interférant avec l'onde incidente crée une onde stationnaire. En général, les ondes stationnaires et progressives se superposent et créent des courants parfois tournants qui sont à l'origine du transport des sédiments.

A ces courants gravitationnels s'ajoutent des courants d'origine climatique, saisonnière et météorologique. Le vent génère par exemple un courant de dérive qui par entraînement des couches superficielles se transmet par viscosité aux couches les plus profondes. La direction du courant de dérive est modifiée par la force de Coriolis. Ainsi, pour un vent ayant soufflé dans la même direction et de façon homogène sur une étendue d'eau pendant quelques jours, le courant de dérive en surface est dirigé à 45° de la direction du vent. Cette dérive vers l'est dans l'hémisphère Nord diminue avec les paramètres durée, longueur et étendue et s'avère donc relativement faible le long des côtes. Il en résulte une accumulation ou un retrait de l'eau en fonction de la direction du vent et du trait de côte. Un courant de pente se forme au bout d'un certain temps. Courant de pente et courant de dérive sont les deux composantes majeures de la circulation littorale.

⁵ Le **marnage** est la différence de hauteur entre une pleine et une basse mer successives, à ne pas confondre avec l'**amplitude** de la marée qui est la différence entre la hauteur d'une pleine ou d'une basse mer et le niveau moyen.

3. Surcotes et décotes

Le niveau marin, déterminé théoriquement par la marée, subit l'influence du vent et de la pression atmosphérique à l'origine de surcotes ou de décotes.

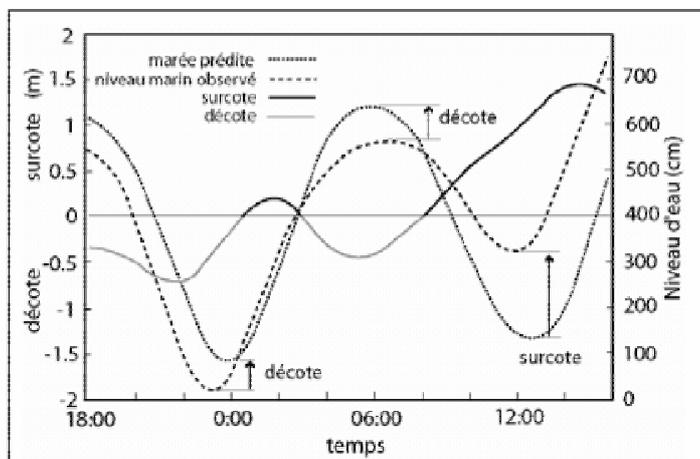


Figure 7 : Surcotes et décotes liées aux variations du niveau marin observé par rapport au niveau prédit. Source thèse de S. Chaverot, Université du littoral Côte d'Opale, 2006.

La direction, la durée et la vitesse des épisodes venteux génèrent des variations du niveau marin. Un vent de mer de 80 km.h^{-1} soufflant pendant 12 heures peut provoquer par exemple une élévation du niveau marin d'un mètre. Quant à la pression, une baisse de pression de 1 hPa se traduit en théorie par une élévation d'un cm du niveau marin. Les surcotes, en augmentant la hauteur du déferlement des vagues sur l'estran favorisent l'érosion et donc l'évolution du trait de côte.

M. Chaverot a étudié, grâce aux observations réalisées sur les ports de Calais, Boulogne-sur-Mer et Dunkerque, les corrélations existant entre les facteurs météorologiques responsables des variations du niveau marin (pression atmosphérique, force et direction des vents) et l'apparition des surcotes et décotes. Les coefficients de détermination R^2 sont en fait très faibles lorsque l'on étudie l'influence de chaque facteur pris séparément et l'ensemble des facteurs n'explique les surcotes qu'à hauteur de 13%. Ceci est principalement dû au fait qu'il existe un décalage temporel dans la mise en action des vents et la baisse de la pression atmosphérique, et un décalage spatial dû à l'inertie entre les facteurs de surcotes et les variations du niveau marin. La rotation du vent et la tension de celui-ci sur l'eau peuvent également contribuer aux variations du niveau marin.

Ces observations montrent qu'il est encore difficile de déterminer de manière exacte les conditions météorologiques qui contribuent à générer surcotes et décotes. Il est donc encore difficile de les prévoir mais leurs probabilités d'observations ou périodes de retour peuvent être calculées à l'aide de lois statistiques. La propagation des ondes de surcotes et décotes provoque également des surcourants.

4. La houle et les vagues

Les vagues sont des oscillations de la mer, générées par l'énergie du vent et entretenues par la pesanteur. La formation et la génération des vagues sont à l'heure actuelle encore mal comprises par les scientifiques mais supposées liées aux variations de pression de l'air à la surface de l'eau. Il y a transfert d'énergie du vent vers les vagues. Lorsque le vent faiblit ou que les vagues se propagent à l'extérieur de la zone ventée, la propagation des vagues se fait librement donnant naissance à la houle qui est progressivement transformée par effet de fond. Les vagues perdent peu à peu leur énergie. A l'approche des côtes, lorsque la profondeur est inférieure à deux fois la hauteur⁶ de la vague, les vagues déferlent sur la plage et perdent toute leur énergie qui est communiquée en partie aux courants. Le déferlement est la conséquence de la réfraction. A l'approche de la côte, l'amplitude de la vague croît en raison de la faible profondeur jusqu'à atteindre une hauteur critique responsable du déferlement. Il y a alors, dans un premier temps, formation de rouleaux ou de tourbillons de grande échelle et transformation de l'énergie potentielle en énergie cinétique. Cette dernière se dissipe progressivement tandis que des courants longitudinaux et transversaux sont générés et que le niveau d'eau moyen croît. Le déferlement se termine par un mouvement de va-et-vient de bord de mer.

Ce courant est de l'ordre de 0.5 m/s en moyenne mais peut atteindre 2 m/s lors de fortes tempêtes. Son intensité est maximale entre la ligne principale de déferlement et le rivage.

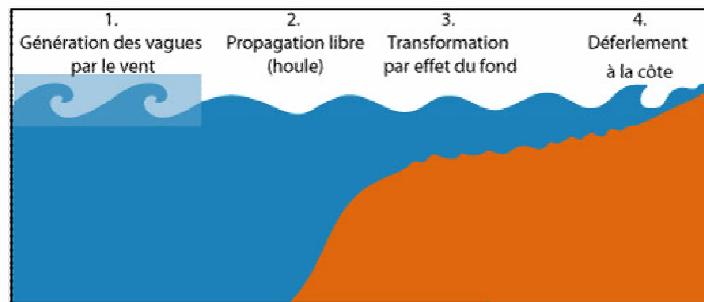


Figure 8 : De la naissance au déferlement des vagues, source site Internet du Service Hydrographique et Océanographique de la Marée (SHOM)

5. Synthèse sur les principaux phénomènes hydrodynamiques et climatiques des zones côtières

Dans les zones littorales, les principaux phénomènes hydrodynamiques à considérer sont donc d'une part les ondes de vent et de marée et d'autre part les courants dus à la marée, au vent, aux vagues et aux gradients de densité.

La houle, onde de haute fréquence de période comprise entre 5 et 15 secondes produite par le vent, subit de nombreuses évolutions en s'approchant du littoral suite à la réfraction, la réflexion, la diffraction, le déferlement et aux frottements du sol. Son rôle est prépondérant dans les zones de faible profondeur car

⁶ La **hauteur** d'une vague est la distance crête à creux, c'est-à-dire la différence entre la hauteur maximale et la hauteur minimale de la vague pendant une période T qui sépare deux passages successifs dans le même sens par le niveau moyen.

elle contrôle les courants et le transport des sédiments, du fait notamment du déferlement. Il existe également des ondes de basse fréquence de marée qui naissent des interactions des vagues entre elles ou des vagues avec la topographie et les courants.

Les ondes de marées sont quant à elles la conséquence d'interactions entre la Terre, la Lune et le Soleil. Elles sont notamment déformées par la réfraction, les frottements de fond et la force de Coriolis.

Les courants de marées sont principalement contrôlés par les gradients de pression, les frottements avec le sol et la force de Coriolis. La plupart sont longitudinaux à la côte et ont une vitesse comprise entre 0,1 et 1 m/s. Le vent et les variations de densité amplifient les courants transversaux généralement relativement faibles.

Les courants induits par un vent transversal au littoral donnent naissance à une variation du niveau de la mer, à l'origine d'un gradient de pression horizontal perpendiculaire au littoral et d'un courant de fond. Les vents longitudinaux par la force de Coriolis produisent quant à eux un courant de retour en fond moins important que le précédent.

Il existe également des courants dus aux variations du mélange eau-sédiments en raison des variations de température, de pression et de concentration en sédiments.

Enfin, les vagues et les courants qu'elles génèrent interagissent.

A ces phénomènes hydrodynamiques s'ajoute l'action d'agents climatiques comme la température, les vents et les précipitations responsables de la modification du paysage littoral.

6. Les mécanismes responsables de l'évolution des côtes

a. Le domaine du large

Les principaux agents morphologiques au large sont les courants de marée. Les sédiments grossiers ne se déplacent généralement pas car la vitesse des courants est souvent insuffisante. Des transits sédimentaires sont toutefois possibles sur les bancs sableux.

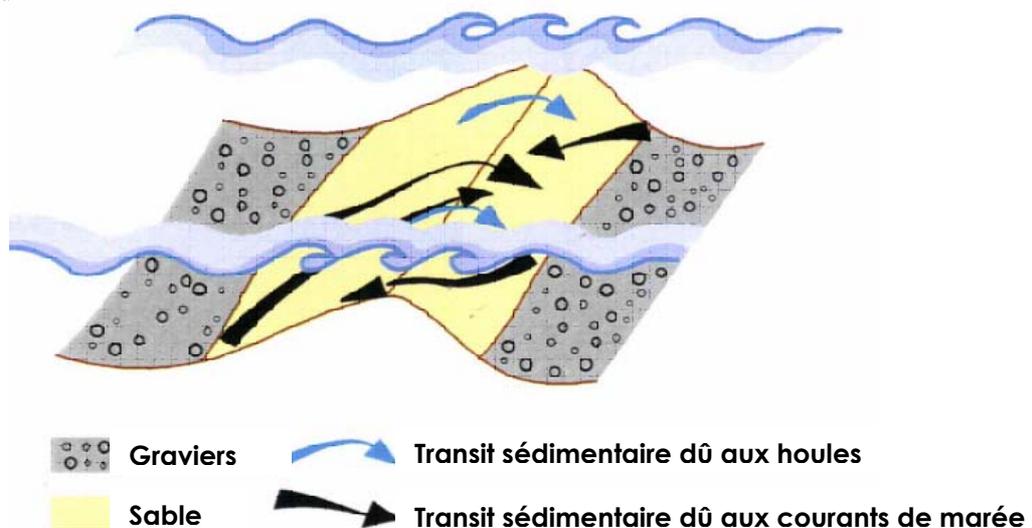


Figure 9 : Transits sédimentaires au large, source Plan Littoral d'Actions pour la Gestion de l'Erosion (PLAGE), 2003.

b. Le domaine côtier

En s'approchant de la côte, l'intensité des courants de marées diminue tandis que leur direction est modifiée par la morphologie du littoral. Les houles ont également une influence de plus en plus importante à mesure que l'on s'éloigne du large.

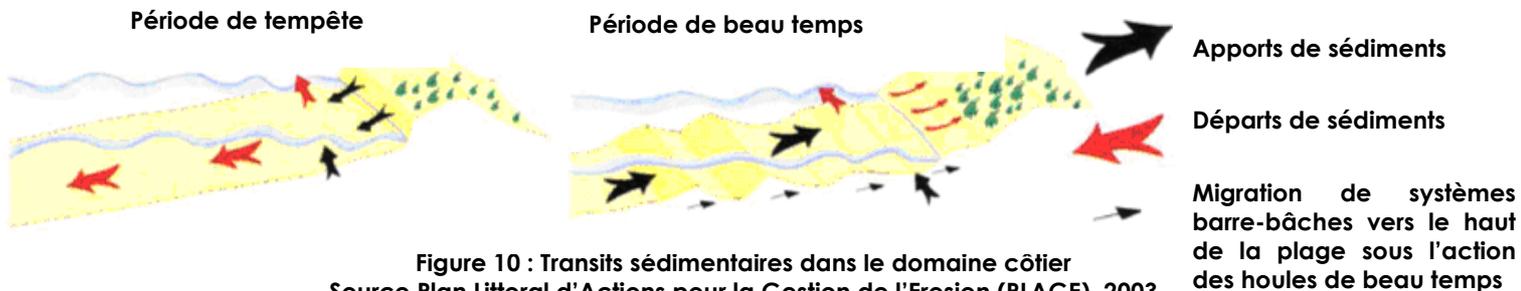


Figure 10 : Transits sédimentaires dans le domaine côtier
Source Plan Littoral d'Actions pour la Gestion de l'Érosion (PLAGE), 2003

Les transits sédimentaires sur l'estran subissent des variations saisonnières. En hiver, la forte énergie des houles lors de tempêtes plus fréquentes qu'en été érode l'estran saturé en eau. Le bilan sédimentaire est globalement négatif et l'estran s'abaisse. En été, les houles de faible énergie sont relativement fréquentes et l'estran, sec, favorise l'accumulation de sable. La dérive littorale est moins intense qu'en hiver. Le bilan sédimentaire est positif. L'estran s'exhaure. Barres et bâches se forment et migrent vers le haut de plage.

A l'échelle pluriannuelle, ces bilans sont généralement déséquilibrés. Il y a alors engraissement ou érosion de l'estran.

c. Impact des transits sédimentaires sur les dunes

Les dunes évoluent principalement sous l'action du vent. Des transits sédimentaires existent également entre la dune bordière et l'estran. Ils vont de pair avec les évolutions morphologiques saisonnières de l'estran. En hiver, le pied de dune est attaqué par la houle importante. Le jet de rive, c'est-à-dire la nappe d'eau qui monte sur un rivage sous l'impulsion que lui a donnée une vague lors de son déferlement, sape la base de la dune, provoquant ainsi le glissement de « lobes » à plusieurs dizaines de mètres de longueur. Ce glissement peut donc contribuer à l'avancement du pied de dune. De plus, le sommet de la dune peut être fragilisé par la formation de fissures à l'origine de nouveaux éboulements lors de prochaines tempêtes. Le sable qui s'échappe contribue à combler une partie des départs de sable de l'estran.

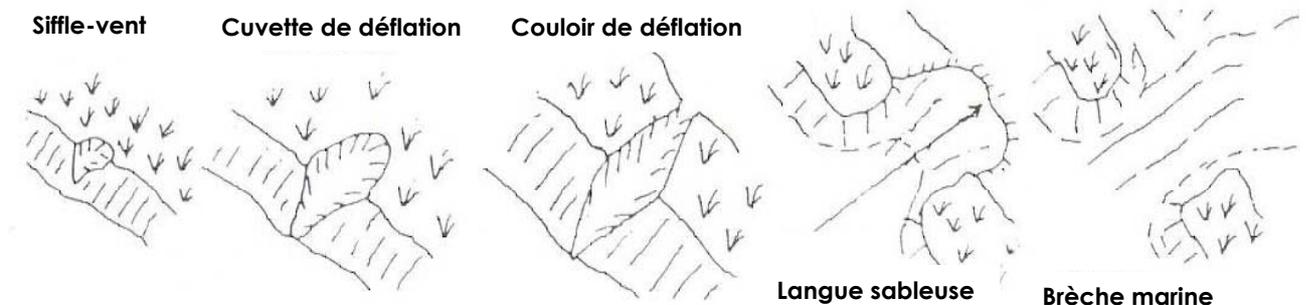


Figure 11 : Schéma des différents stades de dégradation d'une dune
Source Mémoire de B. Suret, Communauté Urbaine de Dunkerque, 2006

En été, au contraire, l'estran étant plus haut, le pied de dune est beaucoup moins soumis aux effets de la houle et les transports éoliens permettent le réengraissement de la dune.

A l'échelle pluriannuelle, ces bilans sont généralement déséquilibrés et dépendent du bilan sédimentaire de l'estran et de la végétation du cordon dunaire.

- Si l'estran est en érosion, soit le cordon est stabilisé par une couverture végétale dense et la mer l'entaille, entraînant sa disparition, soit le cordon n'est pas stabilisé et il migre vers l'arrière tout en étant entaillé par la mer.

- Si l'estran a une tendance à la stabilité ou à l'engraissement, il s'élève et migre vers la mer. Le sable, transporté par les vents est capté par la végétation dunaire. Le cordon peut alors croître vers la mer.

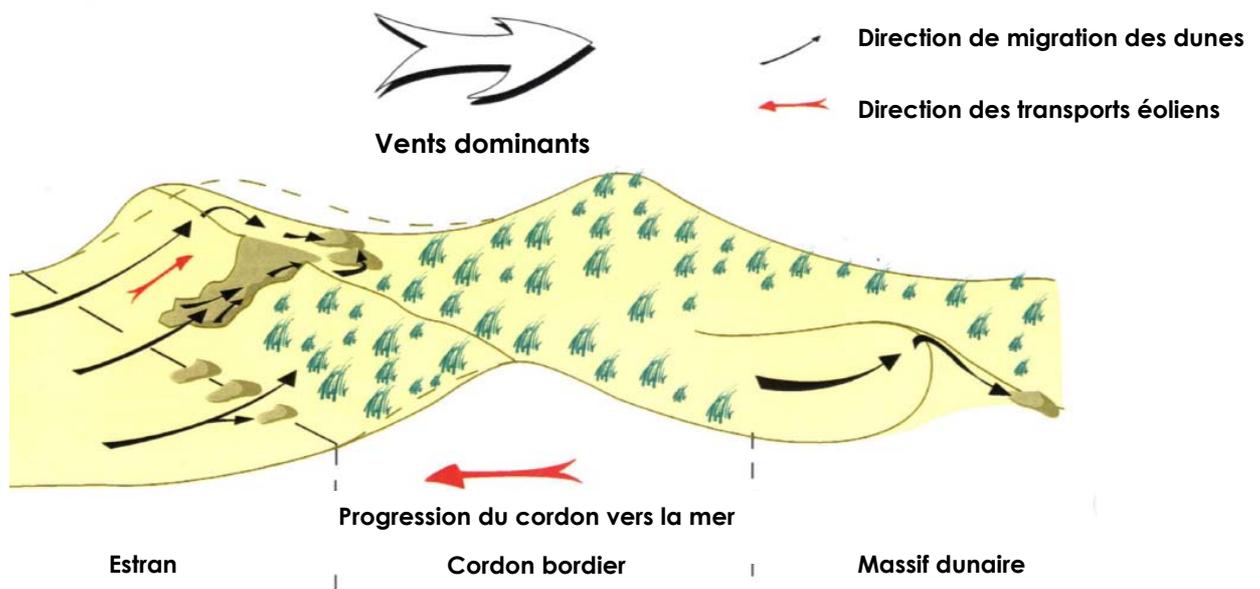


Figure 12 : Impacts des transits sédimentaires sur les dunes
 Source Plan Littoral d'Actions pour la Gestion de l'Erosion (PLAGE), 2003.

d. Impact des transits sédimentaires sur les falaises

Les falaises vives évoluent principalement sous l'action des eaux continentales et de la gravité. Les falaises jeunes sont principalement soumises à l'action des eaux continentales et marines. Les eaux continentales, en s'infiltrant, déstabilisent la falaise en raison des fissures qui se créent tandis que les eaux marines attaquent le pied de la falaise. Des pans de falaises sont alors en équilibre jusqu'à ce que les blocs se détachent, la protégeant alors contre les actions marines.

Le littoral est donc affecté par de nombreux processus complexes et interconnectés responsables de l'évolution des côtes tandis que les activités anthropiques et notamment la construction de logements ou d'ouvrages de défense contre la mer rendent encore plus difficiles la compréhension de ces phénomènes dynamiques. La frange côtière est, par conséquent, un espace fragile où les risques côtiers comme les tsunamis, l'érosion ou les invasions marines sont importants.

B. Les risques côtiers

1. Les tsunamis

Les tsunamis, parfois aussi dénommés vagues sismiques océaniques, sont provoqués par une action mécanique brutale, comme un séisme dans un océan ou une mer, une éruption volcanique, un glissement de terrain ou plus rarement un impact météoritique. Contrairement aux autres vagues, un tsunami n'est pas créé par le vent.

2. L'érosion

Actuellement 20% des côtes de l'Union Européenne, d'après le rapport du projet EUROSION de 2004, sont particulièrement affectés par l'érosion qui se définit comme le processus de transformation et de dégradation du relief causé par des agents naturels et souvent amplifié par l'homme. Il faut distinguer l'érosion continue de l'érosion brutale due à des tempêtes ponctuelles mais intenses qui provoquent le franchissement soudain ou la rupture des éléments de défense de type perré ou cordon dunaire.

Les trois principaux phénomènes d'érosion continue sont :

- le recul du trait de côte sous l'action des précipitations et des températures sur les falaises, l'action de la marée et de l'effet des vagues sur le littoral et l'action humaine dont les ouvrages perturbent la répartition des sédiments et peuvent fragiliser l'équilibre global d'une côte à long terme ;
- le contournement du perré par la mer ;
- le vieillissement des ouvrages de défense.



Figure 13 : Erosion d'un pied de dune à Oye Plage

Source : Etude PPR Côtes Basses meubles du Pas de Calais réalisée par le Centre d'Etude Technique de l'Équipement (CETE) pour le compte du Service Maritime Boulogne et Calais (SMBC), 2006



Figure 14 : Brèche dans le perré de Wissant

Les méthodes de défense regroupant les ouvrages de défense lourde contre la mer (murs de protection et cordons d'enrochement situés en haut de plage) et les ouvrages de protection du trait de côte (brise-lames⁷, épis et jetées⁸) ont donc un caractère assez paradoxal.



Figure 15 : Des épis
source <http://www.univ-lehavre.fr/cybernat/images/protepis.jpg>

⁷ Un **brise-lames** est un ouvrage de petits fonds permanent ou submersible, parallèle au rivage.

⁸ Les **épis et les jetées** sont des ouvrages transversaux au trait de côte qui bloquent la dérive littorale. Pour une meilleure efficacité ils doivent être placés en série.



Figure 16 : Enrochement à Saint Gabriel dans le Nord de la Canche, source étude PPR Côtes Basses meubles du Pas de Calais réalisée par le Centre d'Etude Technique de l'Equipement (CETE) pour le compte du Service Maritime Boulogne et Calais (SMBC), 2006

En effet, si ces techniques constituent des moyens efficaces de lutte contre l'évolution du trait de côte, elles peuvent contribuer à une érosion accrue des plages par réfléchissement de l'onde contre les murs vers le bas de plage. Les digues perturbent également le transit sédimentaire. Quant aux brise-lames, ils permettent à la houle de perdre une partie de son énergie mais désorganisent le courant de dérive littorale, à l'image des épis et des jetées. L'érosion est dans ce cas reportée à l'aval des ouvrages et doit donc s'accompagner de rechargements de plage.

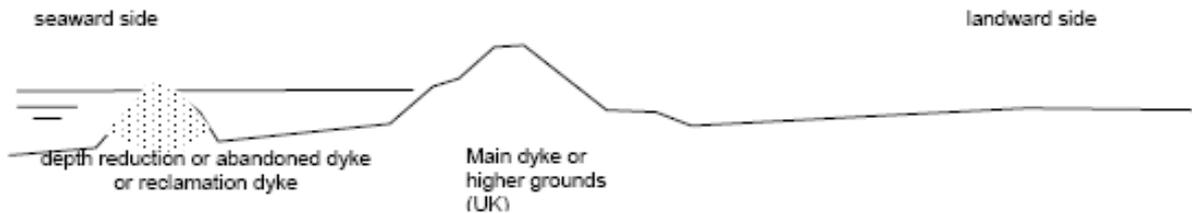


Figure 17 : Deux exemples d'utilisation des digues. La première permet de briser la houle qui déferle tandis que la deuxième contribue au maintien du trait de côte et empêche les invasions marines des zones arrière littorales, source site Internet ComCoast

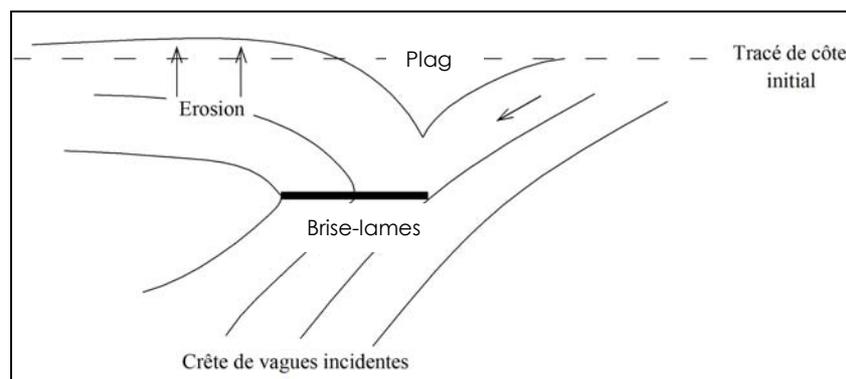


Figure 18 : Inconvénients liés à l'implantation d'un brise-lame aux abords d'une plage source mémoire de Benoît Suret, 2006

Les méthodes dites « douces » suscitent quant à elles de l'enthousiasme depuis une vingtaine d'années. Elles sont de trois types : le rechargement de plage, le remodelage du haut de plage à l'aide de fascines⁹ ou de ganivelles¹⁰ destinées à capter le sable déplacé par le vent et le By-passing. Ce dernier procédé consiste à rétablir artificiellement un transit littoral interrompu par un obstacle. Les sédiments accumulés contre les ouvrages sont pour ce faire réinjectés vers l'aval où ils se remettent à transiter.



Figure 19 : Un rechargement de plage, site Internet <http://www.gnb.ca/0263/coaststructure-f.asp>



Figure 20 : Rangée de ganivelles source mémoire de M. Suret, 2006



Figure 21 : Alignement de fascines en bordure de dune (au premier plan : des ganivelles roulées non encore disposées), source mémoire de M. Suret, 2006

Dans le cadre du projet « COMBINED functions in COASTal defence zones » (COMCOAST), les différents systèmes de protection ont été comparés.

⁹ Les **fascines** sont des fagots de branchage plantés verticalement dans le sable pour en stopper l'érosion éolienne.

¹⁰ Les **ganivelles** sont des barrières constituées d'une série de lattes de bois tendues par des fils de fer entre des piquets solidement enfoncés dans le sable.

Mesures de protection	Domaines étudiés	Faisabilité	Remarques
Rechargement de plages	Aspects hydrauliques Faisabilité technique Impact environnemental Acceptation sociale	Positif 1 1 1 1	Score global Réduction de l'action des vagues Prouvé, réduction de la charge hydraulique sur les ouvrages de défense Préservation des zones humides Combinaison avec d'autres mesures ?
Adaptation des ouvrages de défense primaire	Aspects hydrauliques Faisabilité technique Impact environnemental Acceptation sociale	Positif 1 1/0 0 1	Score global Réduction locale du franchissement des vagues En partie prouvé, une partie reste expérimentale Pas de changement significatif par rapport à l'existant Combinaison avec d'autres mesures ?
Renforcement des ouvrages de défense	Aspects hydrauliques Faisabilité technique Impact environnemental Acceptation sociale	Mitigé 1 1/0 0 0	Score global Recours à de nouvelles technologies Artificialisation du rivage mais maintien possible d'une couverture végétale à l'aval de la digue Suffisant
Stratégie de réalignement	Aspects hydrauliques Faisabilité technique Impact environnemental Acceptation sociale	Positif 1/0 1 1 0	Score global Réduction de l'action des vagues sur les ouvrages de défense secondaire Création de marais salants et de zones humides Suffisant

Tableau 2 : Tableau comparatif des méthodes de protection contre la mer, d'après l'étude du projet COMCOAST, State-of-the-art Inventory, 2005

S'il est à noter que le rechargement de plages est une méthode coûteuse qui nécessite une étude de la granulométrie du sable présent, cette méthode peut paraître relativement attractive face aux techniques de défense lourde dont les effets ont été étudiés lors du projet EUROSION. Afin de faire face à l'élévation du niveau des mers et d'éviter le risque de submersion par franchissement du perré, les Autorités sont sans cesse contraintes de rehausser les digues. A ces coûts s'ajoute le coût de réparation des dommages créés par les tempêtes. Ainsi le coût économique d'un ouvrage a-t-il été évalué, d'après un article intitulé « ouvrages de protection contre la houle » des Techniques de l'Ingénieur à :

$$C = \sum_{a=0}^N (T_i \cdot I_a + T_e \cdot E_a + T_r \cdot R_a) / (1+J)^a$$

Avec

- C : coût total actualisé sur la durée de vie de l'ouvrage
- T : taux de rareté
- I : coût d'investissement
- E : coût d'entretien
- R : coût de réparation
- J : taux d'actualisation
- N : durée de vie de l'ouvrage
- a : indice de l'année

3. Les submersions marines

Les submersions marines sont dues :

- A la rupture d'un cordon dunaire à la suite d'une érosion intensive,
- A des vagues de forte amplitude provoquées par des glissements sous-marins (notamment sur la façade méditerranéenne),
- A la rupture d'ouvrages de protection ou à leur franchissement exceptionnel par paquets d'eau. Dans ce cas, les submersions de tempêtes résultent d'une surcote (induite par un fort vent d'afflux et une faible pression barométrique) couplée à une pleine mer de vive eau mais leurs fréquences et leurs intensités dépendent du bilan sédimentaire des plages.

Or depuis 1995, le volume des galets des sites sensibles n'a que très peu évolué. Un quatrième facteur semble donc entrer en jeu dans l'explication de la fréquence et de l'intensité des phénomènes de submersion. Il s'agirait du front froid car depuis 1967, 65% des cas de submersion observés se sont déroulés pendant ou peu après le passage d'un front froid. En effet, à l'approche de ce front, la pression atmosphérique baisse devant le front et le vent devient plus important. A l'arrière de ce front, la pression remonte et le vent subit des rotations avec de fortes rafales. Ce changement de direction des vents est propice à la formation d'une houle croisée qui érode les plages tandis que l'eau passe au dessus des ouvrages de protection.

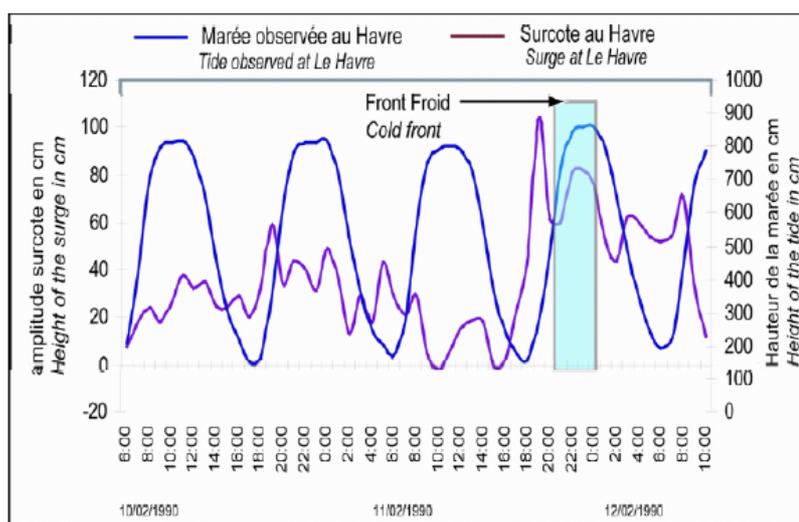


Figure 22 : Exemple de submersion sévère du 12 février 1990 au Havre dans laquelle les facteurs n'étaient pas à leur optimum, source rapport scientifique BAR final, février 2005.

Les submersions sont en principe de courte durée, de quelques heures à quelques jours et se traduisent par des invasions d'eaux salées relativement agressives à l'intérieur des terres. En cas de rupture du cordon dunaire, les eaux marines peuvent véhiculer d'importantes quantités de sédiments, rendant des terres agricoles momentanément inexploitable. Lorsque l'eau franchit les ouvrages de défense, les projections de sable ou de galets peuvent avoir des effets dommageables sur les fronts de mer urbanisés.

Des solutions innovantes sont actuellement développées pour tenter de limiter ces invasions marines. Afin d'appréhender pleinement ces concepts, il est

nécessaire de réaliser une étude préalable des mécanismes de destruction des digues.

a. Les principaux mécanismes responsables de la dégradation des digues

Une digue à talus est constituée d'un soubassement et éventuellement d'un tapis de pied dans la partie inférieure de la digue, d'un noyau protégé par des sous-couches et des carapaces capables de résister à l'attaque de la houle, de cavaliers de pied qui renforcent l'ouvrage en partie basse et d'un couronnement en partie haute.

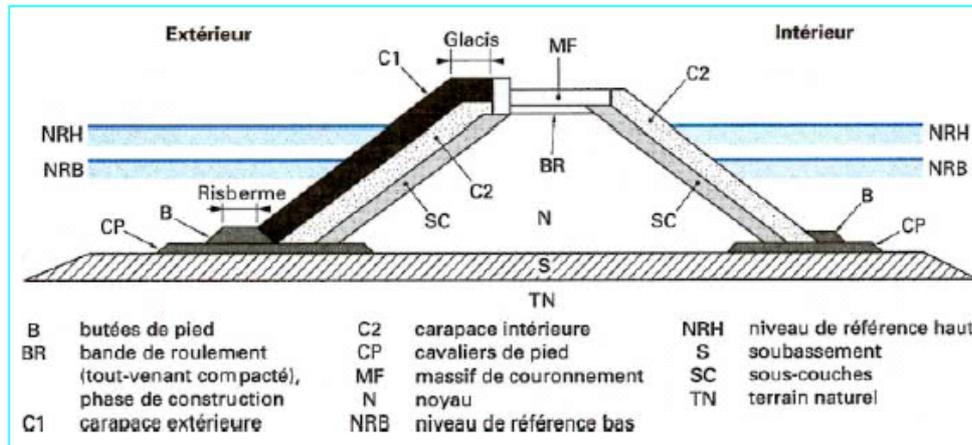


Figure 23 : Éléments constitutifs d'une digue à talus, source article des Techniques de l'Ingénieur intitulé *Ouvrages de protection contre la houle*

A vague montante, la houle, à l'extérieur de la digue monte le long de la carapace extérieure et tend à soulever les blocs tandis qu'une partie de l'eau s'infiltre à l'intérieur de la carapace et des sous-couches avec une vitesse plus lente qu'à l'extérieur en raison des frottements et des pertes de charge. Lors du reflux de la vague à l'extérieur, les blocs extérieurs reprennent la plupart du temps leur position initiale mais l'eau continue à s'élever à l'intérieur de la digue jusqu'à ce que le mouvement inverse se produise. Ce déphasage des niveaux d'eau entre l'intérieur et l'extérieur se traduit par un arrachement des blocs les moins stables en partie haute de la digue et une expulsion horizontale des blocs soumis à la différence de pression maximale entre le niveau d'eau présent dans la digue et une vague descendante à son minimum. Ce déphasage varie en fonction des caractéristiques de la houle, du fond et de la digue.

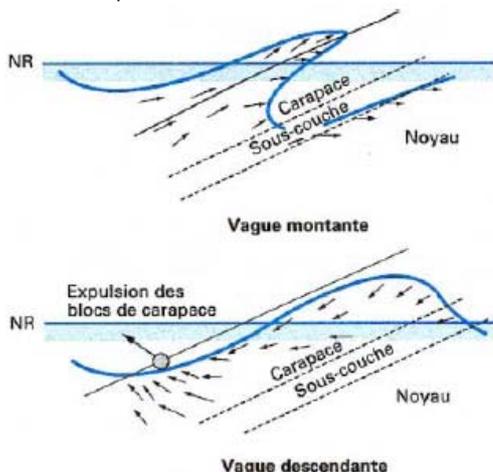


Figure 24 : Action de la houle sur une digue à talus, source article des Techniques de l'Ingénieur intitulé *Ouvrages de protection contre la houle*.

A la dégradation de la carapace extérieure peut s'ajouter celle de la carapace intérieure située à l'aval de la digue. Il peut s'agir d'une micro-fissure, d'une rupture de pente ou d'une infiltration d'eau sous l'ouvrage.

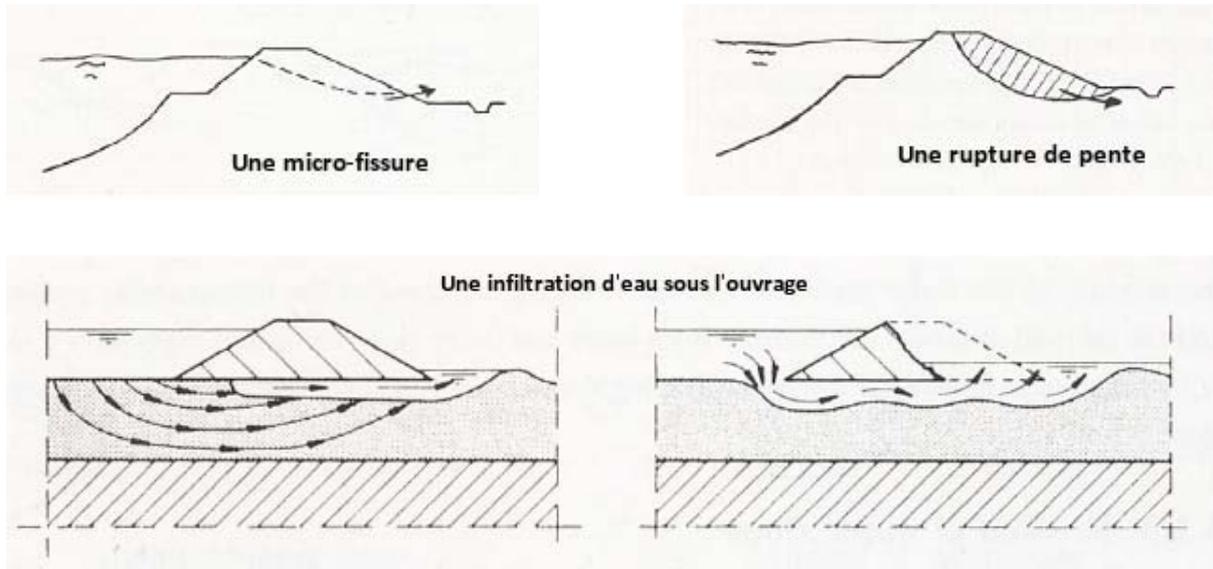


Figure 25 : Principaux mécanismes de dégradation de l'aval d'une digue, source site Internet COMCOAST

La végétation située sur la carapace interne à l'aval de l'ouvrage de défense permet de protéger la sous-couche en limitant l'érosion en surface.

Différentes solutions innovantes sont alors proposées pour limiter ces dégradations.

b. Le recours aux géosynthétiques

Les géosynthétiques ont des propriétés de séparation des sols, de filtration, de drainage, de renforcement et de protection. Les années 1980 ont vu apparaître différents matériaux comme les géogrilles qui sont des structures planes à base de polymères, constituées par un réseau ouvert d'éléments résistant à la traction, reliés entre eux selon un motif régulier permettant le confinement du sol. Les géocellules permettent quant à elles de protéger les talus. Ce sont des structures de polyéthylène tridimensionnelles, extrudées en nids d'abeilles. Elles sont flexibles et ont une haute résistance à la traction.

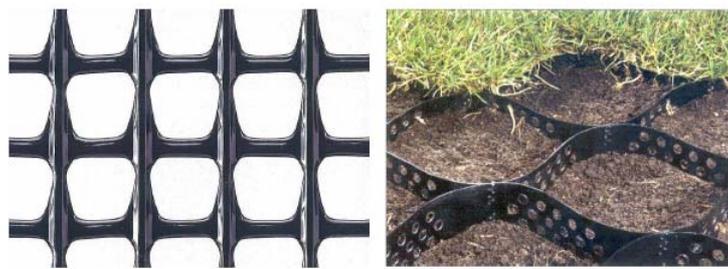


Figure 26 : A gauche une géogrille, à droite une géocellule, source site Internet COMCOAST

Ces systèmes pourraient être implantés sur la carapace interne située en aval de la digue et le couronnement pour maintenir la couverture végétale présente et ainsi empêcher la fragilisation de la digue due aux franchissements marins. Les géogrilles et les géocellules, placées entre 5 et 10 cm sous la surface du sol, permettraient, en effet, d'assurer une certaine cohérence du sol et d'absorber le surplus d'énergie des vagues, protégeant ainsi la végétation. Ces systèmes auraient une durée de vie relativement longue, d'au moins 150 ans et nécessiteraient peu de maintenance. De plus, ils seraient économiquement plus rentables qu'une élévation des digues.

Méthodes	Estimation des coûts (en €/m de digue)
Elévation standard de la digue	5 000
Installation de géogrilles sur le couronnement et la carapace intérieure	365
Installation de géocellules sur le couronnement et la carapace intérieure	435

Tableau 3 : Estimation des coûts totaux de mise en place de géogrilles et de géocellules, site Internet COMCOAST

Les géogrilles et les géocellules se placent différemment avant d'être toutes deux ancrées sur le couronnement.

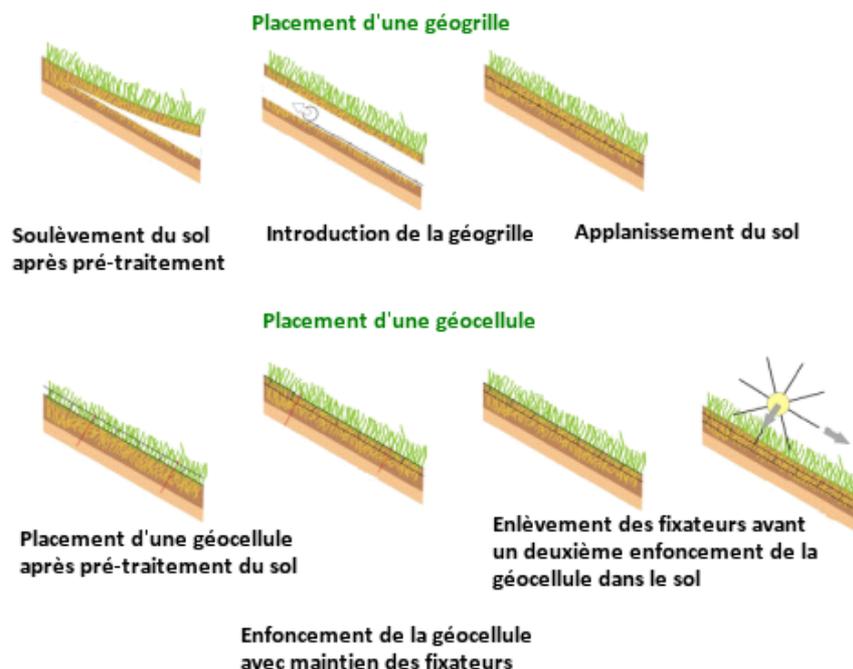


Figure 27 : Placement des géocellules et des géogrilles, d'après le site Internet COMCOAST, 2005

Les irrégularités du sol peuvent empêcher un placement correct des géogrilles. Les géocellules semblent dans ce cas plus adaptées puisque le sol n'a pas besoin d'être soulevé. Il faut toutefois avoir une couverture végétale suffisamment dense pour que ces systèmes soient efficaces.

Le site pilote d'Hondsbosche aux Pays-Bas teste actuellement l'efficacité des géogrilles et des géocellules. La digue a également été renforcée côté mer par des éléments bétonnés réduisant ainsi l'énergie des vagues arrivant en amont.



Figure 28 : Protection en amont de la digue sur le site d'Hondsbosche, source site Internet COMCOAST



Figure 29 : Le site pilote d'Hondsbosche présente trois types de défauts sur la couverture végétale en aval : une absence de végétation à certains endroits, des irrégularités en surface et une hétérogénéité de la végétation, source site Internet COMCOAST, 2005.

c. Le concept Crest Drainage Dike

Développé par DHV, un groupe d'ingénieurs et de consultants chargés de proposer des solutions durables dans les secteurs des transports, de l'eau, du bâtiment et de l'industrie, ce concept, connu sous le nom de *Crest Drainage Dike* vise à réduire la charge sur la carapace intérieure de la partie située en aval de la digue au lieu de renforcer la pente, préserver la végétation présente sur cette carapace intérieure et établir des activités touristiques comme la marche ou le vélo.

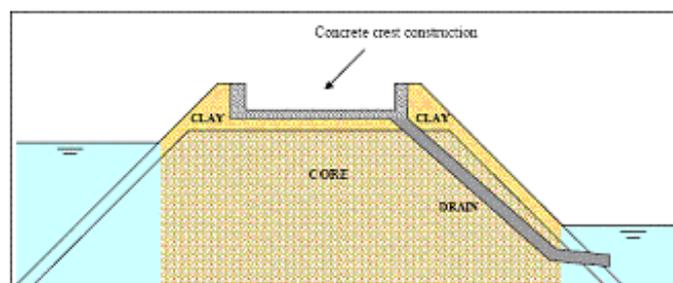


Figure 30 : Le concept Crest Drainage Dike, source SITE Internet COMCOAST, rapport intitulé *Development of Alternative Overtopping-Resistant Sea Defences*

- Avec une telle construction, deux cas de figure peuvent se produire :
- Soit la vague ne franchit pas la digue et s'accumule dans le bassin de rétention puis l'eau est évacuée vers l'aval.
 - Soit la vague franchit la digue mais la durée de la charge hydraulique à laquelle est soumise la carapace interne est moins importante que s'il n'y avait pas d'ouverture.

Cette solution semblerait financièrement acceptable. Les coûts seraient moins importants qu'un réhaussement des digues ou qu'un renforcement de leur carapace intérieure. D'un point de vue technique, la difficulté vient principalement du dimensionnement de l'ouverture car il faut trouver le bon compromis entre une capacité de décharge suffisante mais non surdimensionnée puisqu'il en résulterait une instabilité de la digue, et un temps de charge hydraulique suffisamment faible pour préserver la végétation située en aval. Pour cela, la forme de l'ouverture pourra être adaptée. Les recherches se poursuivent.

d. Le concept Sandy Dike

Le concept *sandy dike* a été développé par le groupe international ARCADIS en partenariat avec Alkyon, une entreprise hollandaise. ARCADIS fournit des prestations de gestion de projet, de conseils et d'ingénierie dans le domaine des infrastructures, de l'environnement et du bâtiment tandis qu'Alkyon est davantage spécialisée dans l'ingénierie hydraulique côtière.

Le principe *sandy dike* consiste à placer une couche de sable sur la carapace intérieure de la digue afin d'en protéger l'aval. Cette couche est sacrifiée en cas de franchissement de l'eau au dessus de l'ouvrage de protection. Toutefois, si son épaisseur est suffisante, la stabilité de la digue n'est pas mise en péril lors d'événements extrêmes tels que les tempêtes. Ce concept est relativement intéressant pour les côtes néerlandaises rarement soumises à de violentes invasions marines puisque dans ce cas, les coûts de maintenance sont faibles et la couche de sable protectrice peu épaisse. Il est par contre moins intéressant pour les belges car les critères de construction des digues sont beaucoup moins draconiens que pour les Pays-Bas. La probabilité d'invasion marine par franchissement est donc plus importante en Belgique qu'aux Pays-Bas. La viabilité économique de cette solution doit être étudiée avec intérêt.

Il est également souhaitable que cette solution contre l'érosion et la dégradation progressive de l'aval de la digue soit préconisée dans un environnement naturel sableux pour éviter une entrée du sable dans les communes situées aux alentours.

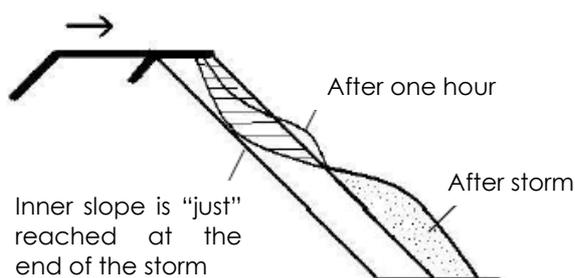


Figure 31 : Erosion de la couche de sable

Source site Internet COMCOAST, rapport intitulé *Sandy Dike*

La digue de Westkapelle et le site de Hondsbossche testent actuellement cette solution écologique. De la végétation pourrait être plantée sur le sable, attirant ainsi oiseaux et espèces protégées et permettant le maintien de cette couche protectrice.

Ces quelques exemples innovants montrent bien la réelle prise de conscience des Autorités quant à l'évolution permanente du littoral qui devrait s'accroître avec le changement climatique et la nécessité de protéger les populations contre les risques associés.

III. Une évolution qui devrait s'accroître en raison du changement climatique

A. Quelques généralités sur le changement climatique

Évolutions des températures, des précipitations, de l'enneigement, du niveau de la mer et des événements météorologiques extrêmes sont autant de conséquences du changement climatique qui affectent fortement la structure et le fonctionnement des écosystèmes. Il est donc essentiel de les comprendre, d'appréhender les causes liées aux activités humaines pour tenter de réduire les effets et les prendre en compte dans les plans d'aménagement des territoires et les politiques publiques en général.

1. Quelques généralités

a. Un peu d'histoire

La perception des modifications climatiques n'est pas récente puisqu'en 1896, Arrhénius effectue les premiers calculs sur les changements climatiques. Toutefois il ne parvient pas à interpréter les variations du climat et c'est au cours de la seconde moitié du XX^{ème} siècle que les observations confirment, notamment grâce aux satellites à partir de 1960, une élévation de la température moyenne de la Terre. L'analyse des carottes glaciaires a ensuite permis en 1985 de reconstituer l'évolution du climat depuis 150 000 ans. Sept ans après s'est déroulée la conférence de Rio où des mesures qualitatives ont été adoptées avant la ratification du protocole de Kyoto en 1997 dans lequel trente-quatre pays se sont engagés à réduire en moyenne de 5.2 % leurs rejets de gaz à effet de serre à l'horizon 2012 par rapport à 1990.

b. Définition : variabilité ou changement climatique ?

D'après la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC), les changements climatiques sont définis comme étant des « changements de climat qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée autour de périodes comparables ».

La variabilité climatique désigne quant à elle les fluctuations des paramètres météorologiques considérées comme normales dans un climat stable.

Ainsi des secteurs d'activités, comme l'agriculture, sensibles aux conditions météorologiques ont-ils adapté leurs techniques de travail à la variabilité climatique mais il est difficile de savoir aujourd'hui si ces savoir-faire seront encore efficaces face aux changements climatiques.

Nous comprenons donc, à travers cet exemple, les impacts socio-économiques forts résultant des changements climatiques et le caractère indispensable de l'étude de ses conséquences.

c. La nécessité d'agir

D'après le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC), les dérèglements climatiques sont désormais inévitables en raison de la forte inertie du système climatique. La figure 32 montre par exemple que le niveau de la mer continue de s'élever plusieurs années voire plusieurs siècles après réduction des émissions de CO₂. Il faudra également plusieurs siècles pour que la température et le taux de CO₂ se stabilisent.

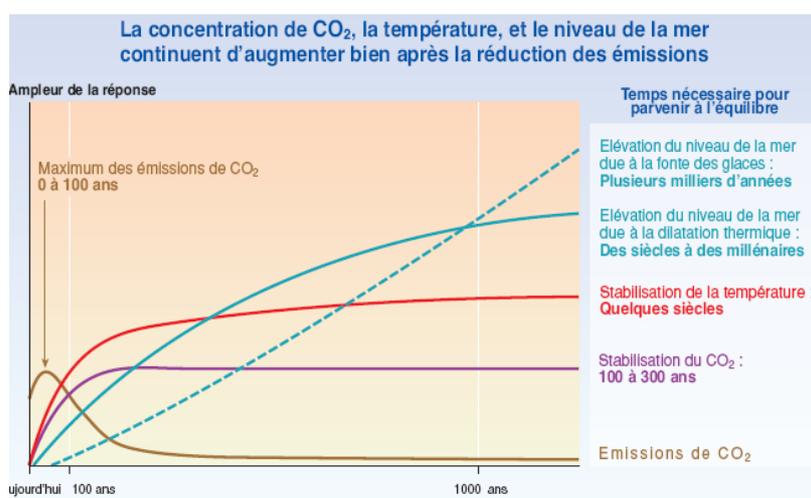


Figure 32 : Illustration de l'inertie climatique.
Source IPCC, 2001

A ce décalage temporel s'ajoute celui entre la prise de conscience des changements climatiques par la population et les efforts réellement fournis pour réduire les émissions de CO₂. L'ADEME évalue chaque année la perception sociale de l'effet de serre par la population française. En 2002, 66% des Français sont convaincus que le réchauffement de l'atmosphère dû à l'augmentation de l'effet de serre est une certitude pour les scientifiques, contre 60 % en 2001. Un sondage Sofres réalisé en 2004 indique qu'en quatre ans, le climat est passé de la quatrième à la première place sur l'échelle des inquiétudes, devenant ainsi la principale préoccupation environnementale des Français.

L'intensification de la communication faite au grand public sur les dangers des changements climatiques à laquelle l'Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique (ONERC) contribue et les récents événements météorologiques extrêmes tels la tempête de décembre 1999 ou la canicule de l'été 2003 peuvent être à l'origine de la progression de ces résultats.

Le schéma présenté ci-dessous récapitule les propos émis.

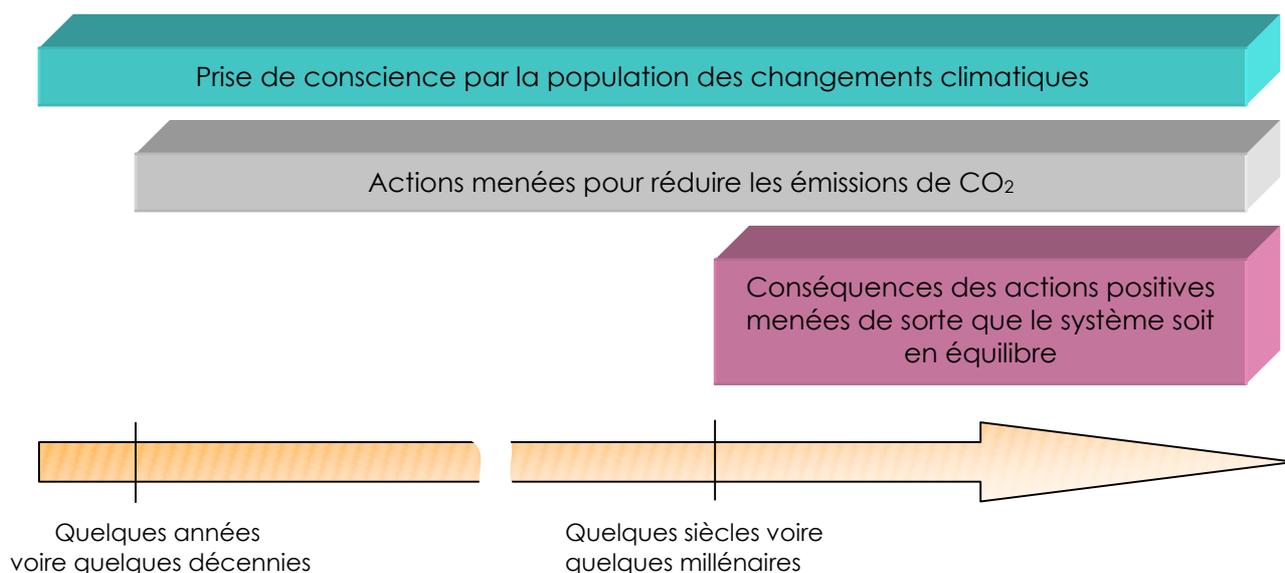


Figure 33 : Schématisation des décalages temporels

Il est donc primordial de mettre en place une politique climatique globale et équilibrée dès maintenant, d'autant que les changements climatiques observés sont bien inférieurs à ceux prévus pour les années à venir.

D'après le rapport du GIEC de 2001, pour avoir une stabilisation de la température d'ici 2050, le monde doit être revenu à un niveau d'émissions de CO₂ égal à la moitié de celui des émissions de 2000. Face à ce constat il faut se rappeler que la population mondiale va s'accroître. Il faut donc, selon Pierre Radanne, consultant et ancien directeur de l'ADEME des mutations de grande ampleur. Ainsi est-il souhaitable qu'une politique d'atténuation coordonnée par la Mission Interministérielle de l'Effet de Serre (MIES) dont l'un des objectifs est de réduire l'effet de serre soit complémentaire d'une politique d'adaptation visant à intégrer les conséquences du changement climatique dans les plans d'aménagement.

L'ONERC distingue en effet les deux types de politiques suivants :

- La politique d'adaptation est définie comme « la réaction des systèmes anthropiques aux stimuli classiques réels ou prévus ou à leurs effets, en vue d'en atténuer les inconvénients ou d'en exploiter les avantages ».
- La politique d'atténuation désigne « l'intervention humaine visant à réduire les sources ou à renforcer les puits de gaz à effet de serre ».

Idéalement ces deux politiques sont complémentaires. Des études portent par exemple sur une capture et un stockage possibles du CO₂ qui seraient complémentaires de la politique de réduction des gaz à effet de serre.

Ainsi, en France par exemple, le Plan Climat et la loi de programme fixant les orientations de la politique énergétique dite loi POPE de 2005 ont-ils pour objectifs de maîtriser l'énergie, notamment par le biais des certificats d'économie d'énergie, de développer les énergies renouvelables et de diminuer de 3 % par an les émissions de gaz à effet de serre. La réglementation, thermique en particulier, les incitations, de

l'ADEME notamment, les informations suite aux diagnostics de performance énergétique qui classent les habitations en fonction de leur consommation énergétique, les campagnes de communication et des outils mixtes comme le Plan National d'Allocation des Quotas qui attribue des quotas d'émissions de CO₂ aux entreprises sont autant de mesures nationales qui permettent de lutter contre le changement climatique. Des actions locales existent également. Citons le plan ISOLTO mis en place dans le Nord – Pas de Calais visant à améliorer l'efficacité énergétique des habitations en permettant aux populations de financer les travaux d'isolation de toitures grâce à un prêt à taux zéro.

A l'échelle mondiale, beaucoup sont conscients que les efforts mis en place par le protocole de Kyoto sont insuffisants pour permettre une stabilisation de la température d'ici 2050. C'est pourquoi les pays signataires se sont fixés de limiter à 2 degrés la croissance de la température en stabilisant vers 450 ppm équivalent CO₂ la concentration atmosphérique des gaz à effet de serre. Ceci suppose de diviser les émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050 par deux pour le monde et par quatre pour les pays développés, ce que les scientifiques ne savent pas faire pour le moment d'après Mathieu Wellhoff qui est intervenu au nom de l'ADEME Nationale lors de la conférence intitulée « comprendre et agir » du 29 Mai 2006 à Douai.

Ainsi un groupe de réflexion a-t-il été créé pour trouver un scénario français. Un groupe dirigé par M. Prévot, Ingénieur général des Mines, adopte l'option nucléaire tandis que le rapport NégaWatt prône la réduction drastique de la consommation et le développement des énergies renouvelables. A titre informatif, le terme « NégaWatt » fait référence au kiloWatt électrique. Certains pays envisagent de donner au terme « production de NégaWatt » une définition économique concrète. Des sociétés pourraient par exemple proposer à leurs clients de faire des économies d'énergie qui seraient facturées. Quant au rapport MIES, il encourage les ruptures technologiques, comme le développement du vecteur hydrogène ou la séquestration du CO₂. Le stockage de l'électricité pourrait également permettre une diffusion du véhicule électrique dans les transports.

L'ensemble de ces actions indique que la prise de conscience quant à la nécessité d'agir est bien réelle. Des solutions existent pour réduire les émissions de gaz à effet de serre même si cela engendre parfois des coûts élevés et il est possible d'avoir des vies agréables avec des niveaux de consommation d'énergie moindres selon Pierre Radanne, consultant et ancien président de l'ADEME.

Nous terminerons ce paragraphe en soulevant le problème des Etats-Unis n'ayant pas ratifié le protocole de Kyoto. Il faut comprendre qu'il existe actuellement deux types de pays, deux mondes d'après Pierre Radanne, présentés en figure 34.

Les « pays vides » : Les Etats-Unis, le Canada, l'Australie et la Russie

- Une densité de population faible, une forte croissance démographique
- D'importantes ressources énergétiques
- Des pays non touchés par les chocs pétroliers

→ Une première confrontation aux limites

≠

Les « pays pleins » : l'Europe, le Japon et bientôt la Chine et l'Inde

- Industrialisation ancienne, forte densité, ressources énergétiques manquantes
- Contraints à l'efficacité énergétique par les chocs pétroliers
- Des relances de politiques déjà expérimentées

→ Acceptation du changement climatique

Figure 34 : Deux mondes, des visions énergétiques différentes, d'après une conférence de Pierre Radanne sur le changement climatique, 2006

La compréhension des intérêts énergétiques de chacun des deux groupes nous permet de mieux appréhender les réticences de certains pays face au protocole de Kyoto. Pour autant, il faut savoir que ces pays ont des initiatives locales fortement développées, comme en Californie par exemple. Ainsi serait-il erroné de parler d'immobilité américaine. Le site Internet de Greenpeace mentionne par exemple la loi concernant la réduction des gaz à effet de serre liés au secteur de l'automobile. Il s'agit du texte le plus strict au monde puisque l'ensemble des nouveaux modèles 2009 de véhicules utilitaires, d'automobiles et de camionnettes, vendus devra réduire ses émissions de GES de 22 % en moyenne d'ici 2012 et de 30 % d'ici 2016.

2. Les conséquences du changement climatique

a. Les indicateurs climatiques

Le réchauffement climatique

Au cours du XX^{ème} siècle, la température à la surface de la terre a augmenté de 0.6 ± 0.2 °C avec des pics de chaleur entre 1910-1945 et 1976-2000, les années 1990 étant les plus chaudes d'après le troisième rapport d'évaluation du GIEC.

En outre, la température de surface de l'hémisphère Nord a été plus importante au cours du XX^{ème} siècle qu'au cours de tout autre siècle du dernier millénaire. Météo-France a également constaté que le réchauffement était plus important dans le Sud que dans le Nord tandis que la Figure 35 indique que l'augmentation des températures minimales est plus nette que celle des températures maximales au XX^{ème} siècle.

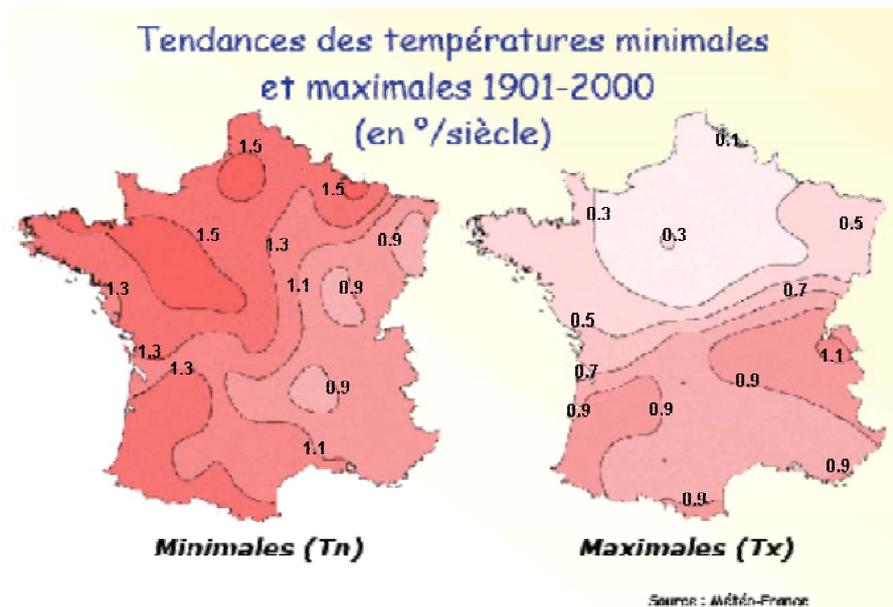


Figure 35 : Evaluation du réchauffement climatique en France, source ISPL (Institut Pierre Simon Laplace)

Des simulations ont été effectuées par le GIEC pour comprendre les raisons des changements mesurés.

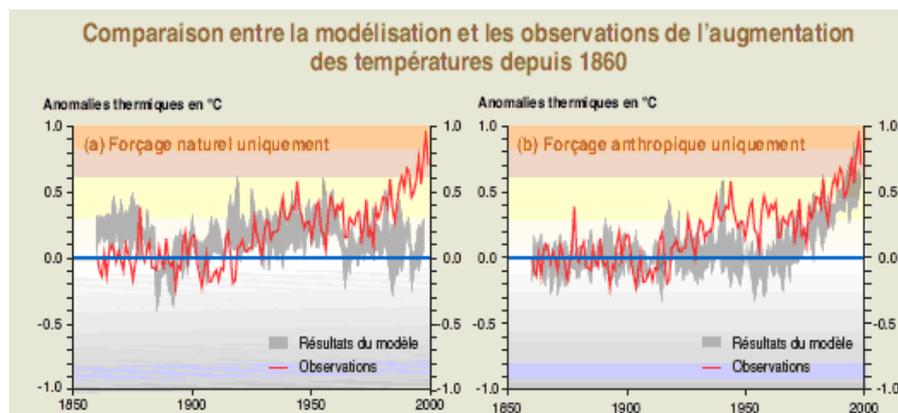


Figure 36 : Simulation des variations des températures terrestres comparées aux données mesurées, source TRE GIEC, 2001

La Figure 36 nous montre que les changements climatiques ne peuvent s'expliquer par le seul forçage naturel. Les éruptions volcaniques et les variations du rayonnement solaire ne suffisent pas pour comprendre l'augmentation de la température constatée à partir de la seconde moitié du XX^{ème} siècle. Une partie du réchauffement est imputable aux activités humaines.

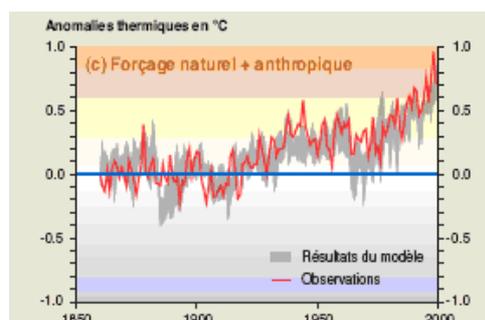


Figure 37 : Source GIEC, 2001

Le modèle simulé est d'ailleurs bien meilleur en prenant en compte les facteurs naturels et anthropiques, comme l'illustre la figure 37.

Les émissions de gaz à effet de serre et d'aérosols ont atteint des records au cours des années 1990.

De 1750 à 2000, les concentrations en CO₂ ont augmenté de 31 ± 4%. Les trois quarts de cette augmentation ont été dus à la combustion de combustibles fossiles, passant de 5.4 Gt de carbone par an dans les années 1980 à 6.3 Gt de carbone par an dans les années 1990. Le reste est imputable au changement d'affectation des terres, en particulier au déboisement.

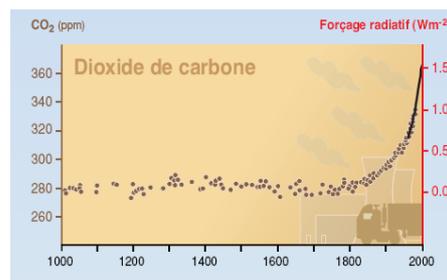


Figure 38 : Evolution de la concentration atmosphérique mondiale en CO₂, source GIEC, 2001

Les concentrations en méthane CH₄ ont également augmenté de 151 ± 25% de 1000 à 2000, les émissions pouvant provenir de l'utilisation de l'énergie, des cultures de riz, de l'élevage, des décharges. Les émissions de monoxyde de carbone CO ont aussi été identifiées comme une cause possible de l'augmentation de la concentration en méthane.

Enfin, d'autres gaz à effet de serre comme le protoxyde d'azote N₂O, l'ozone troposphérique ou les Hydrofluorocarbures HFC, les Perfluorocarbures PFC et les Hexafluorures de soufre SF₆ sont également responsables d'un forçage radiatif positif depuis l'époque préindustrielle.

Face à ces observations, le GIEC a étudié dans le troisième rapport d'évaluation l'influence des facteurs externes sur le climat, présentée en figure 39 :

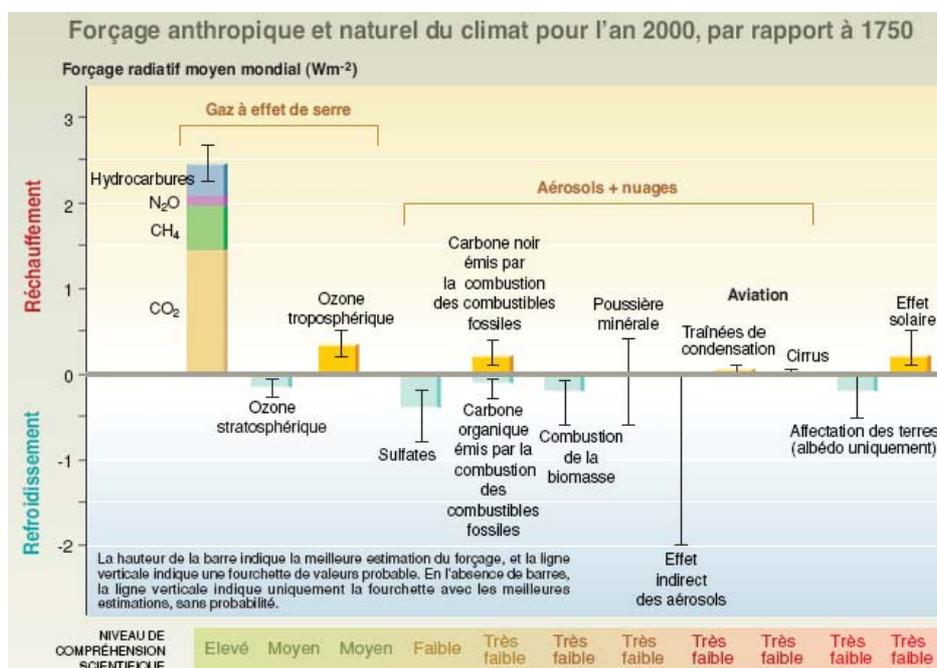


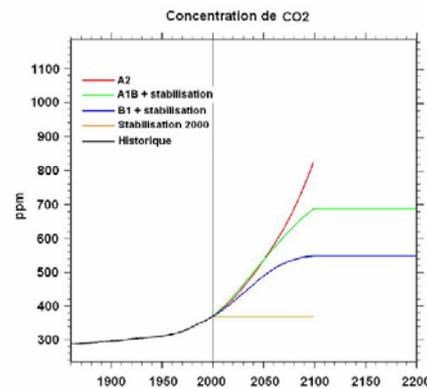
Figure 39 : Influence des différents facteurs responsables des modifications du bilan thermique mondial, source GIEC, 2001.

L'analyse de ce graphique montre qu'à l'exception du rayonnement solaire, chaque facteur est plus ou moins lié à une activité humaine. De plus, la contribution de certains facteurs, représentée par des barres verticales, à la modification du bilan thermique mondial n'a pas pu être clairement définie. Seules des fourchettes d'estimations ont été établies. Ainsi, si un tel graphique nous

permet d'estimer la réponse de tel ou tel facteur sur le réchauffement ou le refroidissement du climat mondial, il est difficile de prévoir exactement l'ampleur du réchauffement climatique par région pour la prochaine décennie. Selon le troisième rapport du GIEC, la température annuelle moyenne mondiale pourrait s'élever de 1.4 à 5.8°C d'ici 2100, le tiers voire la moitié de l'écart venant des incertitudes sur les fonctionnements biogéophysiques planétaires, le reste dépendant des politiques qui seront adoptées.

Différents scénarii ont alors été mis en place. Dans le scénario A2 rien n'est fait tandis que dans le scénario B1, des mesures draconiennes sont prises pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. Des états intermédiaires sont également envisagés.

Figure 40 : Scénarii étudiés par l'IPSL et Météo-France. Des profils de température sont ensuite établis en fonction de la concentration en CO₂ présente dans l'atmosphère, source Site Cité de la Science.



Une augmentation des précipitations

Au cours du XX^{ème} siècle les précipitations ont vraisemblablement, d'après le troisième rapport du GIEC de 2001, augmenté de 5 à 10 % sur la plupart des moyennes et hautes latitudes des continents de l'hémisphère Nord, contrairement aux zones subtropicales dans lesquelles les précipitations ont diminué de 3 % en moyenne. Ces variations sont principalement dues à la modification de la circulation atmosphérique, à un cycle hydrologique plus actif et à un accroissement de la capacité de rétention d'eau dans l'atmosphère. L'Oscillation Australe El Niño, plus fréquente, plus longue et plus intense depuis les années 1970 peut également expliquer les variations régionales de températures et de précipitations dans les régions tropicales, subtropicales et à certaines latitudes moyennes. Il est cependant à noter que le réchauffement climatique n'entraînerait pas forcément une plus grande fréquence du phénomène El Niño.

Toutefois, l'absence de tendance réelle au cours du XX^{ème} siècle dans les zones de sécheresse ou celles touchées par de fortes inondations ainsi que les grandes différences régionales en matière de précipitations laissent penser qu'il s'agit plus d'une variabilité inter et multidécennale.

Les événements météorologiques extrêmes

Selon le GIEC un événement météorologique extrême est un événement météorologique rare, qui d'après les statistiques, a une faible fréquence en un lieu donné. Nous pouvons citer par exemple la tempête de 1999, la canicule de l'été 2003, certains orages sévères ou cyclones tropicaux. Le colloque de l'ONERC en 2003 a montré que les avis des scientifiques différaient sur la question des évolutions possibles des événements météorologiques extrêmes avec le réchauffement climatique. En effet, la relation entre l'aggravation des événements extrêmes de longue durée et de grande étendue, comme les inondations ou les canicules, semble maintenant établie. Néanmoins pour des événements plus ponctuels

comme les tempêtes ou les cyclones, les scientifiques semblent plus dubitatifs. L'aggravation possible avec le réchauffement climatique est probable mais reste encore incertaine.

Si de nombreuses études et analyses ont été effectuées pour évaluer l'impact des changements climatiques, il reste difficile, notamment du fait de l'insuffisance des données, de conclure quant à une éventuelle modification de la fréquence et de l'intensité des cyclones tropicaux et fortes tempêtes aux latitudes moyennes. La figure 41 montre par exemple que l'on ne constate pas d'évolution significative du nombre annuel de tempêtes en France entre 1950 et 1999.

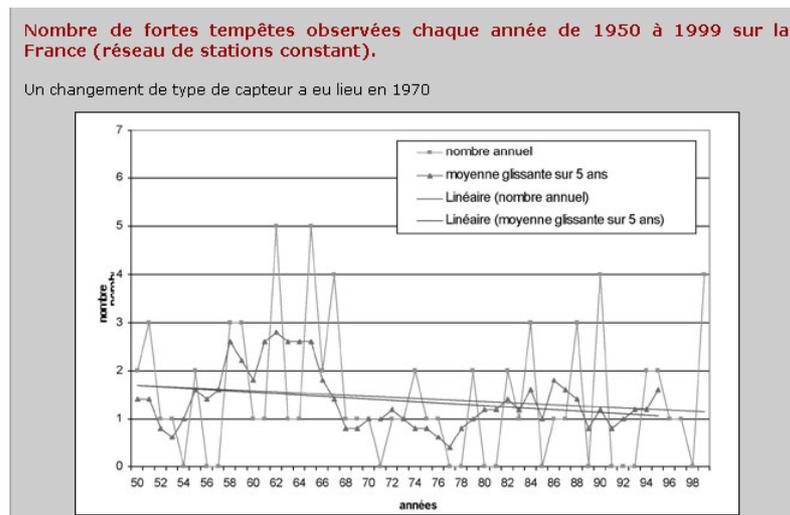


Figure 41 : Evolution du nombre de tempêtes en France entre 1950 et 1999, source site Internet CNRS

b. Les indicateurs biologiques et physiques

Quelques répercussions sur les systèmes biologiques

Globalement, d'après le troisième rapport du GIEC, les changements climatiques devraient avoir un impact négatif sur la santé des individus, notamment pour les populations des régions tropicales et subtropicales à faibles revenus. Le stress dû à la chaleur, la modification des vecteurs de maladies comme les moustiques, une qualité moindre de certaines denrées alimentaires comme la diminution de la teneur protéique de quelques céréales, peuvent fragiliser les populations.



Figure 42 : Les tiques sont vecteurs de la maladie de la Lyme

La vulnérabilité des personnes dépend bien sûr des infrastructures et des politiques d'adaptation mises en place. A titre d'exemple, le phénomène de retrait-gonflement des argiles, qui pourrait s'accroître en raison notamment d'un plus grand nombre de sécheresses probables, peut être moins tragique si les habitations respectent certaines mesures préventives simples et relativement peu coûteuses comme le fait d'éviter de planter des arbres trop près de la maison ou de réaliser un trottoir ou une terrasse autour du logement, de façon à limiter l'évaporation à proximité immédiate de l'habitation.

Les écosystèmes seront également perturbés par les inondations, la sécheresse entraînant des incendies plus nombreux, les invasions parasitaires et le blanchissement voire la disparition des coraux. A cela s'ajoutent les modifications

dues aux glissements de terrain, au changement d'affectation des terres, à la pollution grandissante.



Figure 43 : Le blanchissement des coraux, une des conséquences du changement climatique

L'augmentation du CO₂ atmosphérique entraînera d'une part une amélioration de la productivité des végétaux mais d'autre part une accumulation du carbone dans les sols et les végétaux. Le type de végétal, la région dans laquelle il se situe et le scénario climatique détermineront si les effets du CO₂ sont plutôt positifs ou négatifs pour la plante. Quoiqu'il en soit les scientifiques pensent que les puits de carbone que constituent les écosystèmes risquent de diminuer à la fin du XXI^{ème} siècle suite au réchauffement climatique. Certaines forêts constituées d'une seule catégorie d'arbres ne correspondant plus aux conditions climatiques locales et présentant un faible pouvoir d'adaptation devraient disparaître.

Enfin, les changements climatiques peuvent contribuer à la diminution de certaines espèces comme les ours polaires dans les régions arctiques suite à la fonte des glaces. Certaines espèces migreront également probablement vers les pôles et en altitude.

L'élévation du niveau de la mer, la fonte des glaces et du pergélisol

L'une des conséquences du réchauffement climatique est l'élévation du niveau de la mer, du fait notamment de la dilatation thermique et de la régression de la glace terrestre. Cette élévation serait globalement de 1 à 2 mm au cours du XX^{ème} siècle, donc relativement peu significative. Elle pourrait toutefois s'intensifier dans les siècles à venir, notamment en raison du réchauffement amorcé et attendu puisque la masse de l'inlandsis groenlandais devrait par exemple diminuer au cours du XXI^{ème} siècle.

La couverture neigeuse et la superficie des glaces ont quant à elles diminué au cours du XX^{ème} siècle. On note un retrait de 10 % dans l'hémisphère Nord de la superficie de la couverture neigeuse, une diminution de la durée annuelle du gel des lacs et des fleuves aux latitudes hautes et moyennes de l'Hémisphère Nord, la fonte des glaciers montagneux dans les régions non polaires ainsi qu'une diminution de 40 % de l'épaisseur de la glace arctique marine pendant la fin de l'été et le début de l'automne entre 1950 et 2000.

Enfin, le réchauffement climatique entraîne également la fonte progressive du pergélisol entraînant une déstabilisation du sol, perturbant les cycles hydrologiques souterrains et de surface ainsi que les écosystèmes et modifiant le cycle du carbone.

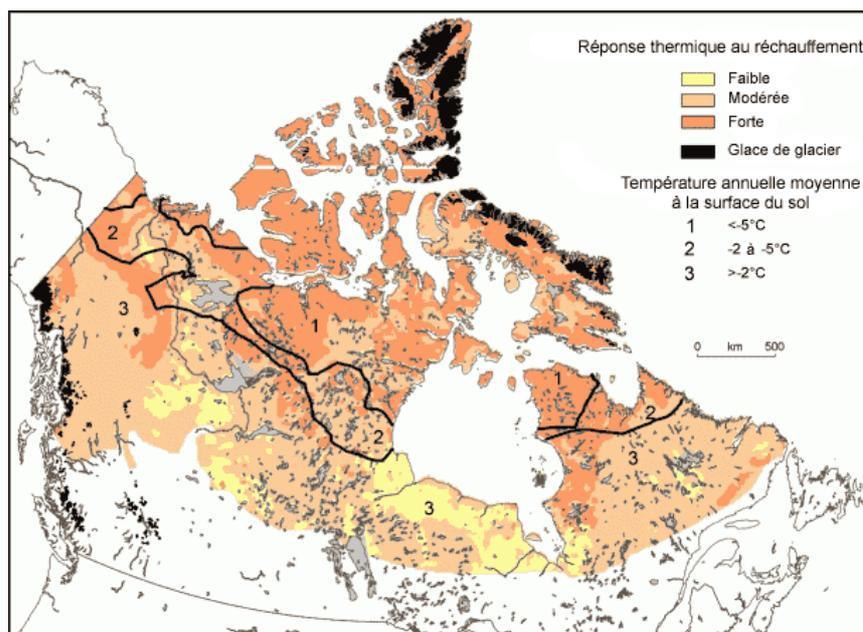


Figure 44 : Exemple du pergélisol du Canada, étude de la réponse thermique au réchauffement climatique, tiré de Smith et Burgess, 1998, source <http://www.socc.ca/>

Il est toutefois à noter que le changement climatique n'est pas général. Certaines régions n'ont pas connu de modifications climatiques au cours du XX^{ème} siècle, en particulier certaines zones océaniques de l'Hémisphère Sud et certains endroits de l'Antarctique. La superficie de la glace marine Antarctique a par exemple augmenté depuis 1978 selon le troisième rapport du GIEC.

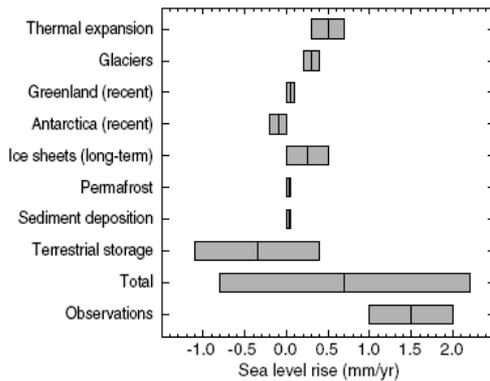
c. Les changements climatiques : effets positifs ou négatifs ?

Cela dépend bien évidemment des intérêts de chacun. En effet, la fonte des glaces marines dans l'Arctique peut entraîner la disparition progressive des ours polaires et des phoques, privant les habitants d'une source d'alimentation non négligeable. Néanmoins la diminution de la couverture neigeuse a pour conséquence l'ouverture de nouvelles voies de navigation et crée des possibilités d'exploration pétrolière et de forage en mer. De même, si le réchauffement climatique accroît le stress lié à la chaleur, il diminue les pathologies et les mortalités dues au froid. Enfin, pour ce qui est de l'eau, les changements climatiques pourraient engendrer des pénuries et une dégradation de la qualité de l'eau dans certaines régions en raison d'une réduction de l'écoulement fluvial et de l'alimentation des nappes souterraines, ce qui est totalement l'opposé pour d'autres régions.

Si les politiques mondiales sont essentielles pour tenter de réduire les effets anthropiques du réchauffement climatique, ces quelques exemples nous montrent bien la nécessité d'adapter des politiques à un niveau plus local qui prennent en compte les priorités de chaque pays, voire de chaque région. C'est dans cette optique que la Direction Régionale de l'Environnement Nord Pas-de-Calais va approfondir la question des risques naturels littoraux suite aux changements climatiques, en particulier les risques de submersion marine et l'érosion côtière qui pourraient s'intensifier dans les années à venir.

3. Comprendre l'impact des changements climatiques sur les zones littorales

L'élévation du niveau des mers de ces dernières années et les exemples des départements d'outre-mer soumis à de plus en plus de phénomènes de submersion, à l'accélération de l'érosion des côtes, à l'intrusion d'eau de mer dans les nappes d'eau douce, à la multiplication des cyclones et des tempêtes laissent à penser que les évolutions climatiques doivent être prises en compte dans les politiques d'aménagement du littoral.



pleines mers.

Figure 45 : Facteurs responsables de l'élévation du niveau de la mer entre 1910 et 1990.

Source GIEC 2001

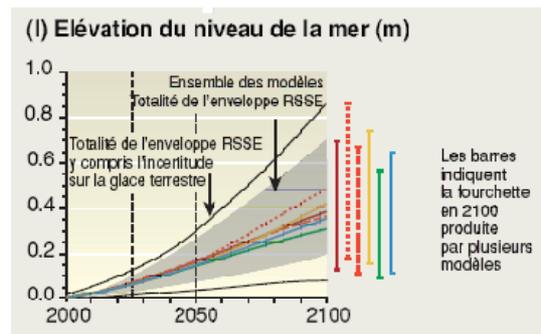
Principalement due à la fonte des glaces et à la dilatation thermique, l'élévation du niveau des mers provoque un recul de la ligne de rivage, la mer envahissant progressivement les terres. Une élévation du niveau moyen des mers de 1 cm correspondrait à un recul d'un mètre. Il est également important de noter que cette élévation n'implique ni les mêmes hausses sur l'ensemble du littoral ni la même évolution des hauteurs d'eau des basses et

Selon les différents scénarii d'évolution des concentrations en gaz à effet de serre et en aérosols, le niveau moyen de la mer pourrait augmenter d'après le troisième rapport du GIEC de 9 à 88 cm entre 1990 et 2100, avec une valeur moyenne pondérée de 47 cm. Cette augmentation ne serait pas uniforme sur l'ensemble des régions et serait plus marquée dans l'hémisphère nord que dans l'hémisphère sud.

Figure 46 :

Dans ces scénarii, les politiques climatiques ne sont pas prises en compte. Le forçage radiatif intégré dans les différents modèles du Rapport Spécial sur les Scénarii d'Emission (RSSE) génère une augmentation de la température et du niveau des mers.

Source GIEC 2001



Outre l'élévation du niveau de la mer, les changements climatiques engendreraient également une accélération de la circulation atmosphérique vraisemblablement à l'origine d'un nombre plus important de tempêtes de plus forte intensité, provoquant ainsi des surcotes lorsque les conditions basse de la pression atmosphérique, vent violent et houle de forte amplitude sont réunies. Ces propos ne font toutefois pas l'unanimité dans la communauté scientifique et sont donc à nuancer.

L'augmentation probable de l'intensité et de la fréquence des événements météorologiques extrêmes aurait, en outre, des effets sur l'amplitude et la

propagation de la houle, sur la fréquence et l'amplitude des surcotes ainsi que sur l'intensité et la direction des courants, provoquant alors une accentuation de l'érosion des plages et des falaises et une extension des submersions marines.

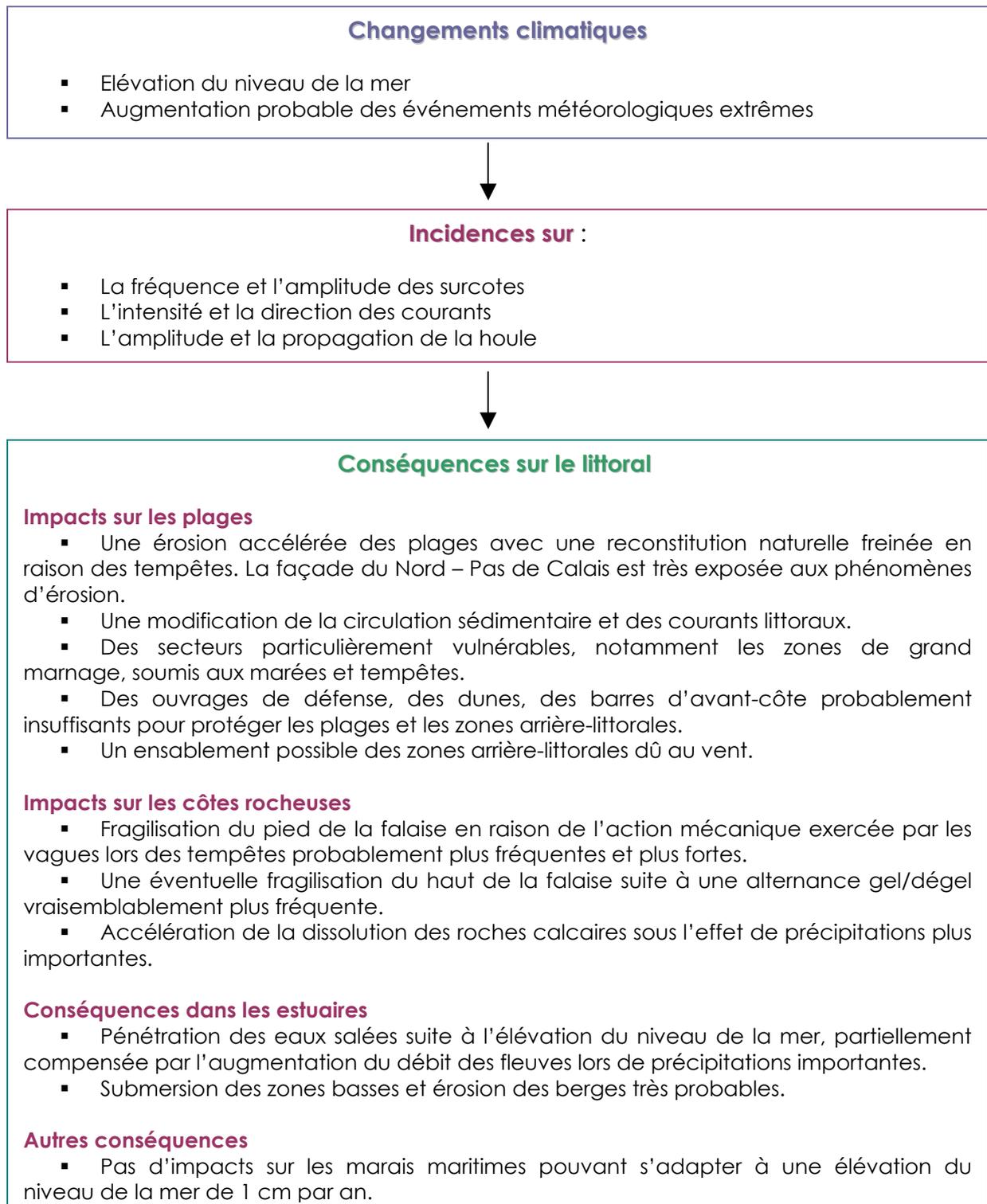


Figure 47 : Schéma récapitulatif des conséquences des changements climatiques sur le littoral

B. Essai de régionalisation du changement climatique en France et dans la région Nord – Pas de Calais à l'horizon 2100

Si les estimations en terme de réchauffement climatique sont bien connues aujourd'hui à l'échelle mondiale, de grandes incertitudes subsistent à l'échelle régionale. Il est en effet plus difficile de disposer d'informations à l'échelle locale qu'à l'échelle globale. Les paramètres à prendre en compte ne sont pas non plus les mêmes car idéalement il faudrait considérer dans les modèles non seulement les conditions climatologiques de chaque secteur géographique mais aussi d'autres indicateurs, comme le taux de pollution, la présence ou non de relief ou encore l'altitude. Tout dépend bien sûr de l'échelle à laquelle on se place.

La France est un territoire où l'impact du changement climatique n'est pas facile à évaluer car elle se situe à l'interface entre quatre zones géographiques contrastées – une zone méditerranéenne, une zone alpine, une zone semi-continentale et une zone océanique – et possède une grande variété de sols.

1. Les données françaises : évolution de la température et des précipitations à l'horizon 2100

Dans une volonté de transparence et de communication au public des principaux résultats des études portant sur la régionalisation du changement climatique, différents groupes projets comme celui commandé par le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (MEDD) dans le cadre du programme « Gestion et Impacts du Changement Climatique » (GICC), le projet « Impact sur la Fréquence des Extrêmes » (IMFREX), ou l'Observatoire National des Effets du Réchauffement Climatique (ONERC) ont publié leurs principales conclusions.

Il existe actuellement deux modèles principaux de simulations. ARPEGE Climat a été développé par Météo-France tandis que le modèle LMDZ a été conçu à Paris en 2003 et est actuellement utilisé dans le modèle couplé global à l'Institut Pierre Simon Laplace (IPSL). Le modèle ARPEGE-climat de Météo-France offre une résolution de 60 km sur la France, ce qui permet de tenir compte des principaux massifs montagneux. Trois simulations ont été effectuées sur les 40 dernières années. Il est donc possible d'évaluer avec une bonne précision statistique les températures et les précipitations et ainsi d'estimer les contrastes géographiques et saisonniers.

Les simulations sur les précipitations et les températures pour les années 2070 – 2099 présentées dans les paragraphes suivants ont été effectuées avec les hypothèses du scénario A2 du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC).

a. Les températures

Évolution de la température moyenne en été
en France de 1860 à 2100
(modèle de l'IPSL, scénario tendanciel)

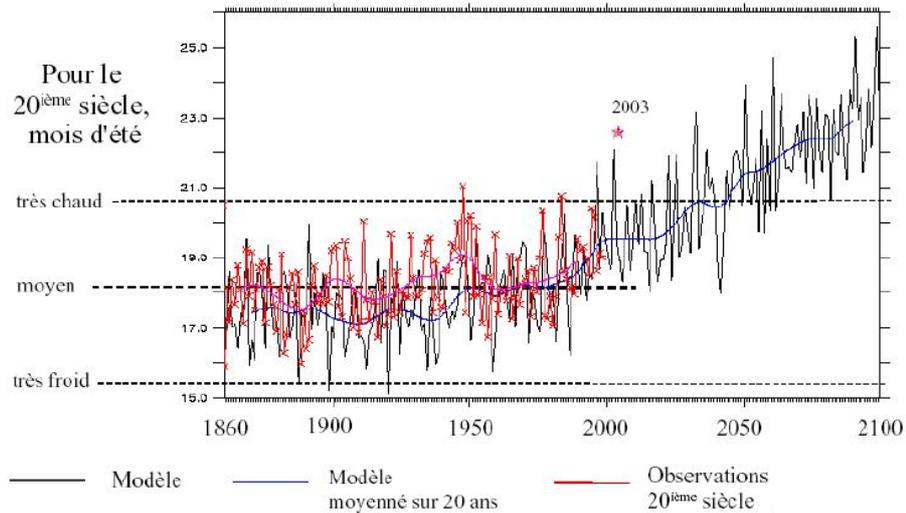


Figure 48 : Simulation de la température moyenne en été en France de 1860 à 2100, calculée par le modèle climatique à l'Institut Pierre-Simon Laplace pour le scénario A2 du GIEC pour lequel rien n'est fait pour réduire les émissions des gaz à effet de serre, Source site Internet Greenpeace

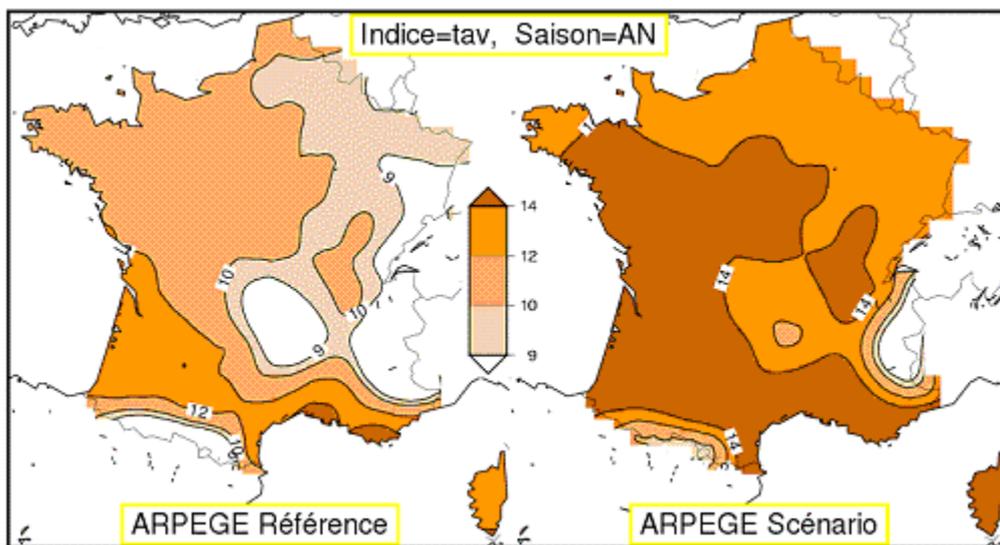


Figure 49 : Evolution de la température moyenne annuelle prévue à l'horizon 2100 selon le modèle ARPEGE de Météo-France. L'indice *tav* signifie température moyenne en °C

Source site Internet IMFREX

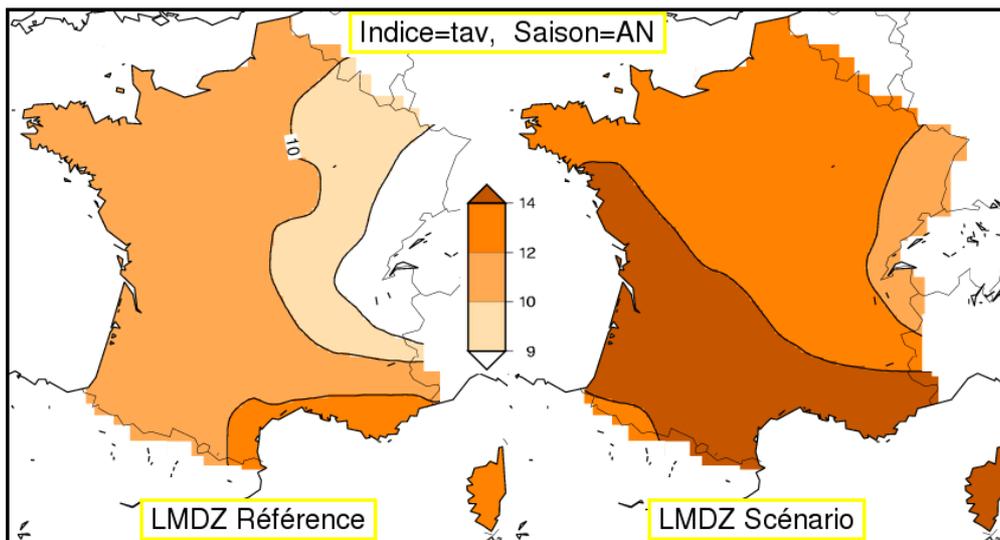


Figure 50 : Evolution de la température moyenne annuelle prévue à l'horizon 2100 selon le modèle LMDZ de l'IPSL. L'indice *tav* signifie température moyenne en °C, source site Internet IMFREX

Les deux modèles ayant été calés différemment, il semble normal que les résultats obtenus ne soient pas exactement identiques. Ils sont par contre similaires pour la région Nord – Pas de Calais en terme de précipitations moyennes annuelles.

Les différentes observations des simulations effectuées semblent indiquer que le modèle de Météo-France s'avère plus fin que le présent modèle de l'IPSL. La fiabilité du modèle de Météo-France est d'ailleurs confirmée par M. Dequé du Centre National Météorologique de Météo-France. En comparant les simulations réalisées avec les observations des cinquante dernières années, le modèle est assez fidèle dans les plages moyennes. Les fréquences des hautes températures sont assez bien restituées, à l'image des précipitations abondantes en hiver. Il existe néanmoins quelques biais en terme d'estimation des vagues de froid et des amplitudes des précipitations abondantes en été. Le modèle sur-estime par contre le nombre de jours de pluies faibles en été. Ces biais peuvent toutefois être corrigés en considérant que la valeur obtenue n'a de sens que par rapport à une série de valeurs. Les températures minimales diurnes simulées de -5°C sont par exemple rares proches de Paris mais correspondent en terme de fréquence aux minimales de -13°C observées à Orly.

Nous présenterons donc principalement les modèles de Météo-France dans cette synthèse mais les commentaires prendront en compte les résultats obtenus par l'IPSL.

Globalement, les différents modèles prévoient une augmentation de la température atmosphérique moyenne annuelle de 1.5°C à 6°C pour 2100 selon le GIEC avec des différences selon les régions et les saisons. Météo-France prévoit une augmentation de la température moyenne de 2 à 4°C en hiver et de 4 à 7°C en été à échéance 2100. Le réchauffement hivernal serait donc moins marqué que le réchauffement estival. Ce réchauffement ne devrait toutefois être réellement perceptible qu'à partir des années 2050 car jusqu'à cette date la variabilité interannuelle devrait masquer cette tendance, d'après Michel Déqué.

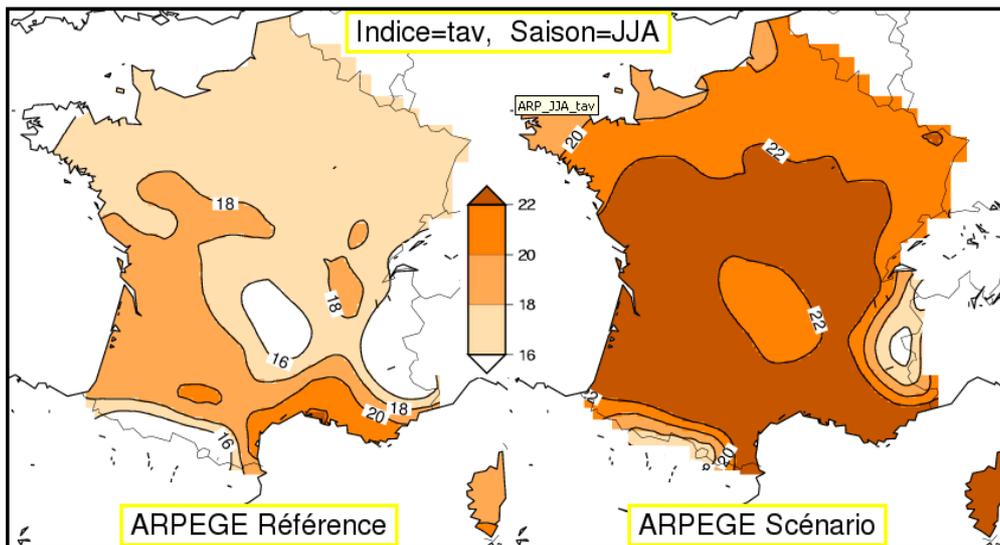


Figure 51 : Evolution de la température moyenne en été (juin – juillet – août) selon le modèle ARPEGE de Météo-France, source site Internet IMFREX

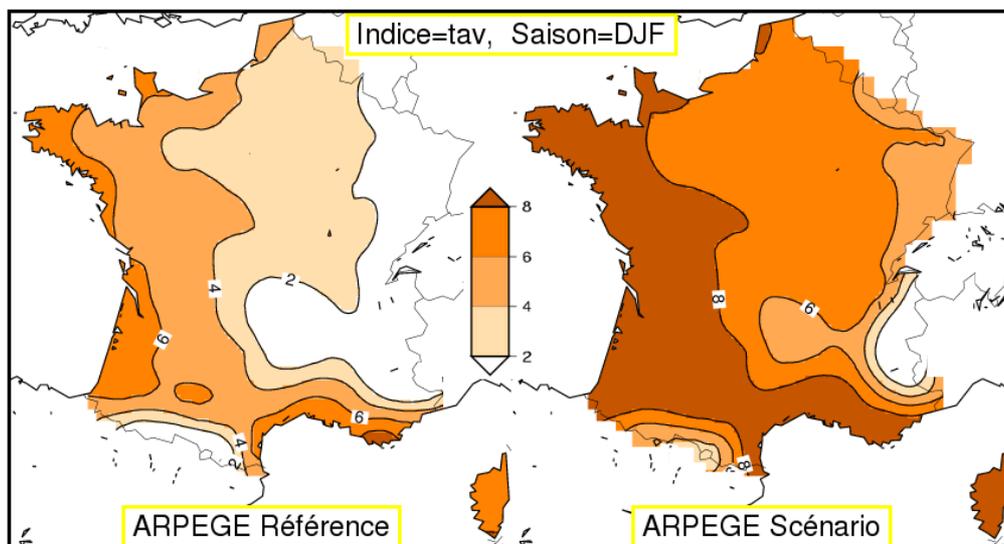


Figure 52 : Evolution de la température moyenne en hiver (décembre – janvier – février) selon le modèle ARPEGE de Météo-France, source site Internet IMFREX

L'augmentation de la température serait particulièrement importante en été et se ferait tout d'abord ressentir dans le sud à l'horizon 2040 avant de toucher le Nord dans les années 2070.

D'après les modèles ARPEGE et LMDZ, le Nord – Pas de Calais devrait passer d'une température moyenne comprise entre 16 et 18°C à une température moyenne comprise entre 18 et 22°C en été à l'horizon 2100. En hiver, la température moyenne, aujourd'hui comprise entre 2 et 6 degrés devrait dépasser les 6 degrés d'ici la fin du siècle.

L'Union Européenne, dans le cadre du projet Energie, Environnement et Développement Durable de l'Union Européenne, a lancé en 2001 le projet

PRUDENCE qui s'est achevé en 2004. Il a permis d'estimer le réchauffement prévu pour la région Nord – Pas de Calais entre 2070 et 2100.

Températures en °C (annuel)	Decembre – Janvier - Février	Mars – Avril - Mai	Juin – Juillet - Août	Septembre – Octobre - Novembre
Nord				
<x> = 1.2	1.0	1.0	1.7	1.3
<s> = 0.4	0.4	0.4	0.6	0.4
Sud				
<x> = 1.3	1.0	1.0	1.9	1.4
<s> = 0.4	0.3	0.4	0.5	0.4

Tableau 4 : Résultats français obtenus en faisant une moyenne des estimations calculées par les différents modèles climatiques régionaux, source site Internet <http://prudence.dmi.dk/>

Les lignes <x> indiquent des moyennes et les lignes <s> fournissent les écarts-type

Le nombre de jours de gel devrait également diminuer en France et en particulier dans la région Nord – Pas de Calais avec néanmoins une augmentation de la fréquence des gelées tardives d'après le GIEC.

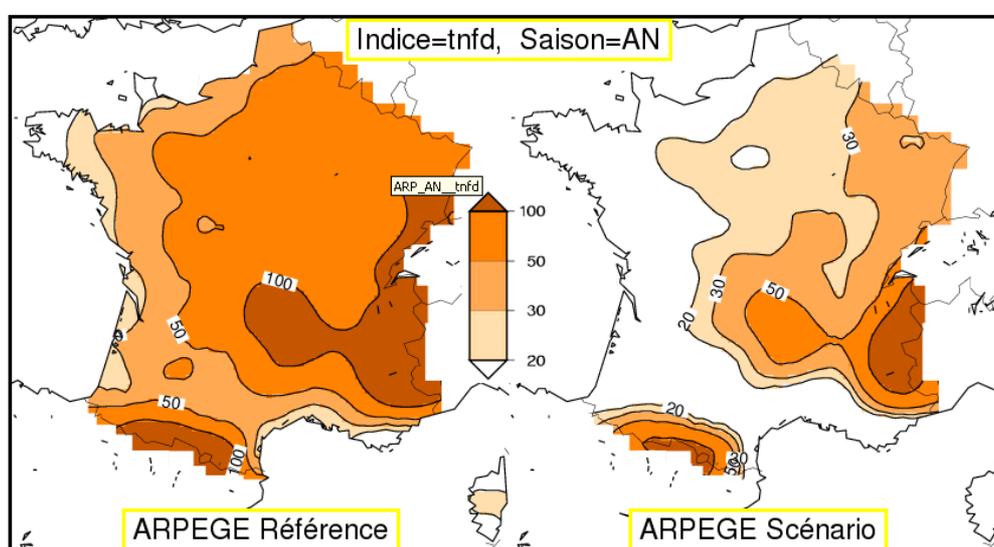


Figure 53 : Evolution du nombre de jours annuel de gel (indice tnf) d'ici la fin du siècle selon le modèle ARPEGE de Météo-France, source site Internet IMFERX

Enfin, d'après les conclusions du projet européen PRUDENCE et du projet français GICC-IMFEX, dans les hypothèses du scénario A2 du GIEC, les probabilités de dépassement du seuil de 35°C pour la température maximale quotidienne sont les suivantes :

	Lille	Rennes	Paris	Strasbourg	Lyon	Bordeaux	Toulouse	Marseille
Actuel	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01
Scénario	0,05	0,09	0,11	0,13	0,22	0,12	0,24	0,27

Tableau 5 : Probabilité d'avoir une température maximale supérieure à 35°C en été pour le climat actuel et le scénario A2 du GIEC

Source article de Michel Déqué intitulé *Les scénarios climatiques du réchauffement*

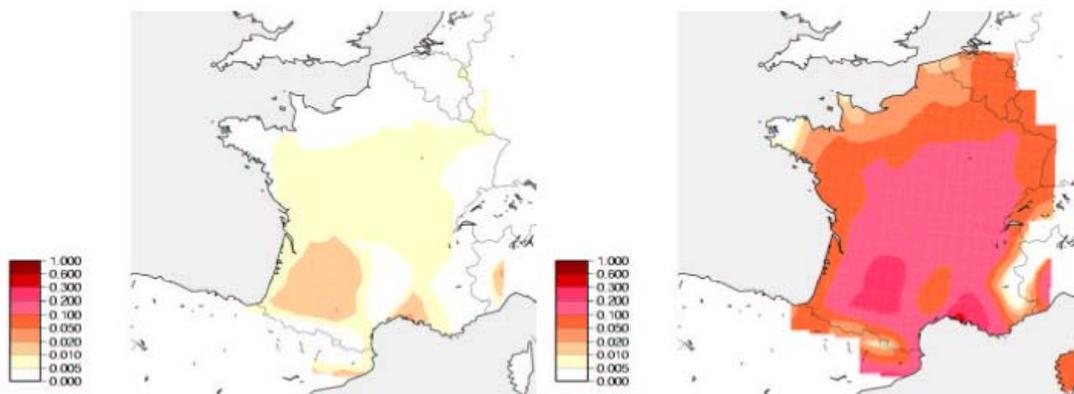


Figure 54: Probabilité d'avoir une température maximale supérieure à 35°C en été pour la période 1961-1990 à gauche et la période 2071-2100 à droite, source article de Michel Déqué intitulé *Les scénarios climatiques du réchauffement*

La plage de probabilité 0.02 – 0.05 qui couvre actuellement le sud-ouest et la Provence concernerait à la fin du siècle l'ensemble du pays tandis que ces deux régions auraient des probabilités comprises entre 0.2 et 0.3. Ainsi, à partir de 2040 aura-t-on une forte probabilité d'avoir un été sur deux aussi chaud et sec que celui de 2003.

b. Les précipitations

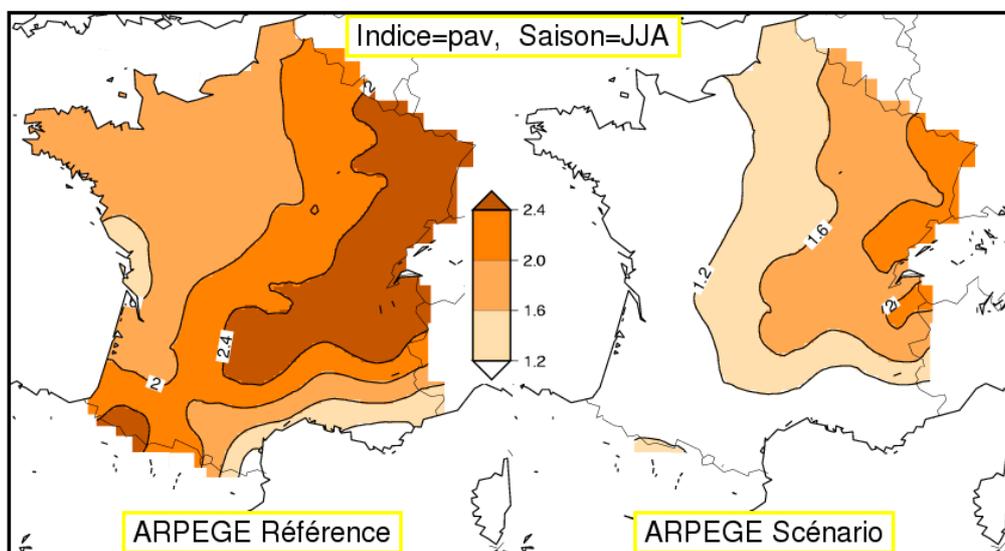


Figure 55 : Evolution des précipitations moyennes en mm/jour en été (juin – juillet – août) selon le modèle ARPEGE de Météo-France, source site Internet IMFREX

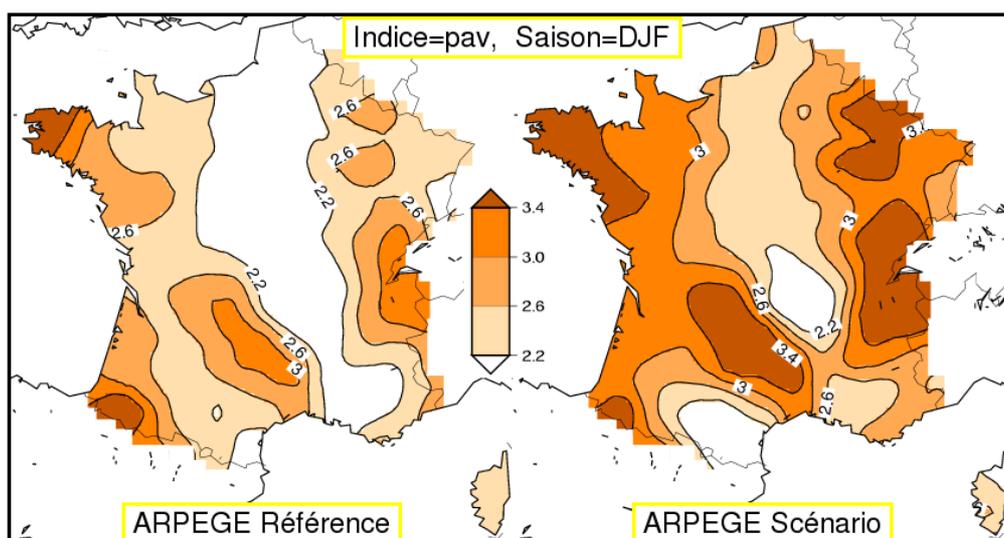


Figure 56 : Evolution des précipitations moyennes en mm/jour en hiver (décembre – janvier - février) selon le modèle ARPEGE de Météo-France, source site Internet IMFREX

Les différents modèles français prévoient une augmentation de la pluviométrie hivernale qui serait due, d'après M. Déqué, à une plus grande intensité des événements pluvieux et non à une augmentation du nombre de jours de pluie. Ce phénomène serait particulièrement accentué dans le Nord. Les autres saisons connaîtraient par contre une baisse des précipitations.

Les conclusions du projet PRUDENCE quant à la régionalisation de l'évolution des précipitations dans la région Nord – Pas de Calais entre 2070 et 2100 sont les suivantes :

Précipitation en % (annuel)	Décembre – Janvier - Février	Mars – Avril - Mai	Juin – Juillet - Août	Septembre – Octobre - Novembre
Nord				
<x> = -1.5	7.4	-1.6	-13	-2.8
<s> = 1.5	3.5	3.5	5.2	2.3
Sud				
<x> = -3.3	4.9	-3.7	-13.8	-3.6
<s> = 1.9	2.7	3.4	3.6	2

**Tableau 6 : Résultats français obtenus en faisant une moyenne des estimations calculées par les différents modèles climatiques régionaux, source site Internet <http://prudence.dmi.dk/>
Les lignes <x> indiquent des moyennes et les lignes <s> fournissent les écarts-type**

Différentes simulations ont été faites par Météo-France et l'IPSL pour déterminer le nombre de jours secs et le nombre de jours pluvieux consécutifs. Ces résultats obtenus viennent étayer les commentaires précédents, à savoir une augmentation des pluies d'hiver due vraisemblablement à une augmentation de l'intensité des pluies et une diminution des pluies d'été.

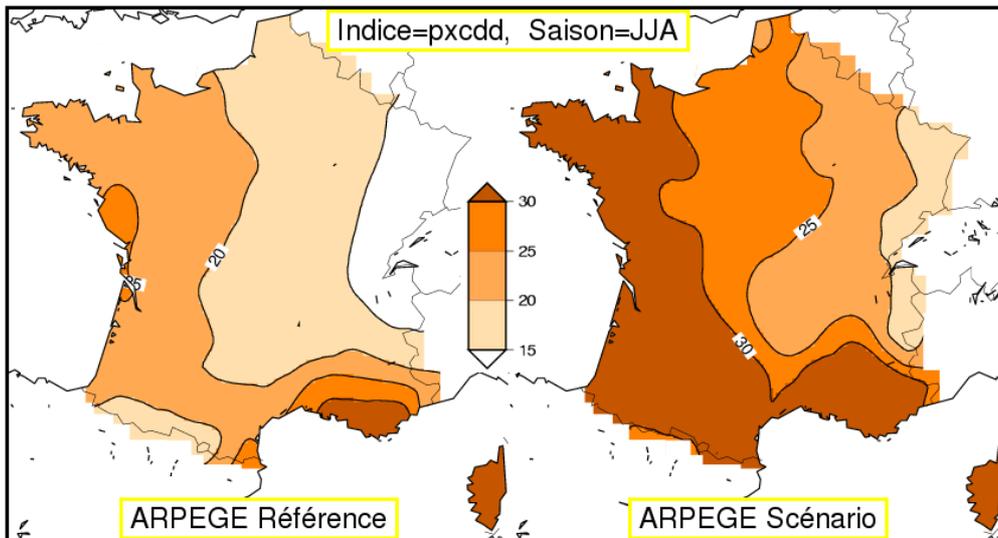


Figure 57 : Evolution du nombre maximum de jours secs consécutifs (indice pxddd) en été selon le modèle ARPEGE de Météo-France, site Internet IMFREX

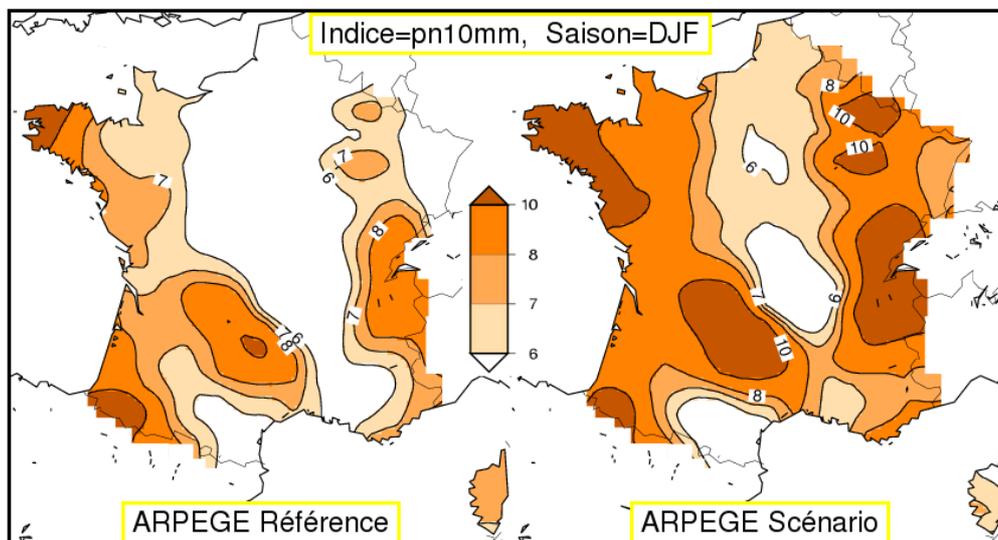


Figure 58 : Evolution du nombre de jours avec plus de 10 mm de précipitations (indice pn10mm) en hiver (décembre – janvier – février) selon le modèle ARPEGE de Météo-France
Source site Internet IMFREX

c. Les événements météorologiques extrêmes

Il est très difficile d'obtenir une évolution de ce type d'événement. Il faut, en effet, des séries de données longues et homogènes car plus le phénomène est rare, plus la série doit être longue. M. Déqué estime qu'il faut au minimum cent ans de données pour estimer la fréquence d'un événement se produisant en moyenne tous les cinq ans. De plus, au cours du siècle, les données n'ont pas été homogènes. Ainsi compte tenu de ces remarques, nous ne pourrions seulement mentionner que les froids extrêmes seront en régression tandis que les vagues de chaleur estivales en augmentation.

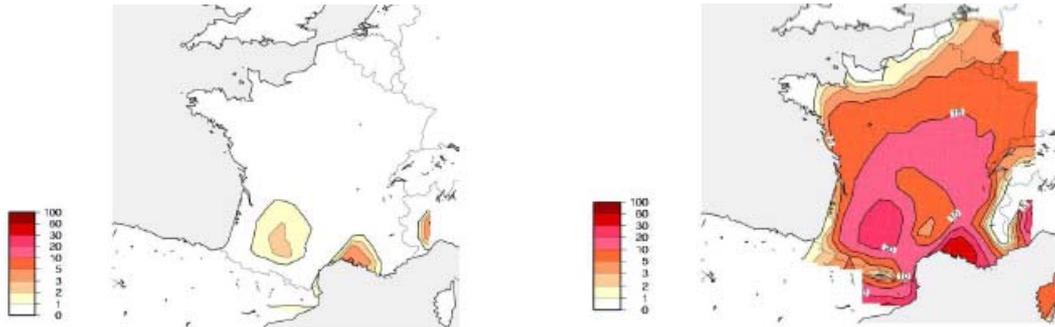


Figure 59 : Nombre moyen de jours par an avec une température maximale diurne supérieure à 30°C pendant au moins 10 jours consécutifs pour le climat présenté à gauche et à l'horizon 2100 à droite
 Source article de Michel Déqué intitulé *Impact des activités humaines sur le climat*

2. Des données européennes sur l'élévation possible du niveau moyen de la mer

Hadley Centre est un centre britannique de recherche et de prévision des conséquences à moyen terme du changement climatique. Il a publié, sous forme de cartographie le niveau d'élévation moyen des mers.

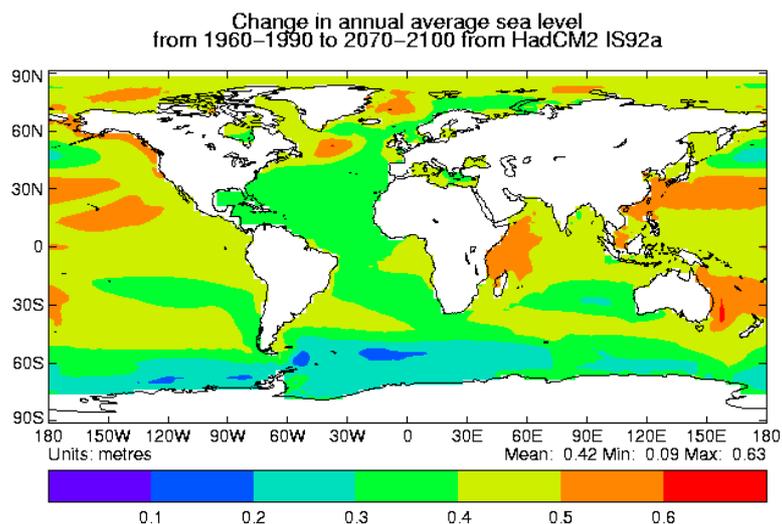


Figure 60 : Estimation de l'élévation du niveau de la mer grâce à un modèle couplé prenant en compte les circulations océaniques et atmosphériques, source <http://www.metoffice.com>.

D'après cette carte, l'élévation moyenne de la mer du Nord à l'horizon 2100 serait comprise entre 20 et 40 cm. L'équipe projet SAFECOAST regroupant des anglais, des néerlandais, des belges, des danois et des allemands s'est penchée de manière plus précise sur cette question. Des estimations concernant l'élévation du niveau moyen absolu de la mer ont été réalisées pour chaque pays membre du projet SAFECOAST.

	Paramètres	Pays-Bas	Belgique	Danemark	Allemagne	Grande-Bretagne
Estimations basses	Augmentation du niveau absolu de la mer	15 - 25 cm		13 cm		14 cm
Estimations moyennes	Augmentation du niveau absolu de la mer		22,5 cm	13 cm	55 cm	15 cm
Estimations hautes	Augmentation du niveau absolu de la mer	20 - 35 cm		13 cm		18 cm

Tableau 7 : Estimations à l'horizon 2050 réalisées par l'équipe projet SAFECOAST, source rapport intitulé *Inventory of climate scenarios applied in the North Sea Countries*, décembre 2005

L'équipe projet a par ailleurs distingué les niveaux relatifs des niveaux absolus. La mesure relative prend en compte les niveaux absolus régionaux ainsi que les mouvements tectoniques qui peuvent être à l'origine d'un soulèvement ou d'un abaissement des terres.

Ces données sont reprises de manière plus détaillée dans le chapitre 3.

Ces estimations seront influencées par les activités humaines à moyen terme et restent discutées au sein de la communauté scientifique.

3. Les recherches en cours

Les recherches se poursuivent actuellement. Elles ont pour objectif principal la réduction des incertitudes des prévisions aux échelles mondiale et régionale.

Une étude du Groupe Intergouvernemental sur l'évolution du climat est en cours de publication en 2007 tandis qu'un travail plus spécifique mené depuis 2004 par EDF, le CETMEF, l'Université de Brest et le Laboratoire de Géographie Physique (CNRS) dans le cadre du projet DISCOBOLE devrait permettre de simuler une climatologie probable à l'horizon 2100 afin de prévoir les impacts possibles sur le dimensionnement des ouvrages de protection futurs comme les digues, les brise-lames ou les perrés.

Différents programmes de recherche comme le projet CLIVAR (Variabilité et Prévisibilité du Climat) de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), le programme de gestion des impacts du changement climatique (GICC) du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (MEDD), les travaux de recherche de Météo-France ou de l'IPSL contribuent largement à la mise en place de la politique climatique. Le projet ENSEMBLES qui fait suite à l'étude PRUDENCE et qui s'intègre dans le programme « Changement Climatique et Ecosystèmes » de l'Union Européenne devrait se terminer en Août 2009. Il devrait lui aussi permettre le développement d'un système de prévision du changement climatique qui estime objectivement les incertitudes de l'échelle saisonnière à l'échelle décennale et de mettre en parallèle les résultats obtenus avec les politiques socio-économiques.

IV. Conclusion

Ce premier chapitre a permis de justifier l'intérêt d'une étude visant à caractériser l'aléa de submersion marine dans la région Nord – Pas de Calais. Les enjeux du domaine d'étude sont forts. La population est en constante augmentation tandis que les activités industrielles et touristiques ne cessent de se développer sur les littoraux. Le nombre d'espaces artificialisés est important. Pourtant le littoral est un espace fragile et le trait de côte intrinsèquement mobile. Des facteurs humains, météorologiques et marins interagissent de manière complexe et contribuent à son évolution qui devrait s'accroître en raison du changement climatique.

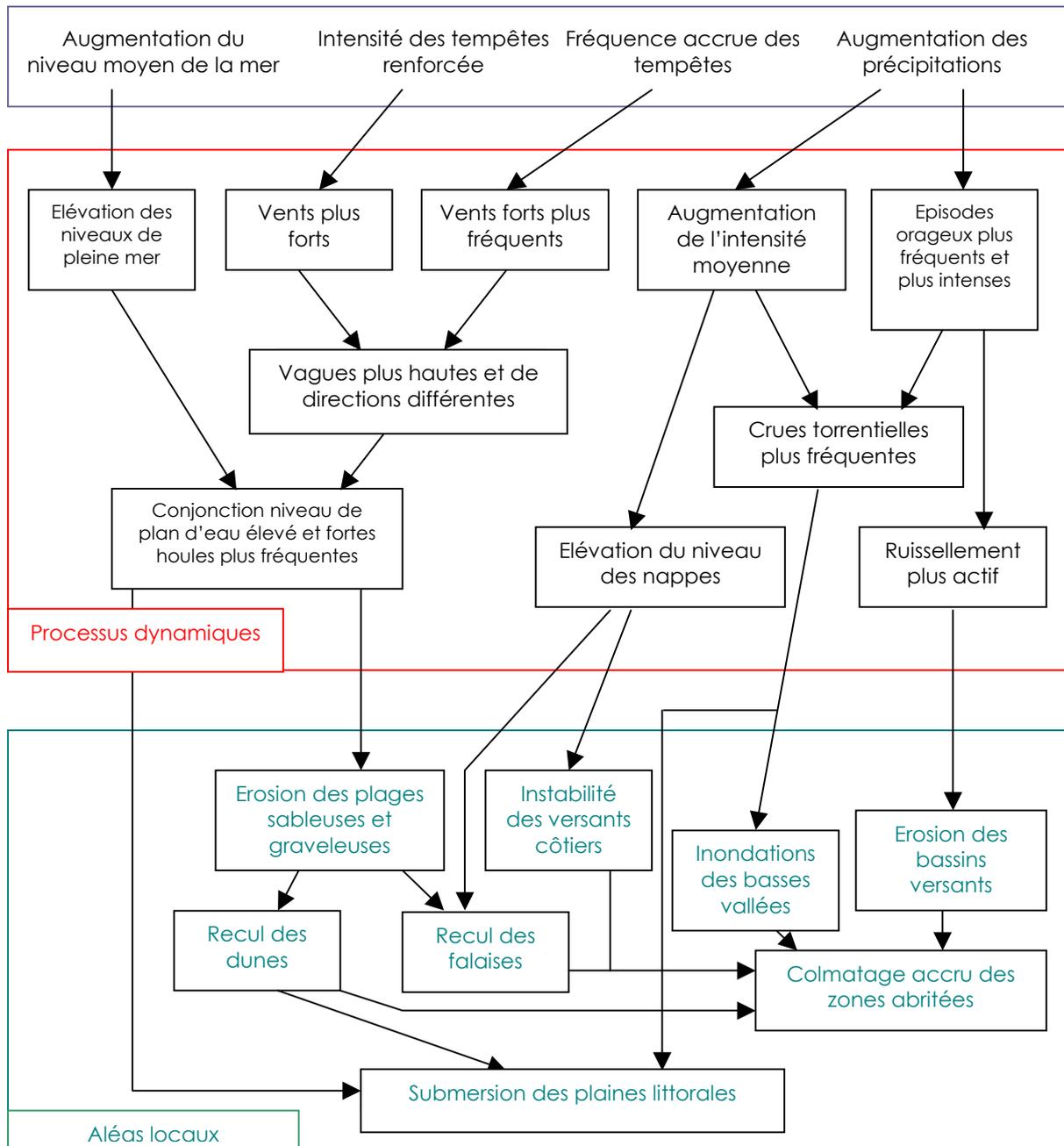


Figure 61 : Schéma récapitulatif des conséquences possibles à l'échelle locale et régionale sur les aléas, source document de présentation du projet de Contrôle par Laser Aéroporté des Risques Environnementaux Côtiers (CLAREC) en Manche et en Mer du Nord, 2005.

Les estimations à l'horizon 2100 des tendances en matière de précipitations, de température et d'élévation du niveau de la mer restent incertaines aux échelles mondiale et nationale. Toutefois, la prise de conscience des Autorités quant à une éventuelle augmentation des risques littoraux progresse. De nombreux groupes de recherche régionaux, nationaux et européens se forment pour quantifier de manière plus précise les effets du changement climatique et leurs impacts sur la frange côtière.

Le chapitre 2 en est un exemple. Il présente les principales conclusions des études des risques côtiers dans la région Nord – Pas de Calais.

Chapitre 2

Etude des aléas côtiers dans la région Nord – Pas de Calais

I. Description du Nord – Pas de Calais

A. Les caractéristiques morphologiques

Le littoral de la Côte d'Opale, situé à l'extrême Nord de la France, s'étend sur une longueur de 140 km, de la baie d'Authie à la frontière belge. La côte d'Opale présente une grande diversité morphologique et paysagère. Au sud d'Equihen-Plage, dans le nord de la plaine maritime picarde orientée nord-sud, le littoral est parsemé de vastes dunes se succédant tandis que dans le secteur situé entre Equihen et Sangatte, les falaises côtières du Boulonnais sont entrecoupées de massifs dunaires, comme à Wissant. Entre Bray-Dunes et Sangatte, la plaine maritime flamande d'orientation ouest-sud-ouest - est-nord-est, est drainée par l'Aa ainsi qu'un ensemble de canaux débouchant à la mer au niveau des agglomérations de Calais et Dunkerque.

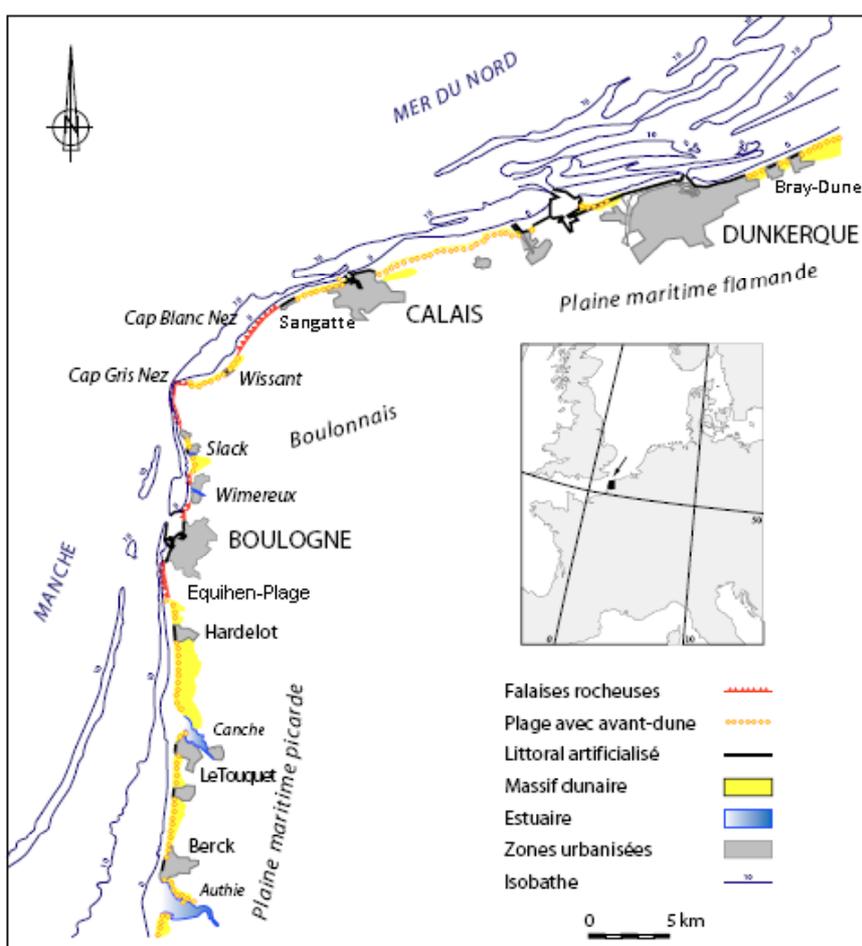


Figure 62 : Le littoral de la Côte d'Opale, d'après une carte issue de la thèse de S. Chaverot, Université du Littoral Côte d'Opale, 2006

1. La Côte d'Opale côté terre

a. La plaine maritime picarde

La plaine maritime picarde s'étend sur une longueur de 50 km entre l'estuaire de la Somme et Equihen, au sud de Boulogne-sur-Mer. Plaine humide, bordée par la Manche, orientée Nord-Sud, d'une largeur de 1.5 à 2 km, ce secteur a une altitude peu élevée de l'ordre de 4 à 5 m, inférieure aux plus hautes mers de vives-eaux. La plaine est délimitée, au Nord, par les falaises du Jurassique hautes de plus d'une trentaine de mètres, présentes jusqu'au Cap Gris Nez. Ces falaises sont formées d'une couche d'argile surmontée de grès et de sable dans laquelle s'intercalent de petits bancs calcaires.

Au sud, la plaine maritime picarde est délimitée par les falaises du Crétacé du plateau Picard tandis qu'une paléo-falaise la délimite à l'est. L'ouest est constitué d'un rivage sableux où un large système dunaire pouvant atteindre 3.5 km est présent. Ces dunes s'étendent du cordon externe à la plaine humide des Bas-Champs. La dune externe est essentiellement active tandis que plus en arrière, la présence de forêts et d'aménagements peu importants fixent les espaces dunaires. L'érosion y est ponctuelle et le risque d'inondation lié à la rupture du cordon bordier peu probable.

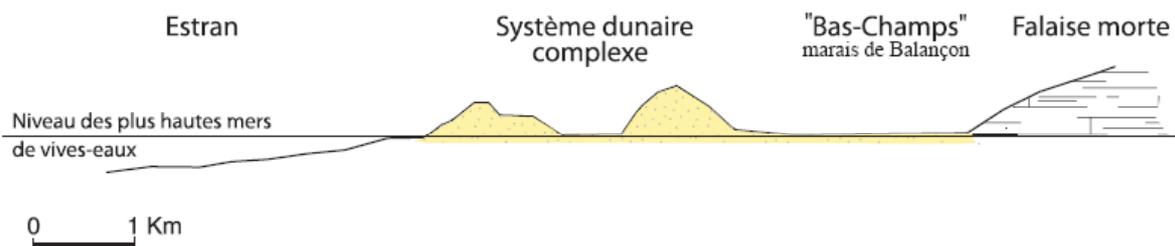


Figure 63 : Coupe topographique caractéristique de la plaine maritime picarde, source thèse de S. Chaverot, Université du Littoral Côte d'Opale, 2006

Les estrans de la plaine maritime picarde sont très étendus. Ils peuvent atteindre 600 m au sud de Boulogne-sur-Mer et jusqu'à 1000 m au sud de la plaine.

b. La plaine maritime flamande

La plaine maritime flamande, d'orientation ouest-sud-ouest - est-nord-est est située entre Sangatte et la frontière belge. Bordé par la Mer du Nord et long de 60 km, le littoral est fortement anthropisé. Le cordon dunaire est relativement étroit, souvent prolongé au nord par des estrans dont la longueur est généralement comprise entre 300 et 1500 m. Il est fréquemment artificialisé par des ouvrages de défense ou interrompu par des infrastructures urbaines ou portuaires qui protègent une plaine basse d'altitude inférieure aux plus hautes mers de vives-eaux, considérée comme un polder.

La plaine maritime flamande a, en effet, une longue tradition de poldérisation, le but étant de se protéger contre les inondations et les risques liés à l'aléa tempête tout en exploitant les sols riches nés de la rencontre terre/mer. Les hommes ont alors progressivement creusé des fossés de drainage, les Watergangs, qui rejetaient l'eau dans les canaux, ensuite évacuée à la mer à marée basse.

Aujourd'hui, les fortes densités de populations et les nombreuses activités économiques présentes dans la plaine maritime flamande illustrent cette tradition ancienne. Toutefois, contrairement aux dunes picardes, le risque d'inondation, en cas de rupture du cordon dunaire est important, car ce dernier est unique.

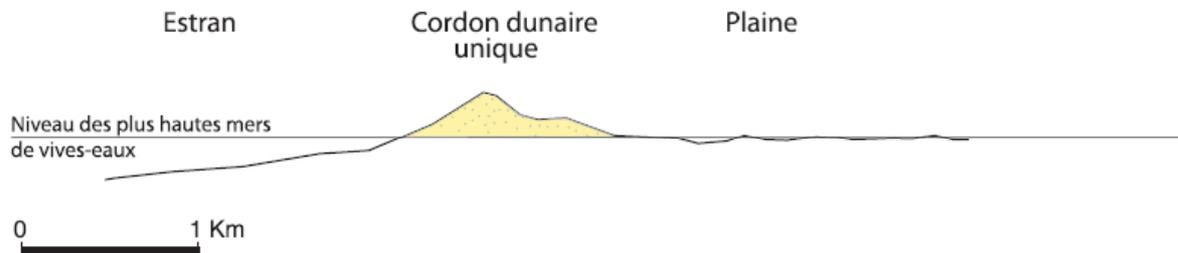


Figure 64 : Coupe topographique caractéristique de la plaine maritime flamande, source thèse de S. Chaverot, Université du Littoral Côte d'Opale, 2006

c. Le Boulonnais

Le Boulonnais, d'une longueur de 40 km, est situé entre les plaines maritimes flamande et picarde. Ce secteur est constitué de falaises du Jurassique d'Equihen jusqu'au Cap Gris Nez. Au Nord-ouest de Wissant se trouvent les falaises du Crétacé qui ont une altitude croissante de Wissant au Cap Blanc Nez où elles atteignent une centaine de mètres tandis qu'à l'ouest de Sangatte, les falaises du Pléistocène, d'une hauteur de 20 à 30 m s'étendent sur une longueur de 1 km environ. Elles sont formées de sable et de limons, de graves de craie, de silex et de fragments de grès rouges.

Ces falaises laissent par endroit place à des secteurs sableux comme les dunes de la Slack au sud d'Ambleteuse. On note la présence fréquente d'éboulis rocheux au pied de ces falaises.

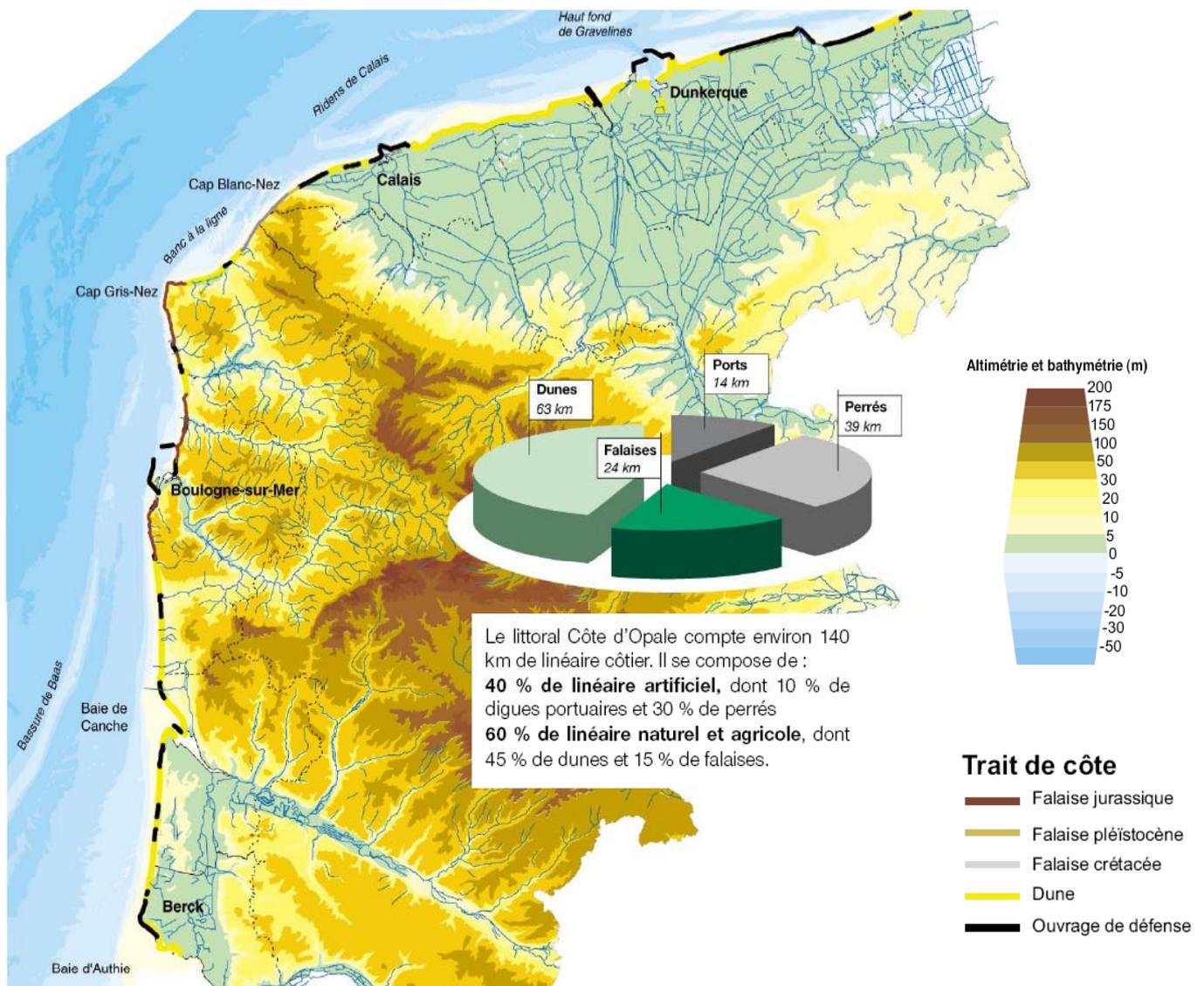


Figure 65 : La géographie physique de la Côte d'Opale, source Plan Littoral d'Actions pour la Gestion de l'Erosion (PLAGE), 2003

Les secteurs meubles évoqués précédemment se sont formés au cours de la dernière transgression marine holocène qui a donné naissance au littoral actuel dont les plages sont fréquemment parsemées de barres et de bâches. Lors de la dernière période glaciaire du Weichselin, le niveau marin s'est abaissé, asséchant progressivement le Pas de Calais. Les terrains sédimentaires alors découverts ont subi une forte érosion continentale et les sédiments d'origine fluviale et éolienne s'y sont peu à peu accumulés. Un important stock sédimentaire s'est constitué sur le plateau continental.

Lors de la remontée du niveau marin, ces sédiments ont été mobilisés et ont vraisemblablement été à l'origine de la formation du cordon dunaire lors de la décélération de l'élévation du niveau marin.

2. La côte d'Opale côté mer

La Côte d'Opale est située à l'intersection entre la Manche et la Mer du Nord. L'Angleterre n'est qu'à 35 km au niveau de l'étranglement du détroit du Nord – Pas de Calais.

Ce couloir, d'une profondeur maximale de 65 m, est formé par un substratum rocheux d'âge secondaire ou tertiaire recouvert d'une couverture sédimentaire meuble plus récente datant du quaternaire, composée de cailloutis et recouvrant la majeure partie des fonds marins. Le long de ces côtes, cette couverture est elle-même recouverte de bancs sableux. Ces derniers sont au nombre de trois le long de la façade littorale picarde. Leur extension décroît au niveau du Cap Gris Nez à la faveur des affleurements rocheux et des cailloutis. Le long de la façade Nord, le nombre et la dimension des bancs sableux augmentent progressivement vers la frontière belge. Quinze bancs sableux parallèles orientés WSW-ENE sont présents au large de Dunkerque.

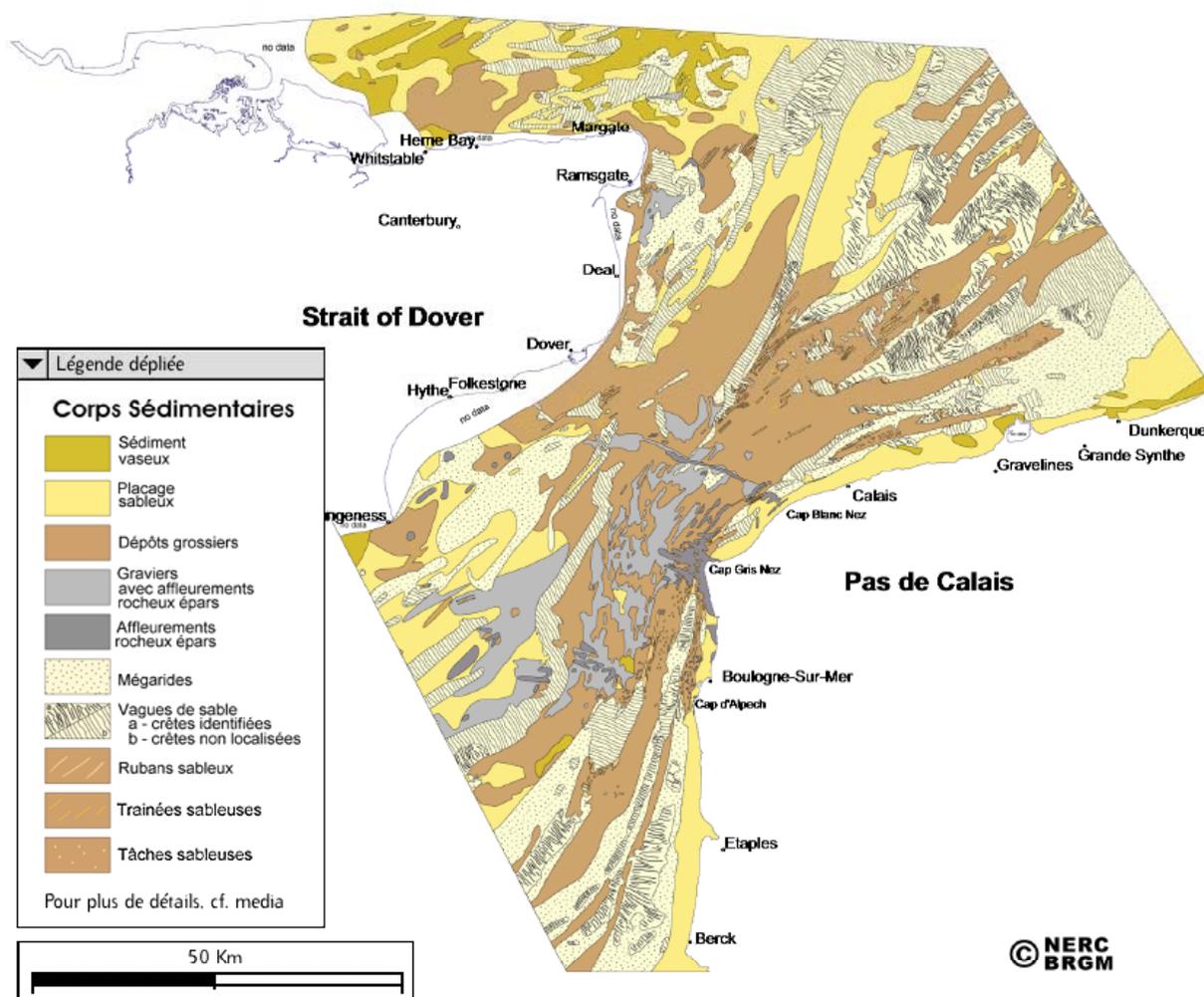


Figure 66 : Corps sédimentaires des fonds marins le long de la Côte d'Opale, source CD Rom Géosynth, synthèse géologique du Pas de Calais, Natural Environment Research Council (NERC), BRGM, 2002

3. Les phénomènes de subsidence le long de la Côte d'Opale

Le rapport scientifique final BAR de février 2005 montre une tendance à la subsidence de la station de Boulogne-sur-Mer puisque, d'après des enregistrements exploitables sur une durée équivalente à 17.3 années, l'augmentation du niveau moyen de la mer a été de 44 cm/an, soit bien supérieure aux estimations eustatiques comprises entre 0.1 et 0.2 cm/an pour la même période. De même, d'après les données de la période 1956 – 2000, fournies par le SHOM à M. Chaverot, le niveau marin a augmenté de 1.7 mm/an au niveau de Dunkerque. Ces résultats sont toutefois à interpréter avec précaution compte tenu des nombreuses lacunes présentes. Il est à noter des évolutions similaires dans d'autres ports à proximité comme à Portsmouth en Angleterre (+1.8 mm/an), Douvres (+2.5 mm/an), Neuwpoort en Belgique (+3.2 mm/an), Ostende (+2 mm/an) ou Zeebrugge (+2.2 mm/an).

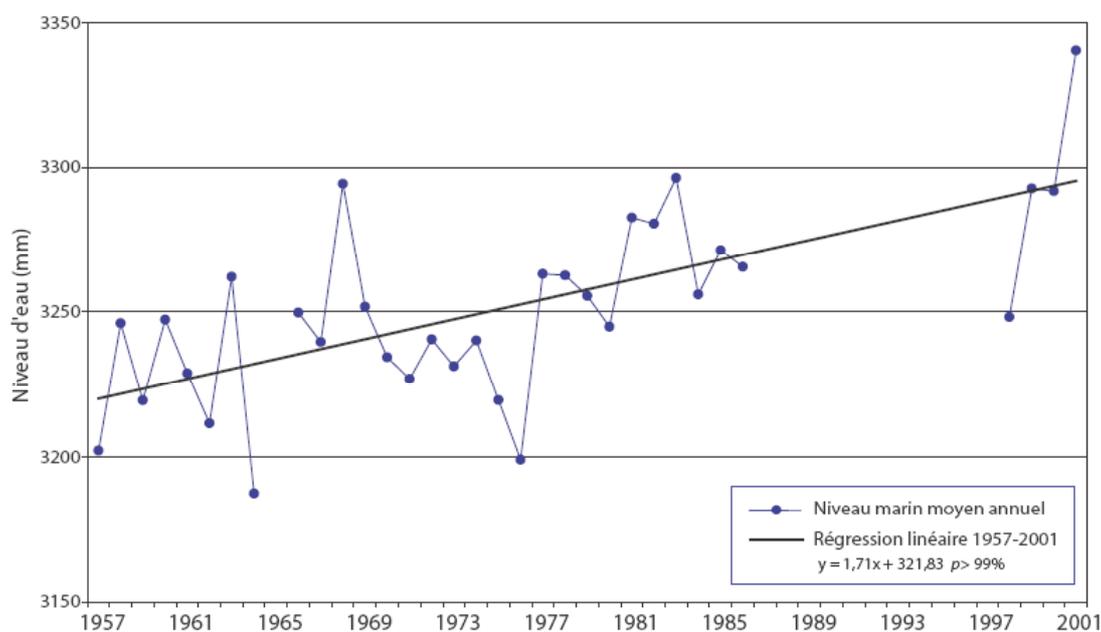


Figure 67 : Evolution du niveau marin moyen annuel à Dunkerque entre 1957 et 2001 d'après les données du SHOM, source thèse de S. Chaverot, Université du Littoral Côte d'Opale, 2006

B. Les caractéristiques hydrodynamiques et climatiques

1. Les conditions hydrodynamiques

La Côte d'Opale est caractérisée par un régime de houles courtes dont les périodes les plus fréquentes sont comprises entre 5 et 7 s, à faible énergie avec des variations saisonnières. D'avril à octobre, le régime des vagues est relativement calme avec des houles, qui, pour 70 à 90 % des cas, sont inférieures à 1.25 m. D'octobre à mars, les plans d'eau sont plus agités. Les vagues comprises entre 1.5 et 2.5 m représentent 30 à 40 % des cas tandis que celles comprises entre 2.5 et 6 m concernent 10 à 20 % des cas.

La Côte d'Opale est également un secteur à fort marnage.

Coefficient	Berck	Le Touquet	Boulogne	Wissant	Calais	Gravelines	Dunkerque
45	5.03	4.87	4.62	4.31	3.97	3.8	3.54
70	7.07	6.88	6.4	5.84	5.22	4.91	4.57
95	8.51	8.09	7.69	7.02	6.37	6.31	5.6

Tableau 8 : Evolution du marnage en mètres le long de la Côte d'Opale, d'après les données du SHOM par coefficient de mortes, moyennes et vives-eaux, source thèse de S. Chaverot, Université du Littoral Côte d'Opale, 2006

Ces données montrent que le marnage diminue entre la Manche et la Mer du Nord puisqu'en période de mortes-eaux par exemple, le marnage varie de 5.03 m à Berck à 3.54 m à Dunkerque. Les mêmes tendances sont observables pour les coefficients de moyennes et vives-eaux.

Les courants de marée sont orientés sud-ouest nord-est sur la côte picarde et ouest-sud-ouest - est-nord-est sur la côte flamande. Les vitesses des courants de marée en Manche et à l'extrême Sud de la Mer du Nord sont présentées sur la figure ci-dessous :

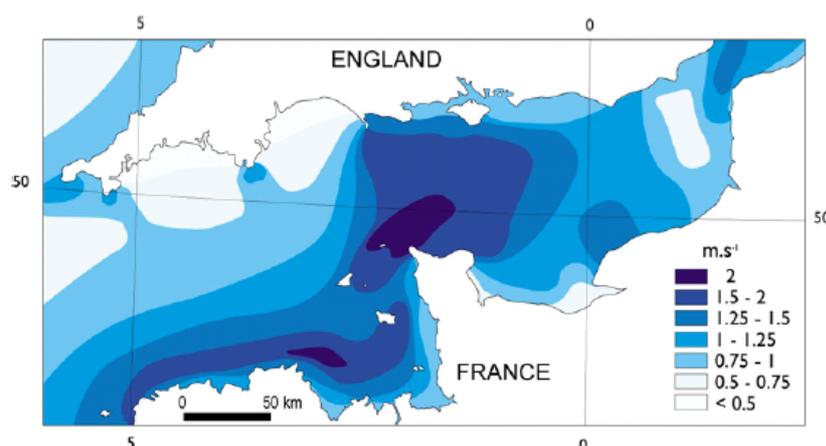


Figure 68 : Vitesse des courants de marée en Manche et à l'extrême Sud de la Mer du Nord (d'après SHOM 1968). Source rapport scientifique BAR final, février 2005.

Surcotes et décotes doivent être ajoutées aux valeurs du tableau ci-dessus.

Une analyse de trois épisodes de fortes surcotes à Calais en 1974, à Dunkerque en 1976 et à Boulogne-sur-Mer en 1990, a permis à M. Chaverot de déterminer plus précisément les conditions favorables aux surcotes sur la Côte d'Opale.

- La majorité des surcotes a lieu lors d'épisodes dépressionnaires, c'est-à-dire pour une pression inférieure à 1015 hPa. En général, plus l'intensité de la tempête est forte, moins la pression moyenne est élevée.
- Plus les surcotes générées sont importantes et plus la force du vent est élevée. La direction des vents est également primordiale dans la formation des surcotes. Pour Dunkerque et Calais, les surcotes les plus fortes se produisent lorsque le vent est orienté nord-ouest tandis que pour Boulogne, ce sont en général les vents de sud-ouest qui génèrent les surcotes les plus fortes.

SURCOTES DUNKERQUE	< 20 cm	[20-50 cm[	[50-100 cm[	>=100 cm
nombre de surcotes	31427	10829	2062	146
surcote moyenne (cm)	8,45	30,18	65,12	119,09
part moyenne de la pression (%)	41,48	28,27	16,65	15,18
part moyenne du vent (%)	58,51	71,72	83,3	84,81
pression moyenne	1012,6	1008	1005,3	1002,9
direction moyenne	207,68	SSW 241,6	WSW 266,46	W 281,82 WNW
vitesse moyenne	6,35	8,73	11,96	15,06
fréquence vents d'afflux 260°-50° (%)	42,82	51,15	67,88	82,71
fréquence vents >=16 m/s (%)	0,64	3,54	17,91	45,86

SURCOTES CALAIS	< 20 cm	[20-50 cm[	[50-100 cm[	>=100 cm
nombre de surcotes	20564	9808	1418	39
surcote moyenne (cm)	9,00	29,95	62,17	116,28
part moyenne de la pression (%)	40,02	26,40	18,14	11,33
part moyenne du vent (%)	59,98	73,60	81,86	88,67
pression moyenne	1012,96	1008,92	1004,27	1001,51
direction moyenne	206,10	SSW 231,90	WSW 257,22	WSW 290,00 WNW
vitesse moyenne	4,86	5,70	7,37	10,10
fréquence vents d'afflux 270°-50° (%)	35,41	47,53	54,94	70,00
fréquence vents >=16 m/s (%)	0,01	0,06	0,55	10,00

SURCOTES BOULOGNE/MER	< 20 cm	[20-50 cm[	[50-100 cm[	>=100 cm
nombre de surcotes	15212	6980	1213	42
surcote moyenne (cm)	9,04	29,77	68,38	116,50
part moyenne de la pression (%)	39,08	28,01	23,02	18,10
part moyenne du vent (%)	60,92	71,99	76,98	81,90
pression moyenne	1013,63	1007,50	998,40	992,20
direction moyenne	196,44	SSW 221,29	SW 241,69	WSW 246,50 WSW
vitesse moyenne	5,92	8,05	12,15	16,83
fréquence vents d'afflux 200°-340° (%)	42,81	69,45	80,88	90,00
fréquence vents >=16 m/s (%)	0,33	2,37	23,17	62,50

Tableau 9 : Tableau synoptique des facteurs météorologiques générant des surcotes. Source thèse de S. Chaverot, Université du Littoral Côte d'Opale, 2006.

Les conditions favorables aux décotes ont également été déterminées à partir des observations faites à Dunkerque, Boulogne et Calais.

- En moyenne les décotes ont plutôt lieu lors d'épisodes anticycloniques, c'est-à-dire à une pression supérieure à 1015 hPa. A Dunkerque, les très fortes décotes observées ont eu lieu en période dépressionnaire, ce qui suppose que le vent semble être le principal facteur responsable des décotes.

- Le rôle de la direction du vent est plus important que son intensité, généralement faible. La fréquence des vents de reflux est essentielle.

DECOTES DUNKERQUE	< -20 cm	[-20 -50 cm[	[-50 -100[	<= -100 cm
nombre de décotes	37999	12925	751	9
décote moyenne (cm)	-8,83	-28,43	-59,17	-119,11
part moyenne de la pression (%)*	52,34	38,12	17,91	7,61
part moyenne du vent (%)*	47,65	61,87	82,08	92,38
pression moyenne	1017,72	1021,6	1019,4	1007,8
direction moyenne	171,06 SSE	145,52 SE	139,9	SE 162,85 SE
vitesse moyenne	5,58	6,14	8,01	8,57
fréquence vents de terre 240°-70° (%)	54,62	65,10	84,16	75,00
fréquence vents >=16 m/s (%)	0,31	0,56	1,66	0,00

DECOTES CALAIS	< -20 cm	[-20 -50 cm[	[-50 -100[	<= -100 cm
nombre de décotes	22416	10189	1260	37
décote moyenne (cm)	-9,14	-29,58	-68,46	-113,27
part moyenne de la pression (%)	50,99	35,69	16,36	8,06
part moyenne du vent (%)	49,01	64,31	83,64	91,94
pression moyenne	1017,41	1021,69	1021,91	1018,64
direction moyenne	182,29 S	157,68 SE	145,54	SE 138,33 SE
vitesse moyenne	4,29	4,22	3,95	3,42
fréquence vents de terre 230°-70° (%)	49,42	43,48	50,40	58,33
fréquence vents >=16 m/s (%)	0,01	0	0	0

DECOTES BOULOGNE/MER	< -20 cm	[-20 -50 cm[	[-50 -100[	<= -100 cm
nombre de décotes	7895	6980	1066	12
décote moyenne (cm)	-34,69	-29,83	-68,46	-115,08
part moyenne de la pression (%)	33,27	35,88	18,42	11,97
part moyenne du vent (%)	66,73	64,12	81,58	88,03
pression moyenne	1022,37	1022,00	1024,39	1026,27
direction moyenne	140,46 SE	145,16 SE	108,15	ESE 76,00 ENE
vitesse moyenne	4,83	4,76	5,45	6,20
fréquence vents de terre 30-180° (%)	44,42	57,72	72,41	80,00
fréquence vents >=16 m/s (%)	0,08	0,06	0,13	0,00

Tableau 10 : Tableaux synoptiques des facteurs météorologiques générant des décotes. Source thèse de S. Chaverot, Université du Littoral Côte d'Opale, 2006.

Pour ce qui est des grandes tendances en matière de surcotes et décotes sur les ports de Calais, Boulogne et Dunkerque, on constate, d'après la thèse de M. Chaverot :

- une baisse significative des surcotes et une augmentation des décotes sur Calais entre 1965 et 2002,
- des évolutions très faibles et non significatives sur Dunkerque entre 1956 et 2002,
- aucune tendance sur Boulogne-sur-Mer en raison d'un nombre important de lacunes.

Dunkerque, entre 1956 et 1986 et Calais entre 1965 et 1983, ont par contre connu une augmentation des fortes surcotes supérieures au mètre. Cette élévation a été suivie d'une période d'accalmie à partir des années 1980. Ces observations sont à mettre en relation avec les épisodes tempétueux des années 1970 qui ont par exemple généré à Calais des vents d'afflux plus forts et de fortes surcotes.

Pour conclure sur les conditions hydrodynamiques de la Côte d'Opale, nous mentionnerons que le fort marnage crée une dynamique complexe fortement influencée par la marée sur les estrans peu inclinés. En effet, les conditions de déferlement des vagues sur l'estran varient du bas de plage au haut de plage en fonction de l'épaisseur de la tranche d'eau tandis que la forte amplitude tidale

associée au déferlement de la houle génère un transit sédimentaire. La déflation éolienne est également influencée par la marée puisque la présence de plans humides limite par endroit l'alimentation des dunes et du haut de plage.

L'espace supratidal est lui aussi affecté par des mouvements complexes. La hauteur des niveaux d'eau sur l'estran varie spatialement et temporellement en fonction du bilan sédimentaire du haut de plage, du cycle et des conditions de marées ainsi que des conditions météo-marines. Des formes d'accrétion comme la création de dunes embryonnaires peuvent se juxtaposer à des formes d'érosion attaquant certaines falaises par exemple, suite à une marée, une tempête ou une période de plusieurs mois. Les apports éoliens qui alimentent les dunes et le haut de plage sont quant à eux plus importants en cas de fort vent d'afflux et en présence de sable sec, c'est-à-dire au printemps et en hiver. Toutefois Mme Meur-Férec a montré, en 2004, en étudiant les apports éoliens sur le haut de plage au droit de la dune d'Aval de Wissant, que leur action était limitée en raison des niveaux marins générés lors de forts vents d'afflux. Ces hauts niveaux d'eau atteignent, en effet, le pied de dune, provoquant une érosion tandis que le volume de sable mobilisé est dispersé dans les petits fonds.

2. Les conditions climatiques

Les stations de Dunkerque et Boulogne-sur-Mer couvrant une « Normale » Climatique de 30 ans ont permis de caractériser les deux façades climatiques de la Côte d'Opale. Le climat est de type tempéré océanique.

A Dunkerque, le suivi des vents trihoraires entre 1956 et 2001, montre que 67.4 % des observations sont des vents de type faible, c'est-à-dire inférieurs à 8 m.s⁻¹. 31.5 % des données concernent des vents dont la vitesse est comprise entre 8 et 16 m.s⁻¹ tandis que 1.2 % des vents ont des vitesses supérieures à 16 m.s⁻¹. Ces vents associés aux épisodes tempétueux peu fréquents n'en demeurent pas moins importants car ils jouent un rôle majeur dans l'évolution du trait de côte.

A Boulogne-sur-Mer, l'étude s'est effectuée à partir de mesures réalisées entre 1965 et 2001. Les vents inférieurs à 16 m.s⁻¹ dominent puisqu'ils représentent 99.5 % des observations. Les vents forts sont donc peu représentés et sont davantage présents durant les mois d'hiver.

Les données trihoraires ne montrent par ailleurs pas d'augmentation significative des tempêtes, tant en nombre qu'en intensité. Les vents faibles dont la vitesse est inférieure à 8 m.s⁻¹ tendent à augmenter tandis que les épisodes tempétueux (vitesse des vents supérieure à 16 m.s⁻¹) tendent à diminuer à Dunkerque entre 1956 et 2001. Il est difficile de dégager une tendance pour les mesures de la station de Boulogne-sur-Mer entre 1965 et 2001 mais globalement pour le littoral de la Côte d'Opale, les vents forts supérieurs à 28 m.s⁻¹ sont peu nombreux et relativement stables depuis la seconde moitié du XX^{ème} siècle.

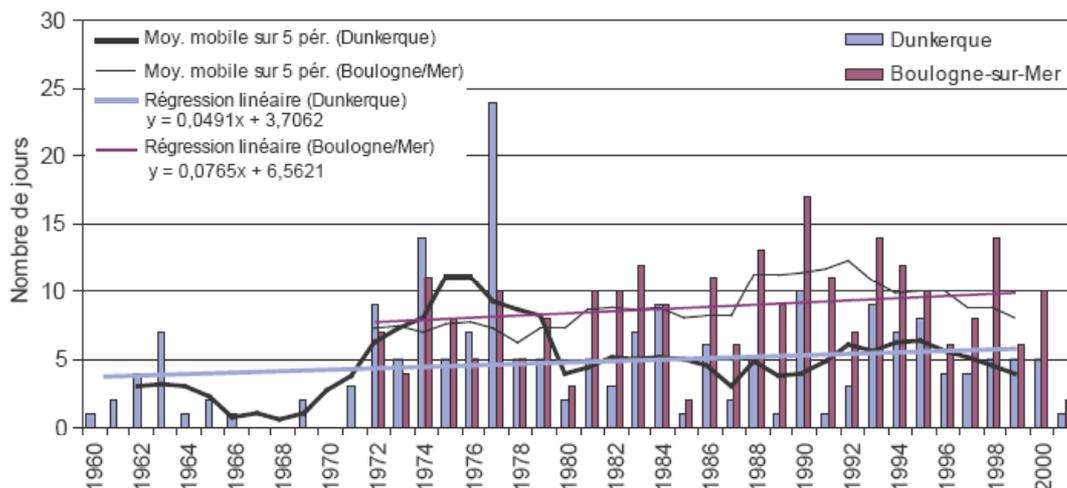


Figure 69 : Episodes tempétueux avec des vents maximums instantanés supérieurs à 28 m/s à Dunkerque (1960 – 2001) et Boulogne-sur-Mer (1972 – 2001)
 Source thèse de S. Chaverot, Université du Littoral Côte d'Opale, 2006.

On note notamment une grande variabilité interannuelle des épisodes de tempêtes.

Rappelons qu'en Mer du Nord, les vents d'afflux susceptibles de générer de hauts niveaux marins et de fortes houles sont principalement de secteur nord-ouest à nord-est alors qu'en Manche ils sont plutôt de secteur sud sud-ouest à nord nord-est. Ainsi un vent de secteur sud-ouest peut-il générer une surcote et une forte agitation de la mer en Manche, affectant particulièrement la plaine picarde, et provoquer une décote sur les rivages de la Mer du Nord.

Le croisement de la direction et de la force des vents montre la présence de vent faible dans toutes les directions, avec toutefois une plus faible fréquence pour les vents de secteur nord-ouest à nord, compris entre 261 et 360°. Les vents au delà de 8 m.s⁻¹ sont majoritairement orientés sud-ouest et ouest. Ils sont générés par des dépressions en provenance de la Manche. Respectivement 53 % et 78 % des vents compris entre 8 et 16 m.s⁻¹ et 16 et 28 m.s⁻¹ le confirment.

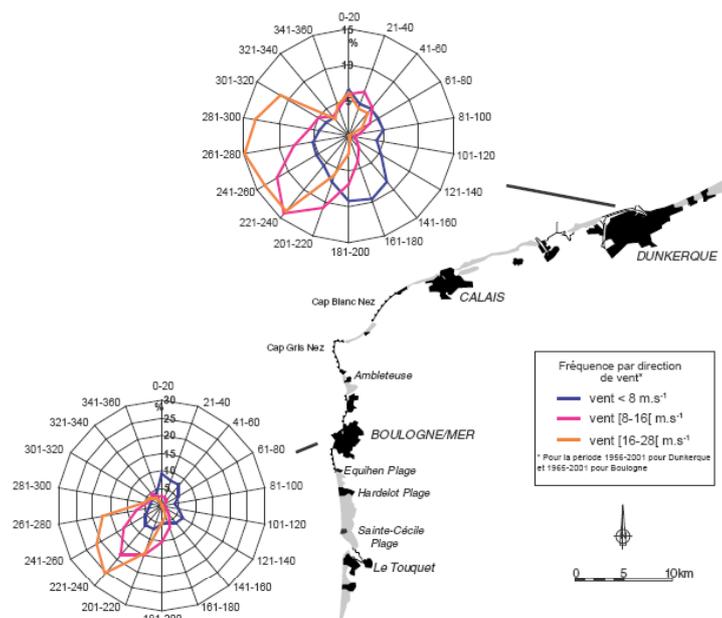
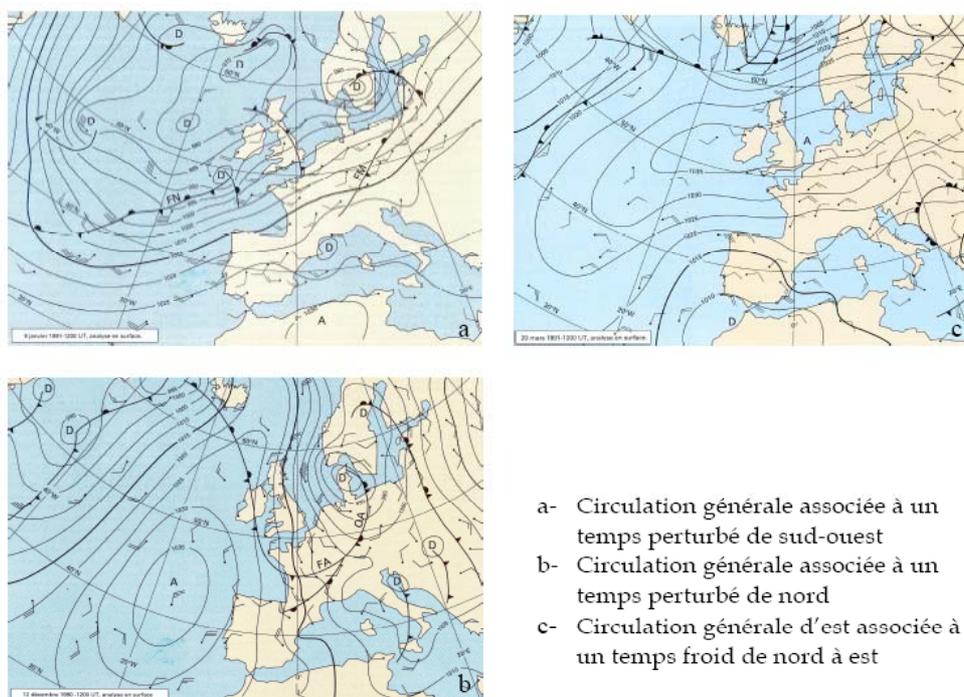


Figure 70 : Fréquence des directions de vents trihoraires en fonction de la force du vent à Dunkerque (1956 – 2001) et Boulogne-sur-Mer (1965 – 2001) d’après les données de Météo-France, source thèse de S. Chaverot, Université du Littoral Côte d’Opale, 2006.

La Côte d’Opale est également marquée par trois types de temps avec des circulations atmosphériques associées à trois temps perturbés de Sud-Ouest ou d’Ouest, de Nord-Ouest ou de Nord et de Nord-Est à Est. Ceux-ci sont à l’origine d’un temps parfois pluvieux, maussade mais doux, de vents de secteur NW très irréguliers ou encore de fortes mers sur le littoral Nord.



- a- Circulation générale associée à un temps perturbé de sud-ouest
- b- Circulation générale associée à un temps perturbé de nord
- c- Circulation générale d’est associée à un temps froid de nord à est

Figure 71 : Types de temps en Europe occidentale, source thèse de S. Chaverot, Université du Littoral Côte d’Opale, 2006.

Quant aux pressions atmosphériques moyennes annuelles, elles sont stables pour Dunkerque et en augmentation à Boulogne.

Nous retiendrons de l'étude de ces caractéristiques morphologiques, hydrodynamiques et climatiques une grande complexité en matière d'étude de la Côte d'Opale, qui géographiquement possède deux façades maritimes d'orientations différentes et qui est située proche de deux mers reliées entre elles par un détroit avec de forts courants de marée.

C. Une prise de conscience progressive des Autorités du Nord – Pas de Calais

En 1991, le Conseil Régional du Nord – Pas de Calais réalise un audit auprès des acteurs du littoral régional. La thématique de l'érosion côtière est au cœur des préoccupations. Ainsi en 1994 l'Observatoire de l'environnement littoral et marin est-il mis en place et expérimenté par le Conseil Régional du Nord – Pas de Calais. Il a pour mission la promotion de la gestion intégrée des zones côtières¹¹ de la Côte d'Opale et la constitution d'une plate-forme de travail et de collaboration de l'ensemble des acteurs concernés par ces questions autour de projets fédérateurs. Une première conférence « Erosion Côtière » a lieu à Boulogne-sur-Mer en 1994.

En 1996, l'Observatoire et ses partenaires se lancent dans un programme intitulé « Aménagement du littoral Nord – Pas de Calais : amélioration des connaissances relatives aux phénomènes d'évolution du trait de côte ». L'ensemble des services de l'Etat, les collectivités, les Etablissements publics d'Etat et les acteurs régionaux, notamment le Conseil Scientifique de la Région Nord – Pas de Calais, collaborent activement. Ainsi les services maritimes du Nord - Pas de Calais (SM), la Direction Régionale de l'Environnement (DIREN), la Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt (DDAF), les Conseils Généraux, le Conseil Régional, le Syndicat Mixte de la Côte d'Opale (SMCO), Ifremer, l'office National des Forêts (ONF), le Conservatoire du littoral et le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) oeuvrent-ils ensemble.

En 1999, le SMCO prend la maîtrise d'ouvrage du « Schéma de conservation et de gestion du trait de côte » sur le littoral de la Côte d'Opale, le but étant de fournir aux élus un outil d'aide à la décision pour la gestion de leurs problématiques locales. En 2002, fort des connaissances acquises sur les dynamiques côtières, le SMCO, avec l'appui technique du Conseil Régional du Nord – Pas de Calais, transforme cet outil d'aide à la décision en un plan intitulé Plan Littoral d'Actions pour la Gestion de l'Erosion (PLAGE). L'objectif est ici de proposer aux gestionnaires des orientations de gestion contre l'érosion côtière. Les bureaux d'études de la société belge Haecon, le Laboratoire National Hydraulique et Environnement (LNHE) d'EDF, des consultants, la Direction Régionale de l'Environnement et les Services Maritimes du Nord et du Pas de Calais se sont associés à la rédaction de ce document. Le PLAGE a été diffusé en 2003 à l'ensemble des acteurs concernés par les problématiques côtières. L'étude couvre l'intégralité du littoral de la Côte

¹¹ La gestion intégrée des zones côtières suppose la prise en compte simultanée de l'ensemble des paramètres socio-économiques et écologiques dans les politiques d'aménagement du littoral. Cette notion est traitée de manière plus approfondie dans le chapitre 3.

d'Opale et offre une vision fine des phénomènes et risques côtiers associés à chaque secteur.

Il est toutefois à noter que trois ans après sa publication, les collectivités ont encore du mal à s'approprier cette problématique. Il existe, en outre, des lacunes dans les données, la connaissance et la mise en relation des résultats publiés avec les politiques publiques. Ainsi le SMCO va-t-il lancer dans les mois à venir une série d'études sur la thématique de l'érosion pour compléter le PLAGE. Des sujets comme la gestion des stocks et des transits sédimentaires, l'étude des épis semi-perméables, la gestion des cordons dunaires ou la détermination des enjeux, dommages et risques littoraux retiendront particulièrement leur attention.

En parallèle, le Syndicat Mixte de la Côte d'Opale (SMCO) s'implique très fortement aux côtés de la Commission européenne dans le « programme de démonstration de gestion intégrée des zones côtières ». En 2004, la politique du littoral définie par le Comité Interministériel de l'Aménagement et du Développement des Territoires (CIADT) montre une réelle volonté française de prendre part au processus de Gestion Intégrée des Zones Côtières ou GIZC. La candidature du SMCO en 2005, suite à l'appel à projets pour un développement équilibré des territoires littoraux par ce concept, lancé par la DIACT et le Secrétariat Général de la Mer, contribue à la prise de conscience par les acteurs du littoral de l'ensemble des problèmes rencontrés lors de la gestion de la zone côtière et de la nécessité de travailler ensemble.

Des études ponctuelles sont également menées sur l'aléa de submersion marine avec une volonté des services de l'Etat, dans le cadre du respect des principes de GIZC, de collaborer pour tenter de caractériser cet aléa en intégrant les conséquences du changement climatique aux horizons 2050 et 2100. L'étude est actuellement menée par la DIREN Nord – Pas de Calais.

Plus concrètement, afin de contenir le risque de dégradation irréversible des paysages et de la biodiversité de la Baie d'Authie, le Conservatoire du Littoral a lancé en 2002, un programme d'aménagement de la Rive Nord de la Baie d'Authie. Les communes de Berck et Groffliers étaient concernées. 70 hectares sablonneux ont ainsi été acquis avec la participation des fonds européens FEDER. Il s'agit d'un réel atout touristique qui contribue à la fois au développement durable de la zone côtière. En 2003, 30 ha supplémentaires ont été acquis, ce qui porte à 220 ha la superficie des milieux naturels protégés dans la Baie d'Authie. Un projet de renaturation écologique du polder Nord sur Groffliers est actuellement en cours afin de rendre attractif pour l'avifaune, d'anciennes terres agricoles et de lutter contre la pression urbaine.

II. Etude des aléas côtiers

A. L'aléa tsunami

A la connaissance de M. Feunteun du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (MEDD), il n'existe pas, à l'heure actuelle, d'études abouties en matière d'évaluation et de cartographie de l'aléa tsunami à l'échelle nationale car ce dernier n'a pas été retenu comme l'un des plus probables sur le littoral Atlantique, Manche et Mer du Nord.

La région Nord – Pas de Calais n'est donc pas considérée comme une zone à risques du point de vue de cet aléa. Ceci est notamment lié aux faibles profondeurs d'eau en Manche (moins de 50 mètres en général).

Toutefois, des événements de ce type ont déjà eu lieu :

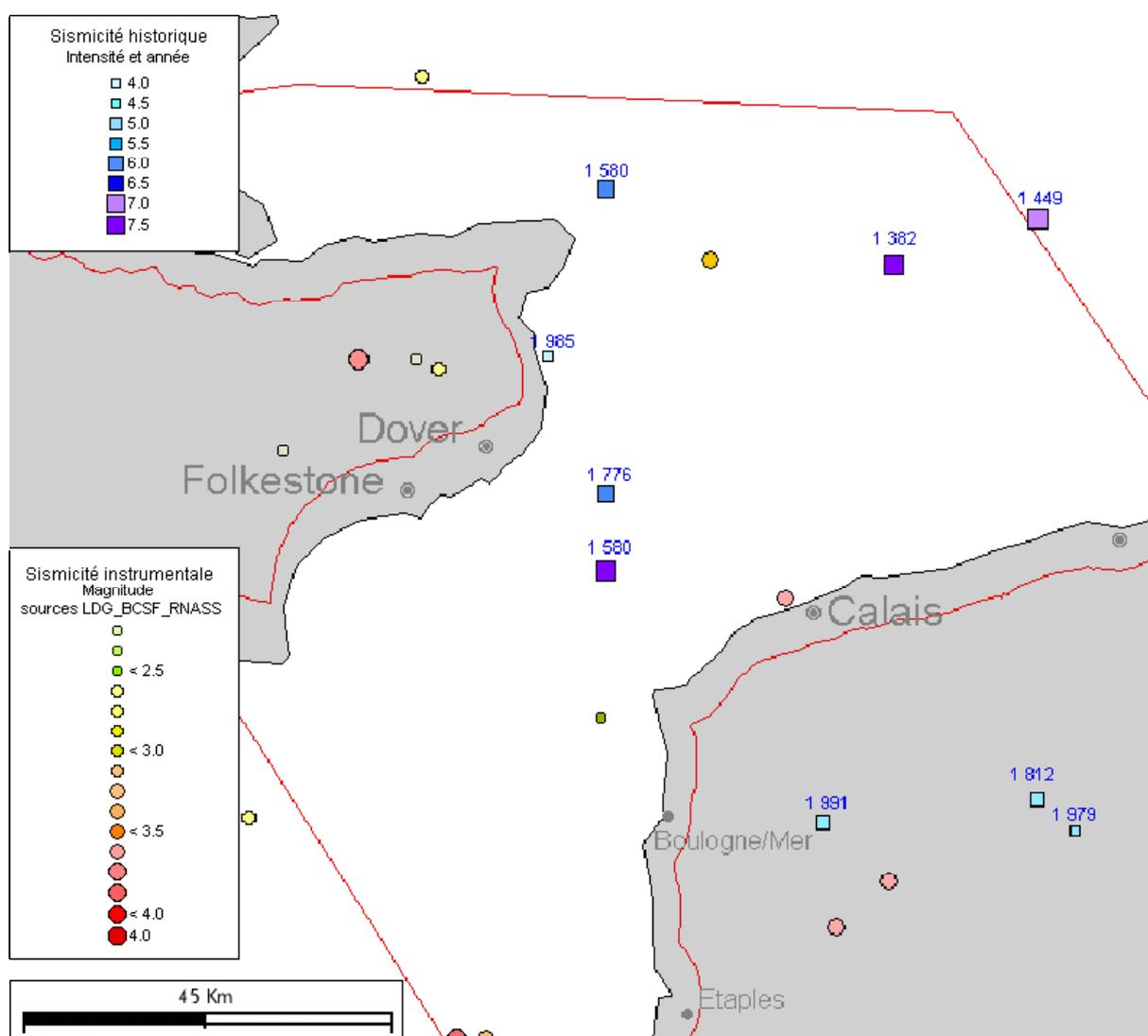


Figure 72 : Carte des événements sismiques, source CD Rom Géosynth, synthèse géologique du Pas de Calais, Natural Environment Research Council (NERC), BRGM, 2002.

La sismicité historique est obtenue à partir d'archives mentionnant des tremblements de terre. La magnitude est déterminée en fonction des dommages causés. La sismicité instrumentale est quant à elle déduite des réseaux de surveillance permanents.

Un séisme d'intensité 7 – 7.5 sur l'échelle de Richter a eu lieu en 1580 entre Douvres et Calais, détruisant en partie ces deux villes et provoquant une très forte vague détruisant notamment de nombreux bateaux. Son onde de choc a été ressentie dans les secteurs du Kent, de l'Essex et du Nord – Pas de Calais et a provoqué des dommages humains et matériels, notamment sous l'effet d'inondations ou de chutes d'édifices. D'autres séismes ont également été enregistrés entre le XIV^{ème} et le XVIII^{ème} siècle, en particulier les 21 mai 1382, 23 avril 1449 et 28 novembre 1776. Le plus violent d'entre eux a certainement été celui de 1382 qui s'étendit jusqu'à Utrecht et au sud-est de l'Angleterre. Sa magnitude aurait été celle du séisme de 1580 et son épïcentre se serait situé entre Canterbury et Bruges en Mer du Nord.

D'après le rapport de M. Batel, le BRGM estime qu'un « tsunami », équivalent à celui de 1580 est toujours possible même si aucun séisme majeur n'a eu lieu depuis le XVIII^{ème} siècle. Néanmoins, bien qu'il soit difficile de prévoir une quelconque période de retour pour un événement de type 1580, la très faible sismicité de la zone laisse à penser que le risque de raz de marée est très faible et que dans l'éventualité d'un tel événement, les conséquences seraient bien moins dramatiques qu'en Asie du Sud-Est du fait des faibles profondeurs marines en Manche.

B. L'érosion

1. Les transits sédimentaires

Les caractéristiques morphologiques, hydrodynamique et climatiques abordées précédemment permettent de comprendre les grandes tendances évolutives des transits sédimentaires de la Côte d'Opale.

Si par grande profondeur, les sédiments des fonds marins se déplacent au gré des marées, près des côtes, les déplacements s'effectuent essentiellement sous l'action des courants de houle. Sur de longues périodes, ces mouvements s'effectuent principalement dans un seul sens. Le mouvement résultant est qualifié de dérive littorale.

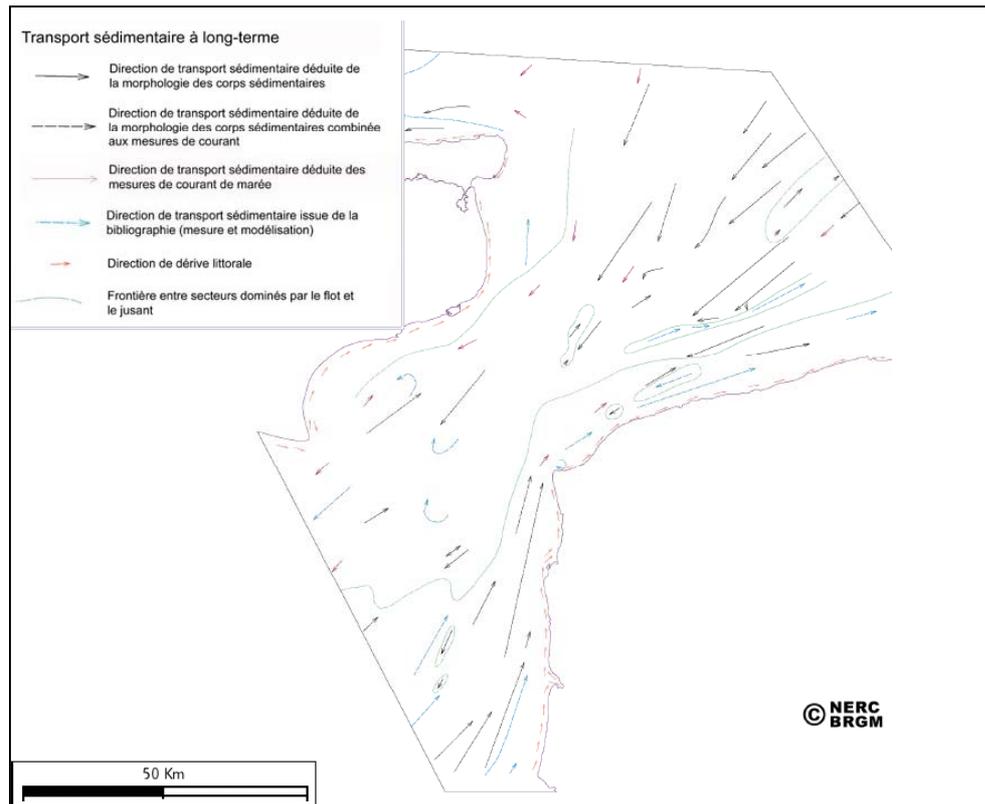


Figure 73 : Transits sédimentaires à long terme, source CD Rom Géosynth, synthèse géologique du Pas de Calais, Natural Environment Research Council (NERC), BRGM, 2002.

L'orientation et l'intensité des courants de marée et fluviaux au niveau des débouchés des rivières de la Canche et de l'Authie forment un épi hydraulique interrompant la dérive littorale. Ainsi observe-t-on un recul des dunes entre les deux estuaires au profit d'un engraissement de la rive sud de la Canche, véritable piège à sable. Le Nord de l'estuaire de la Canche est par contre en érosion. Les sédiments sont déplacés jusqu'au nord de Boulogne-sur-Mer. Au niveau de la digue sud du port, une partie des sédiments s'accumule sur la plage de l'Hoverport tandis qu'une autre partie est réfléchi par cette digue et alimente un banc sableux situé au nord du port. Du nord du port de Boulogne jusqu'à Gravelines, le transit des sédiments est très important en raison des fortes valeurs de courant dans le détroit du Nord – Pas de Calais. Ce transit est interrompu presque totalement sur les ouvrages de l'Avant Port Ouest de Dunkerque. Le transit peut également être interrompu sur une centaine de mètres près du littoral au niveau de Calais et en cas de houle du nord.

2. Les phénomènes d'érosion

D'après le PLAGE, 90 % du linéaire côtier de la Côte d'Opale est soumis à l'érosion, qu'elle soit continue ou brutale liée à de violentes tempêtes. La cartographie de la position future du trait de côte a été réalisée à partir de l'extrapolation du recul moyen passé du trait de côte.

80 % de son linéaire est particulièrement vulnérable aux phénomènes d'érosion continue. Le vieillissement ou le contournement de perrés ainsi que l'abaissement des plages sont des phénomènes observables sur la Côte d'Opale.

Face aux violentes tempêtes, il semblerait que 30 % du linéaire côtier n'ait pas une morphologie adaptée pour y résister. Sur l'ensemble des perrés évalués lors de l'étude PLAGE, la moitié d'entre eux est susceptible d'être franchie par une tempête

de période de retour 250 ans. Les risques de franchissement et de rupture du cordon dunaire sont particulièrement importants de Boulogne-sur-Mer à Dunkerque Ouest.

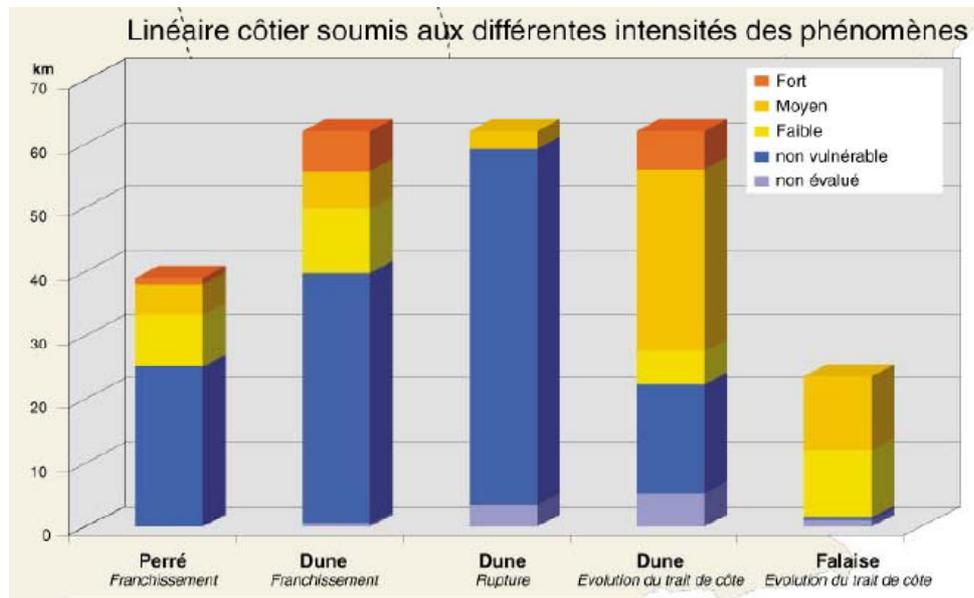


Figure 74 : Approche de la vulnérabilité du linéaire côtier, source Plan Littoral d'Actions pour la Gestion de l'Erosion (PLAGE), 2003

Les côtes évoluent beaucoup lors d'épisodes tempétueux sous l'action de l'énergie des vagues, de la hauteur de la surcote et de la durée de l'événement. La hauteur de la marée est également un paramètre important. Une tempête sera d'autant plus érosive si elle se produit lors d'une marée haute de vives-eaux.

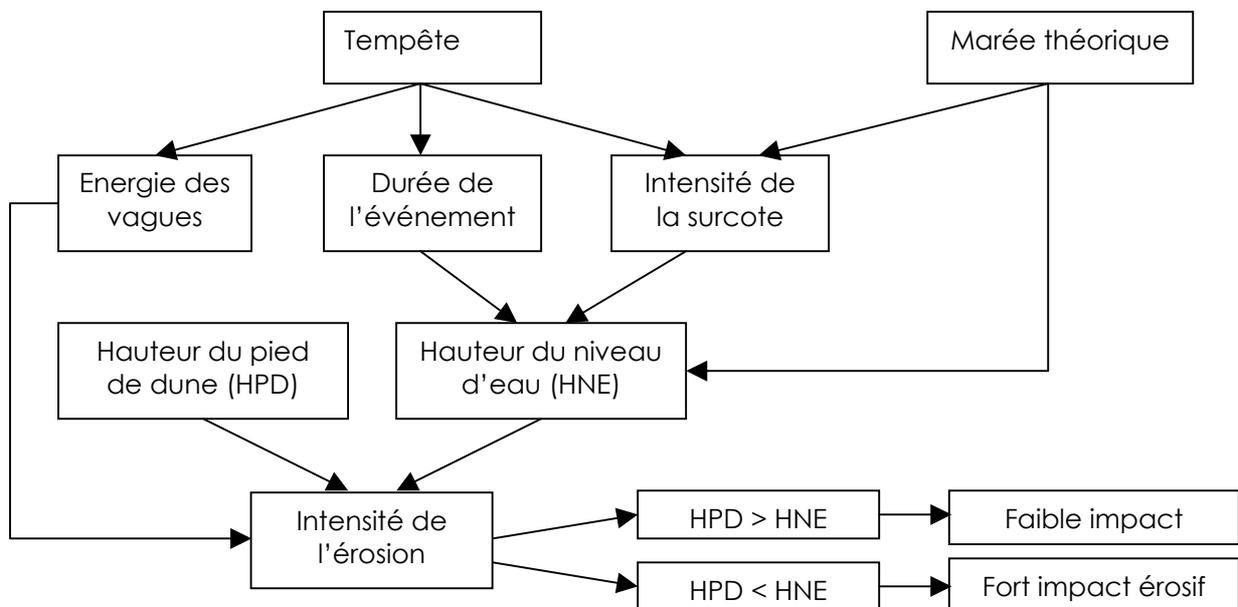


Figure 75 : Facteur d'érosion potentielle

D'après la thèse de S. Chaverot, Université du littoral Côte d'Opale, 2006.

M. Chaverot a caractérisé les périodes de retour des niveaux d'eaux extrêmes à Dunkerque, Calais et Boulogne-sur-Mer :

DUNKERQUE		
Période de retour en années	Hauteur d'eau en cm (Cotes marines)	Hauteur d'eau en cm (IGN 69)
1	640	370,7
1,04	650	380,7
1,25	660	390,7
1,78	670	400,7
2,92	680	410,7
5,2	690	420,7
9,71	700	430,7
18,58	710	440,7
36,01	720	450,7
70,26	730	460,7
98,28	735	465,7
137,55	740	470,7
269,76	750	480,7

Tableau 11 : Périodes de retour des niveaux d'eaux extrêmes enregistrés à Dunkerque, d'après la thèse de S. Chaverot, Université du littoral Côte d'Opale, 2006.

CALAIS		
Période de retour en années	Hauteur d'eau en cm (Cotes marines)	Hauteur d'eau en cm (IGN 69)
1	700	354,1
1	720	374,1
1	730	384,1
1	740	394,1
1	750	404,1
1,01	760	414,1
1,13	770	424,1
1,65	780	434,1
3,06	790	444,1
6,43	800	454,1
14,36	810	464,1
23,6	816	470,1
32,97	820	474,1
76,58	830	484,1
98,72	833	487,1

Tableau 12 : Périodes de retour des niveaux d'eaux extrêmes enregistrés à Calais, d'après la thèse de S. Chaverot, Université du littoral Côte d'Opale, 2006.

BOULOGNE - SUR - MER		
Période de retour en années	Hauteur d'eau en cm (Cotes marines)	Hauteur d'eau en cm (IGN 69)
1	920	481,2
1,03	930	491,2
1,23	940	501,2
1,85	950	511,2
3,32	960	521,2
13,53	980	541,2
28,66	990	551,2
61,37	1000	561,2
97,17	1006	567,2
132,08	1010	571,2

Tableau 13 : Périodes de retour des niveaux d'eaux extrêmes enregistrés à Boulogne-sur-Mer, d'après la thèse de S. Chaverot, Université du littoral Côte d'Opale, 2006.

Les hauteurs respectives de 640 cm, 700 cm et 920 cm Cote Marine correspondent aux hauteurs moyennes du pied de dune relevées à Dunkerque, Calais et Boulogne-sur-Mer.

Pour comprendre le potentiel érosif des hauts niveaux marins et analyser l'impact des tempêtes sur l'évolution des côtes, l'indice d'érosion ci-dessous a été proposé :

$$IEP_1 = \sum I.Ho.t_D \text{ avec } Ho = 5.112.10^{-4}.U.F^{1/2}$$

I : Niveau d'eau en mètres supérieur à la hauteur du pied de dune préalablement déterminée

Ho : Hauteur de la vague théorique

t_D : Durée de l'événement

U : Vitesse du vent observé en m.s⁻¹

F : Fetch en mètres (distance sur laquelle le vent souffle avec une vitesse et une direction constantes).

A court terme, cet indice permet d'évaluer le potentiel érosif des événements de hauts niveaux marins sur le trait de côte de secteurs en érosion. L'évolution du trait de côte dépend donc de l'intensité des tempêtes et du bilan sédimentaire qui déterminent, entre autres, la hauteur de la plage, sa rugosité et ainsi la puissance des houles et sa sensibilisation aux hauts niveaux marins. Ainsi est-il nécessaire de prendre en compte les conditions hydrodynamiques, sédimentaires et anthropiques pour appréhender l'évolution du trait de côte à court terme.

A moyen terme par contre, les variations du trait de côte dépendent surtout du bilan sédimentaire car il peut y avoir réversibilité des effets de tempêtes en cas d'apports de sédiments. Ainsi une tempête peut-elle avoir un effet immédiat et visible à court terme sur le trait de côte mais cela ne préjuge pas de son évolution à moyen et long terme.

Les plus forts indices d'érosion annuelle ont été relevés à Dunkerque et Calais dans les années 1970, à mettre en relation avec les fortes tempêtes qu'a connu la Côte d'Opale.

La différence des rythmes d'érosion entre les différents secteurs s'explique par des différences au niveau de l'exposition, de la morphologie de la plage, du bilan sédimentaire du rivage ainsi que de l'influence des aménagements et des interventions anthropiques. Les vents forts de sud-ouest à ouest par exemple, créés par des dépressions provenant de l'Atlantique affectent fortement les côtes près de Boulogne-sur-Mer, contrairement à celles de Dunkerque sur lesquelles arrivent des vents ralentis par l'urbanisation intérieure et les obstacles naturels.

La thèse de M. Chaverot détaille l'évolution du trait de côte de la Côte d'Opale entre 1963 et 2000. Afin d'estimer le rythme d'évolution du linéaire côtier des secteurs sableux de la Côte d'Opale, M. Chaverot a comparé différentes photos aériennes verticales retraitées à partir des missions IGN de 1949, 1963, 1971, 1983, 1989 et 1995. La position du trait de côte peut être déterminée à partir de la limite terre/mer qui est parfois difficile à repérer. C'est pourquoi M. Chaverot a préféré prendre pour référence le contact entre l'estran et la végétation dunaire.

Comme toute méthodologie, il existe des limites, notamment lors du retraitement des photos et de la digitalisation du pied de dune lorsque l'on trace la limite entre le sable vif et la végétation. La marge d'incertitude est estimée à +/- 9.5 m.

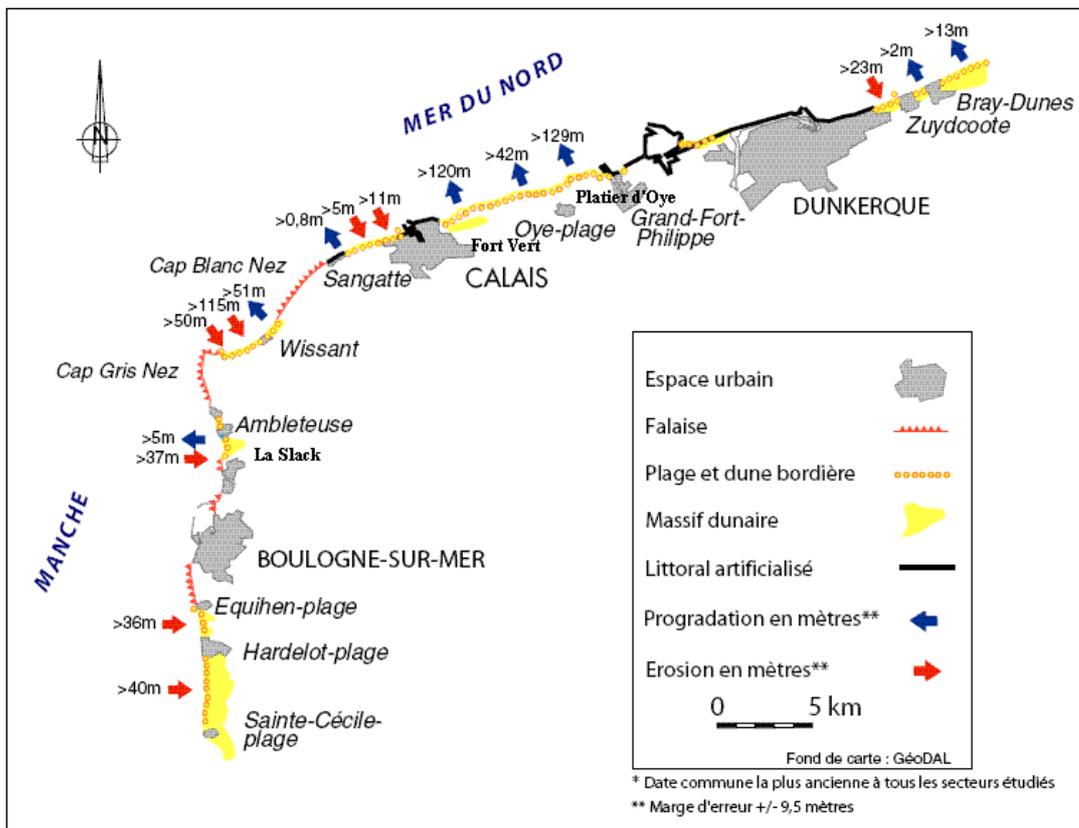


Figure 76 : Evolution du trait de côte du littoral de la Côte d'Opale entre 1963* et 2000, source thèse de S. Chaverot, Université du littoral Côte d'Opale, 2006.

L'analyse de la carte montre une très grande variabilité spatiale au niveau de l'évolution du trait de côte depuis la seconde moitié du XX^{ème} siècle. Il existe des secteurs en progradation, notamment ceux situés entre le port de Calais et Grand-Fort-Philippe. La zone située entre les secteurs de Calais-Est et du Platier d'Oye a fortement progradé entre 1949 et 2000 avec une avancée moyenne supérieure à 150 m. Le littoral d'Oye Plage connaît maintenant une stabilisation depuis 1989. Quant au secteur situé entre le Fort Vert et Oye-Plage, son avancée moyenne a été inférieure à 50 m entre 1949 et 2000. L'Est de Dunkerque et Sangatte n'ont pas ou très faiblement évolué contrairement aux rivages d'Equihen-Sté Cécile, de la Slack ou de Wissant.

Pour se protéger contre les risques liés à la mer et notamment contre le risque d'érosion, la loi de 1807, en France, relative au « dessèchement des marais, aux travaux de navigation, aux routes, aux ponts, aux rues, places et quais dans les villes, aux digues et aux travaux de salubrité dans les communes » constitue une référence. Les riverains ont la responsabilité de se protéger tandis que l'Etat peut intervenir financièrement. Parallèlement à ces mesures de protection, les plans de prévention des risques (PPR) s'inscrivent dans une volonté d'amélioration de la sécurité des personnes et de limitation des dommages causés. La réglementation des PPR interdit l'aménagement de terrains et les constructions dans les zones d'aléas les plus forts. Prescrit par le Préfet et réalisé par les services de l'Etat, le PPR est annexé aux plans locaux d'urbanisme après concertation avec les élus locaux.

Ainsi le CETE Nord Picardie a-t-il été chargé par le SMBC de délimiter les zones basses littorales du Pas de Calais concernées par les risques naturels. Ont été pris en compte les phénomènes de recul du trait de côte correspondant à la disparition de zones érodées par la mer, de submersion marine et de recouvrement de sable à la suite d'un déplacement dunaire.

L'aléa relatif au recul du trait de côte a été cartographié à partir d'une évaluation du taux d'érosion moyen calculé par comparaison entre la position du trait de côte visible sur les photos aériennes IGN de 1947-1949 et celle observable sur les photos EUROSENSE de mai 2000. Ces données ont été corrigées avec des évolutions calculées sur des périodes plus lointaines. Seul l'aléa fort a été retenu pour ce type de phénomène.

Si des ouvrages ne figent pas le trait de côte, le recul de la zone après mise en place des protections est pris en compte. Si le trait de côte est figé, il n'y a pas de recul sauf si les ouvrages sont insuffisants (cas des cordons d'enrochement par exemple).

L'analyse des cartographies présentées montre également, à titre indicatif, la présence d'une zone d'aléa moyen de recul du littoral. Il s'agit en fait de la zone de recul potentiel du trait de côte derrière des défenses en dur type perré, béton en zone urbaine. Ceci a été représenté dans le but de mettre en évidence l'importance de ces ouvrages de protection assurant le maintien du trait de côte.

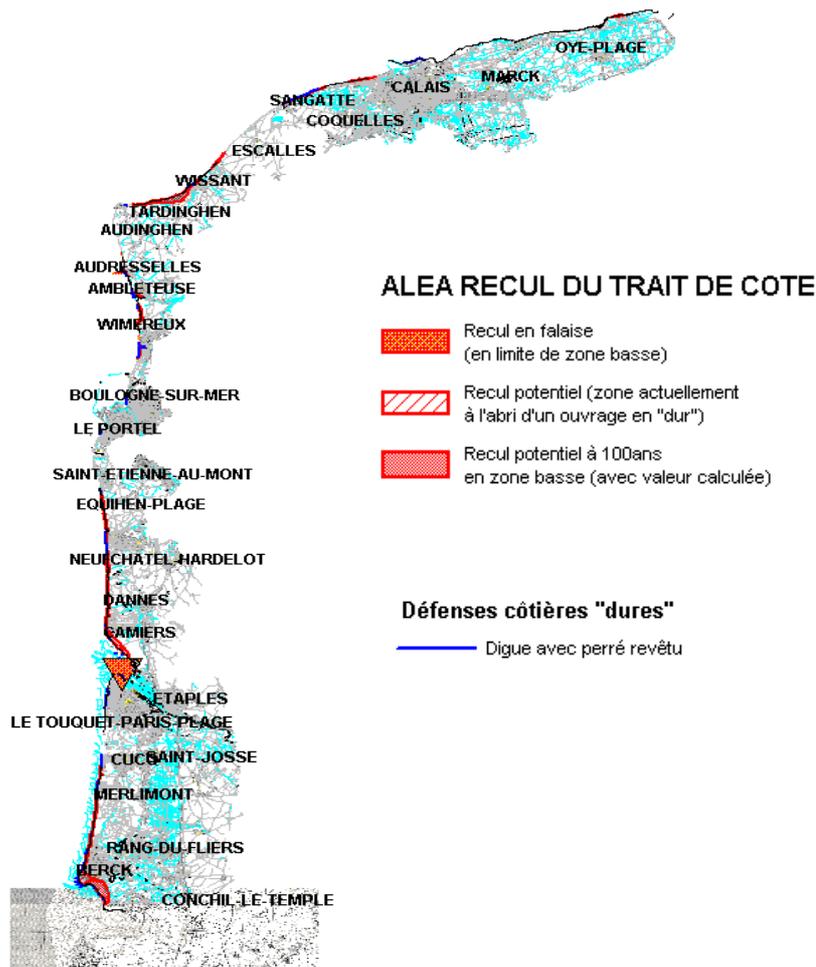


Figure 77 : Cartographie de l'aléa recul du trait de côte, source étude PPR Côtes basses meubles du Pas de Calais, 2006.

Les résultats obtenus concernant les zones fortement touchées par l'érosion, concordent globalement avec ceux de M. Chaverot et les résultats du PLAGE.

On observe, entre autres :

- Un recul de la zone Nord-Est de Sangatte avec des risques de brèches dans le cordon dunaire de l'extrémité Nord. Trois secteurs de 2000*70 m², 500*50 m² et 2500*60 m² sont concernés ;
- Une menace sur les marais de Tardinghen et la baie de Wissant ;
- Un recul de 0 à 180 m Rive Nord et dans le massif dunaire de la Slack avec un maximum pour la pointe aux Oies ;
- Un recul moyen de 0 à 80 m sur les communes de Saint Etienne au Mont, Neufchâtel Hardelot, Dannes et Camiers ;
- Un recul de 30 à 40 m vers Merlimont et d'une centaine de mètres vers Berck Nord.

Quant aux avancées dunaires, elles sont relativement difficiles à cartographier. Les observations concernant la présence de végétation sur les dunes et l'évolution des dunes mobiles ont permis de définir une zone d'aléa faible à moyen englobant la bande littorale comprise entre l'estran et l'extension maximale

de la dune en 1947-1949 et une zone d'aléa moyen regroupant l'ensemble des dunes mobiles. Il est par ailleurs proposé d'ajouter des zones où la réglementation interdira la fréquentation des cordons et imposera l'entretien de la dune par le propriétaire. L'étude de la zone concernée montre que les secteurs de Blériot-Plage, non loin de Calais, Stella Plage, Merlimont et Berck Nord sont particulièrement touchés.

C. Etude de l'aléa submersion marine

Les hauts niveaux marins, liés à la conjonction d'une tempête et d'une marée haute de vives-eaux, peuvent provoquer une brèche dans le cordon dunaire ou les ouvrages de protection, à l'origine d'inondations dans les zones arrière-littorales. La conjonction des phénomènes marégraphiques et météorologiques échappe à toute prévision et est possible à tout moment. Bien qu'il n'existe pas à l'heure actuelle d'études sur l'ensemble du littoral Nord – Pas de Calais, certains secteurs ont donc attiré l'attention d'organismes publics, privés ou d'universitaires. Nous recenserons, dans ce paragraphe, les études existantes et leurs principales conclusions.

1. L'étude PPR Côtes basses meubles du Pas de Calais

Comme nous l'avons mentionné au cours du paragraphe précédent, le CETE Nord Picardie a été chargé par le SMBC de cartographier l'aléa de submersion marine dans le cadre de l'étude PPR Côtes basses meubles du Pas de Calais.

La méthodologie employée consiste à confronter la topographie des zones littorales, notamment en arrière du cordon dunaire ou d'une digue, et un niveau maximal de la mer. Toute zone dont l'altitude est inférieure au niveau de la mer est submersible. Le CETE a travaillé en cotes IGN 69. Le niveau marin de référence intègre la marée et une surcote liée aux conditions climatiques.

A partir de ces données, une zone d'aléa de submersion fort à moyen a été définie comme une zone où des submersions sont prévisibles d'ici 10 ou 15 ans du fait de la proximité de la mer et d'un système de défense peu fiable. Ce sont essentiellement Oye-Plage, Sangatte et Tardinghen. Une zone d'aléa moyen est une zone basse comprise entre les zones d'aléa fort à moyen et les anciennes digues qui pourraient permettre de contrer en partie l'avancée des eaux. Les zones d'aléa faible sont quant à elles des zones dont l'altitude est située sous le niveau marin de référence mais sur lesquelles on ne connaît pas d'incursions marines récentes.

La cartographie obtenue est la suivante :

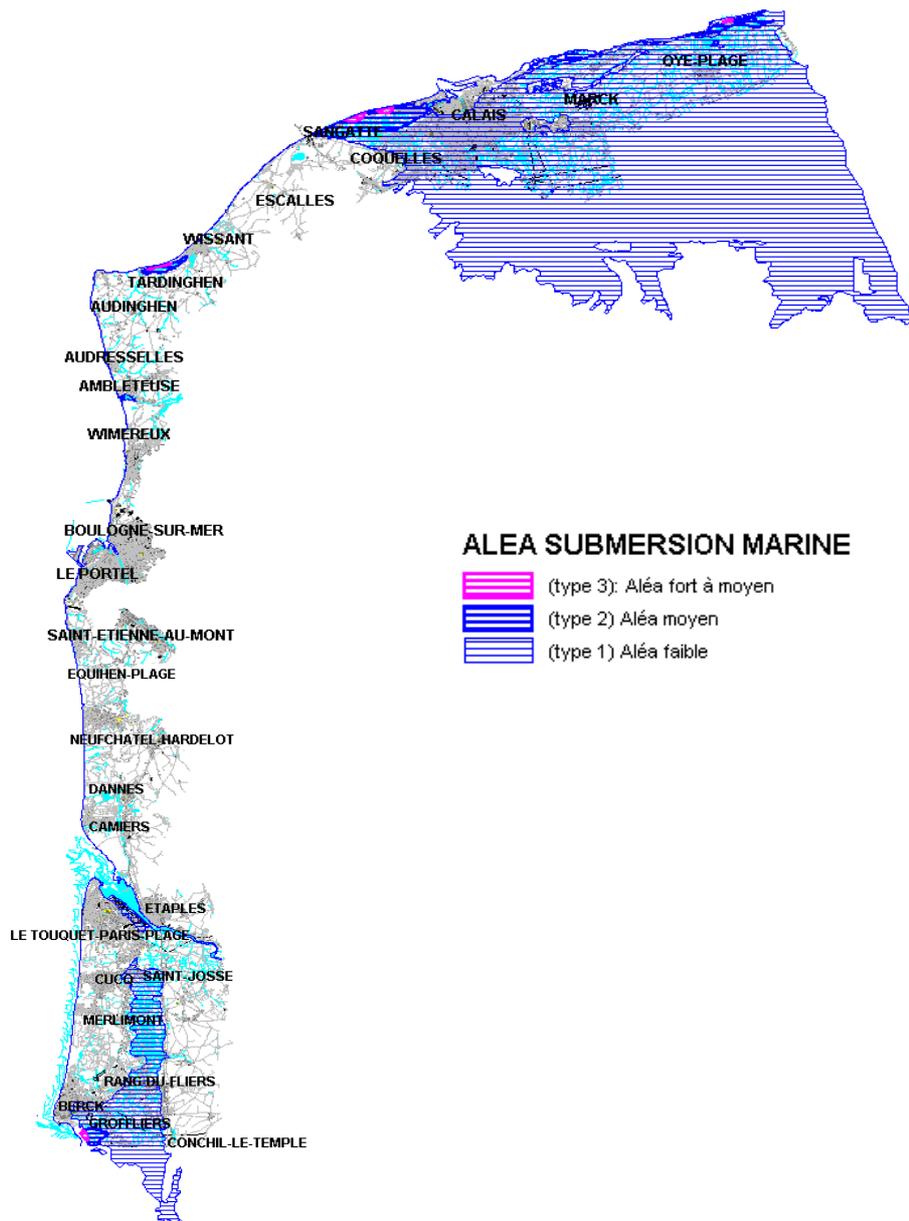


Figure 78 : Caractérisation de l'aléa de submersion marine sur le littoral du Pas de Calais, source étude PPR Côtes basses meubles du Pas de Calais, 2006

Il existe donc :

- Des zones d'aléa fort à moyen au niveau de Sangatte, Oye-plage, Berck Groffliers et Tardinghen.
- Un aléa moyen au niveau de Sangatte, Oye-Plage, Tardinghen, Calais en bordure du Watergang, de Bercq et Groffliers.
- Des zones d'aléa faible situées à des altitudes inférieures aux niveaux d'extrêmes mers comme par exemple au niveau des communes de Oye, Marck, Coquelles ou le Touquet.

2. L'étude de l'aléa de submersion marine à Sangatte

M. Chaverot, au cours de sa thèse, soutenue en Mai 2006 à l'Université du littoral Côte d'Opale dans laquelle il combine deux approches climatologique et géomorphologique pour appréhender les actions des forçages météo-marins sur le niveau d'eau et la réponse du trait de côte dans le secteur d'étude de la Côte d'Opale, a cartographié les zones potentiellement submersibles sur la commune de Sangatte, secteur particulièrement vulnérable, à partir des données de l'IGN. L'approche est purement topographique et prend l'hypothèse d'une importante brèche dunaire. Trois cartes correspondant à des cotes marines décennales (4.63 m IGN 69), cinquantennales (4.80 m IGN 69) et centennales (4.87 m IGN 69) ont été réalisées.

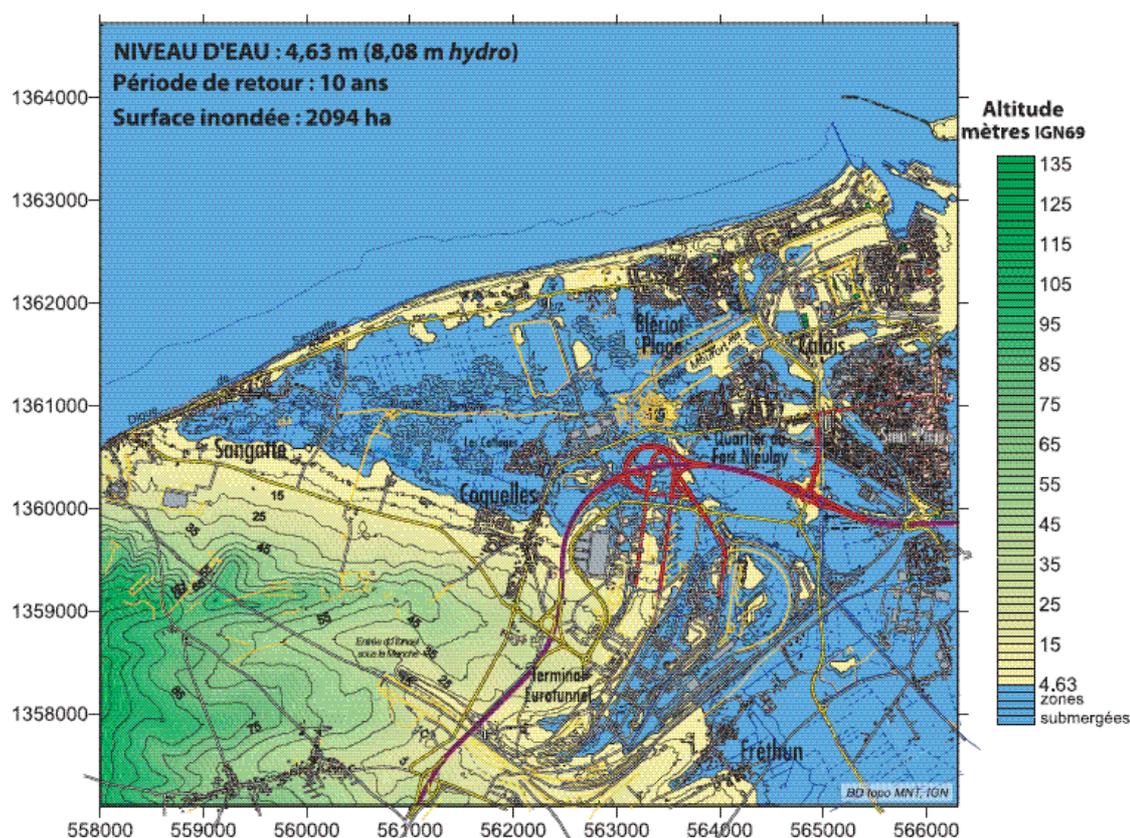


Figure 79 : Zones potentiellement submersibles sur la commune de Sangatte pour des niveaux d'eau de période de retour décennale, source thèse de S. Chaverot, Université du littoral Côte d'Opale, 2006.

Dans le cas d'une cote marine de fréquence de retour décennale, les secteurs pouvant potentiellement être touchés sont :

- L'est du bourg de Sangatte situé dans une partie basse,
- Blériot-plage et le village de vacances, situé à l'ouest le long de la D940 ;
- Les quartiers à l'ouest et au sud de Calais : Fort-Nieulay, Saint-Pierre, le Marais ;
- A Coquelles, le terminal d'Eurotunnel et la partie basse du bourg notamment le lotissement « Les Cottages » ;
- Le village de Fréthun.

Pour des niveaux d'eau de périodes de retour 50 et 100 ans, les surfaces potentiellement submergées augmentent.

Une approche hydraulique plus fine est toutefois nécessaire pour préciser les risques.

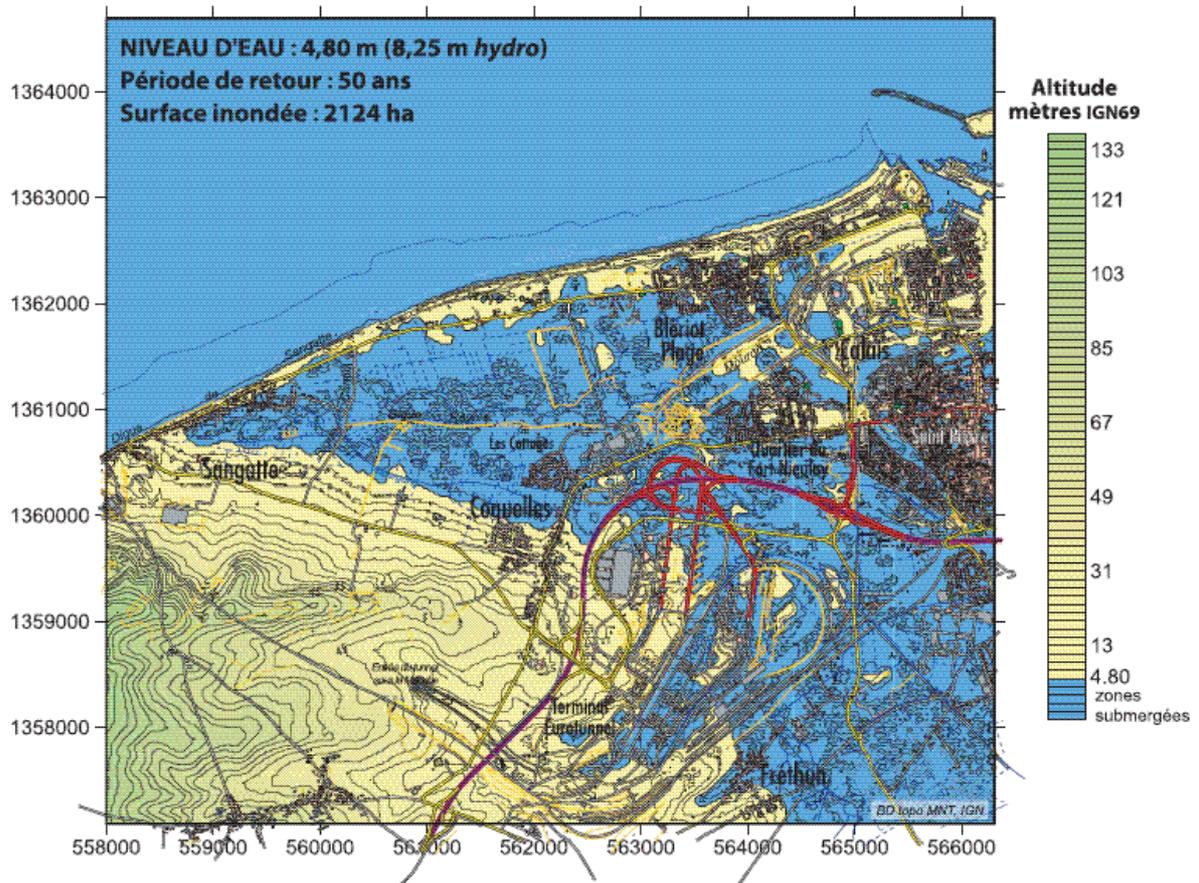


Figure 80 : Zones potentiellement submersibles sur la commune de Sangatte pour des niveaux d'eau de période de retour 50 ans, source thèse de S. Chaverot, Université du littoral Côte d'Opale, 2006.

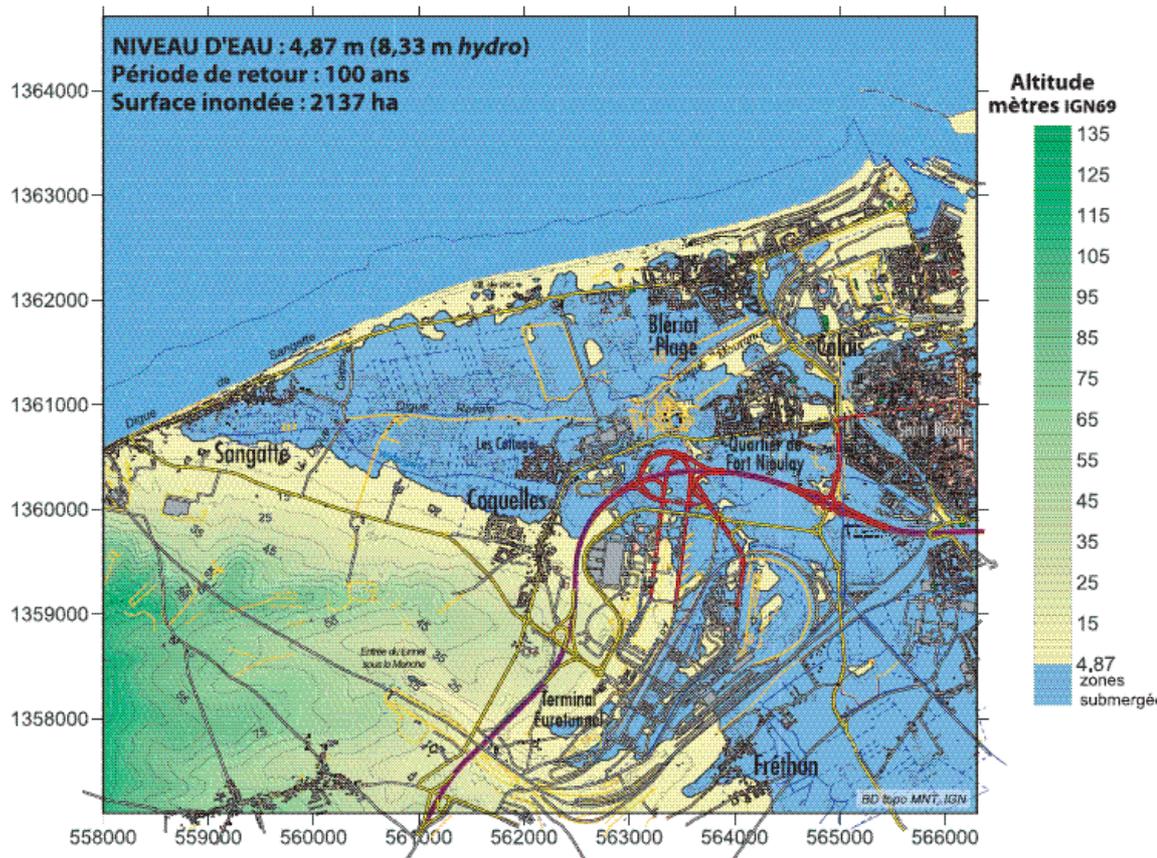


Figure 81 : Zones potentiellement submersibles sur la commune de Sangatte pour des niveaux d'eau de période de retour centennale, source thèse de S. Chaverot, Université du littoral Côte d'Opale, 2006.

Ces zones potentiellement submersibles risquent de plus de s'agrandir en raison du réchauffement climatique prévu pour les prochaines années.

Ces cartes concordent avec l'étude PPR Côtes basses meubles du Pas de Calais. La commune de Sangatte semble particulièrement vulnérable au risque de submersion si l'on s'en tient à la simple approche topographique.

3. L'aléa submersion marine dans un secteur de la région Dunkerquoise

Dunkerque présente un risque réel car un important secteur du Sud de la ville est situé sous le niveau des plus hautes mers. Avec le réchauffement climatique prévu au cours du XXI^{ème} siècle, le risque de submersion marine pourrait s'accroître et c'est dans ce contexte que M. Suret a réalisé en 2006 une étude assez précise sur le littoral dunkerquois, destinée à être intégrée dans le Plan Communal de Sauvegarde de la Communauté Urbaine de Dunkerque.

Les limites d'étude sont, à l'ouest, le canal de Bergues, au sud le canal de la Basse Colme et à l'Est la frontière franco-belge.

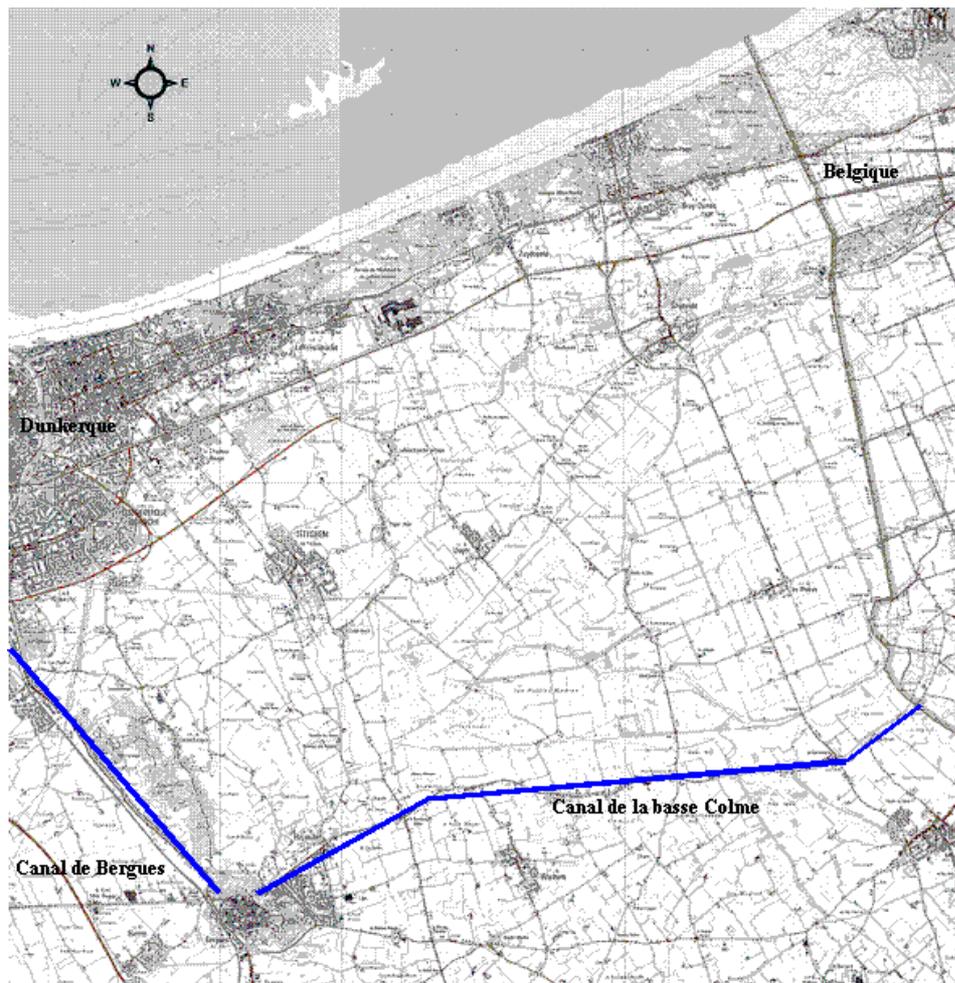


Figure 82 : Secteur d'étude de M. Suret. Le fond de carte est issu de la BD topo de l'IGN, source mémoire de B. Suret, Communauté Urbaine de Dunkerque, 2006

En croisant les données du SHOM et celles de M. Chaverot, il a déterminé les niveaux marins correspondant aux périodes de retour suivantes :

- à une période de retour de 1 an correspond un niveau d'eau de 3,70 m IGN 69 ;
- à une période de retour de 10 ans correspond un niveau d'eau de 4,30 m IGN 69 ;
- à une période de retour de 50 ans correspond un niveau d'eau de 4,55 m IGN 69 ;
- à une période de retour de 100 ans correspond un niveau d'eau de 4,65 m IGN 69.

Il a ensuite utilisé les mesures topographiques existantes sur la zone urbaine et relevées par ses propres soins sur la zone arrière-littorale pour établir des cartes de zones inondables par submersion marine pour des eaux dont les périodes de retour ont été définies précédemment. L'approche est à nouveau purement topographique, prend l'hypothèse d'une brèche dunaire ou d'une incursion marine de très grande ampleur ; les résultats doivent donc être regardés avec la plus grande prudence.

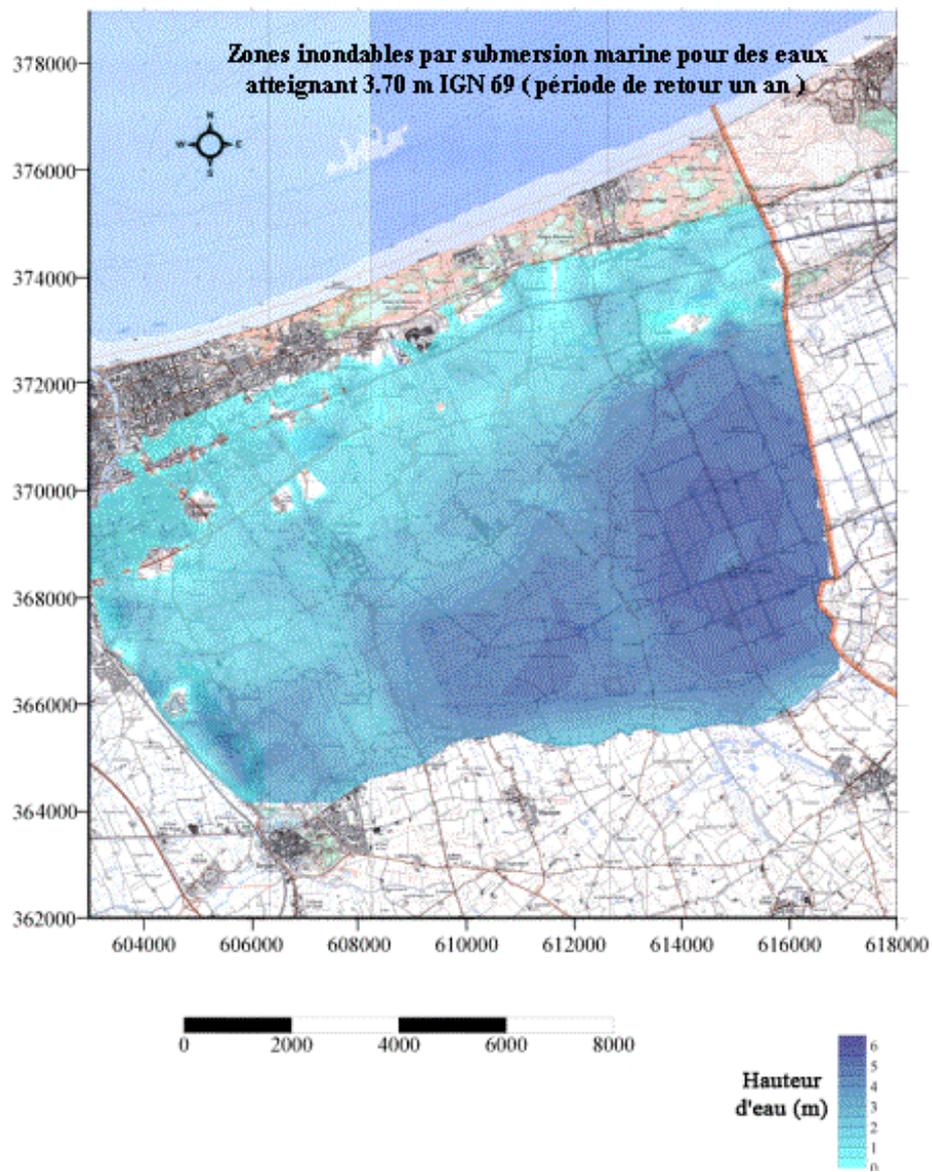


Figure 83 : Cartographie des zones POTENTIELLEMENT inondables dans le secteur d'étude pour une période de retour annuelle des niveaux d'eau et en prenant certaines hypothèses hydrauliques très défavorables, source mémoire de B. Suret, Communauté Urbaine de Dunkerque, 2006

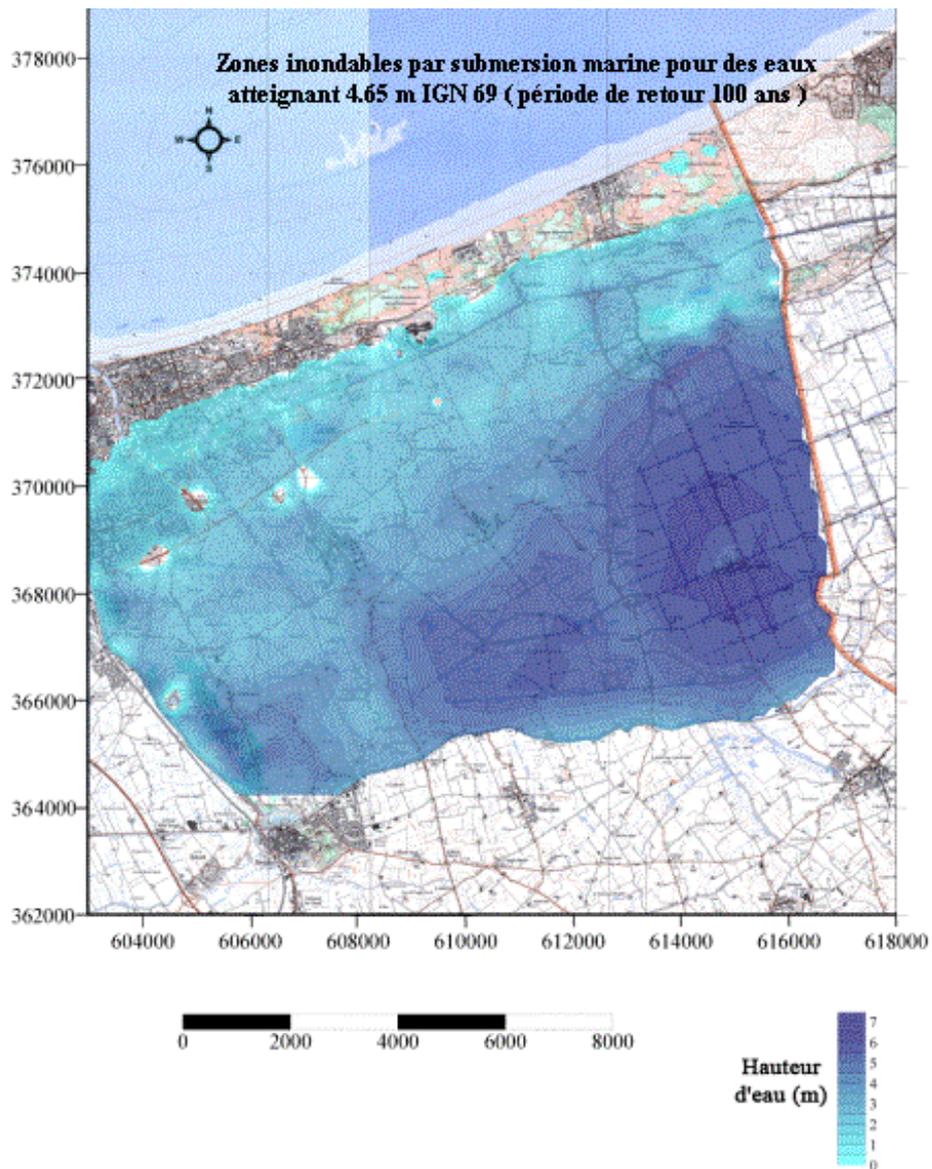


Figure 84 : Cartographie des zones POTENTIELLEMENT inondables dans le secteur d'étude pour une période de retour 100 ans des niveaux d'eau et en prenant certaines hypothèses hydrauliques très défavorables, source mémoire de B. Suret, Communauté Urbaine de Dunkerque, 2006

Ces cartes permettent de se rappeler que le niveau des Moères se situe entre 6 et 7 mètres sous le niveau des plus hautes mers.

4. Les cartographies des zones inondées constatées

Parallèlement à ces études, les DDE du Nord et du Pas de Calais ont recensé les zones inondées constatées en faisant un état des lieux des dommages causés et, lorsque c'était possible une description des causes de l'inondation.

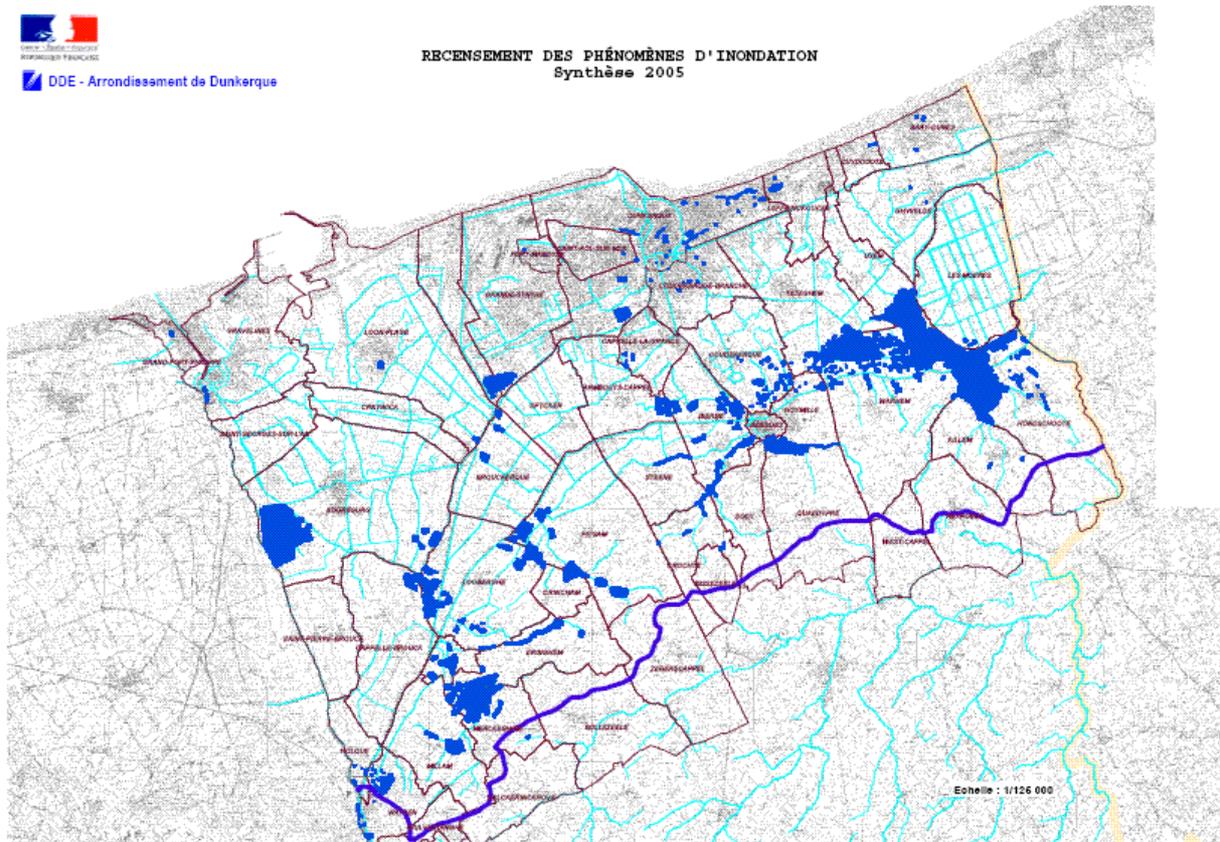


Figure 85 : Exemple de cartographie des zones inondées constatées dans le secteur de Dunkerque, source DDE du Nord, 2006.

Si ces documents doivent être utilisés par les collectivités territoriales ou l'Etat pour l'évaluation des risques sur le territoire ou pour l'aménagement du territoire, ils sont à interpréter avec précaution. Certains événements sont exceptionnels, parfois liés à des situations accidentelles comme une panne de pompage. Toutefois, si l'on venait à ne pas prendre en compte ce type d'événements, il ne faudrait pas qu'il y ait une carence de connaissance au niveau des risques. Il faut donc trouver un juste compromis pour tenter de maintenir un risque acceptable sur l'ensemble du territoire.

D. Une première étude sur les aléas côtiers à l'horizon 2100

Les études des aléas côtiers présentées se doivent d'être régulièrement ajustées suite notamment aux effets du changement climatique prévus pour les prochaines années, les zones potentiellement submersibles risquant par exemple de s'agrandir.

Afin d'anticiper ces aléas, une première étude prenant en compte les impacts du changement climatique a été menée pour le Conservatoire du Littoral de 2002 à 2004. Elle s'intitule *Impact du changement climatique sur le patrimoine du Conservatoire du littoral, scénarios d'érosion et de submersion à l'horizon 2100*.

1. L'aléa érosion

a. La méthodologie employée

Pour caractériser l'aléa érosion à l'horizon 2100, il est possible de modéliser les différents processus qui concourent à l'évolution du trait de côte, à savoir les tempêtes, le niveau de la mer, les phénomènes météo-marins, les courants littoraux, le stock sédimentaire disponible et les actions humaines. Il faut alors avoir recours à des modèles mathématiques intégrant ces paramètres et leurs interactions, ce qui n'est pas chose facile surtout lorsque des données quantifiées précises manquent.

La méthodologie employée est alors une étude prévisionnelle de l'évolution du trait de côte par érosion ou progradation. Il s'agit d'une méthode historique qui consiste à retracer le comportement d'un rivage dans le passé pour en prévoir son évolution dans le futur. Elle est fondée sur l'analyse diachronique de cartographies et de photographies aériennes par traitement informatique. On estime que les données obtenues présentent une marge d'erreur de +/- 8 mètres dans la position du trait de côte. Les cartographies réalisées ne prennent bien souvent pas en compte l'élévation du niveau marin car la formule de Bruun qui permet de calculer la valeur de recul du rivage lorsque l'on connaît la vitesse d'élévation de la mer est difficilement applicable. La loi de Bruun ne s'applique, en effet, qu'aux côtes sableuses et est basée sur l'hypothèse que le profil transversal côtier cherche à maintenir un état d'équilibre avec le régime local de houle, ce qui signifie que l'énergie des houles est suffisamment importante pour éroder, transporter et redistribuer les sédiments dans le profil. Les valeurs présentées de recul du trait de côte sont donc minimales.

La méthodologie employée pour calculer le recul des falaises est la même, mis à part le recours à la formule de Bray et Hooke pour prendre en compte une élévation du niveau marin de 44 cm d'ici 2100. Les résultats obtenus sont bien sûr entachés d'incertitudes car l'action des eaux d'infiltration ou du gel contribue également au recul des falaises.

b. Les conclusions pour le Nord – Pas de Calais

La façade du Nord – Pas de Calais est particulièrement exposée aux phénomènes d'érosion. La mer pourrait s'avancer de 363 ha dans le Pas de Calais d'ici la fin du siècle.

A des fins de comparaison, le Conservatoire du Littoral détient actuellement 213 ha sur le site de la baie d'Authie et 235 ha sur le site de la Baie de Somme. Le site des Garennes de Lornel en baie de Canche est particulièrement exposé. Il est susceptible de perdre 55.2 % de son étendue, soit 231 ha. Le bilan pour la Somme apparaît par contre positif. 57.6 ha pourraient être gagnés sur la mer grâce à la progradation de la flèche de Routhiauville sur le site de la dune de l'Authie. Cette dune pourrait gagner 68 ha, soit 43 %, pour sa partie déjà acquise par le Conservatoire du Littoral et 74 ha, soit 44 % pour celle dont l'achat est prévu. Le site localisé sur la flèche du Hourdel devrait gagner 30 ha dans les limites de son extension future, ce qui correspond à une augmentation de 26 % par rapport à sa surface actuelle.

Globalement, les résultats obtenus par l'étude du conservatoire du littoral sont les suivants :

Façade	Sites acquis		Patrimoine futur	
	Surface érodable en 2100 (ha)	Surface érodable / Surface renseignée	Surface érodable en 2100 (ha)	Surface érodable / Surface renseignée
Nord	35	5,60 %	40	2,70 %
Pas de Calais	362,9	16,30 %	470,8	6,90 %

Tableau 14 : Bilan de l'exposition à l'érosion pour les sites du Conservatoire du Littoral du secteur Nord – Pas de Calais – Picardie, source rapport du Conservatoire du Littoral, Scénarios d'érosion et de submersion à l'horizon 2100, 2005

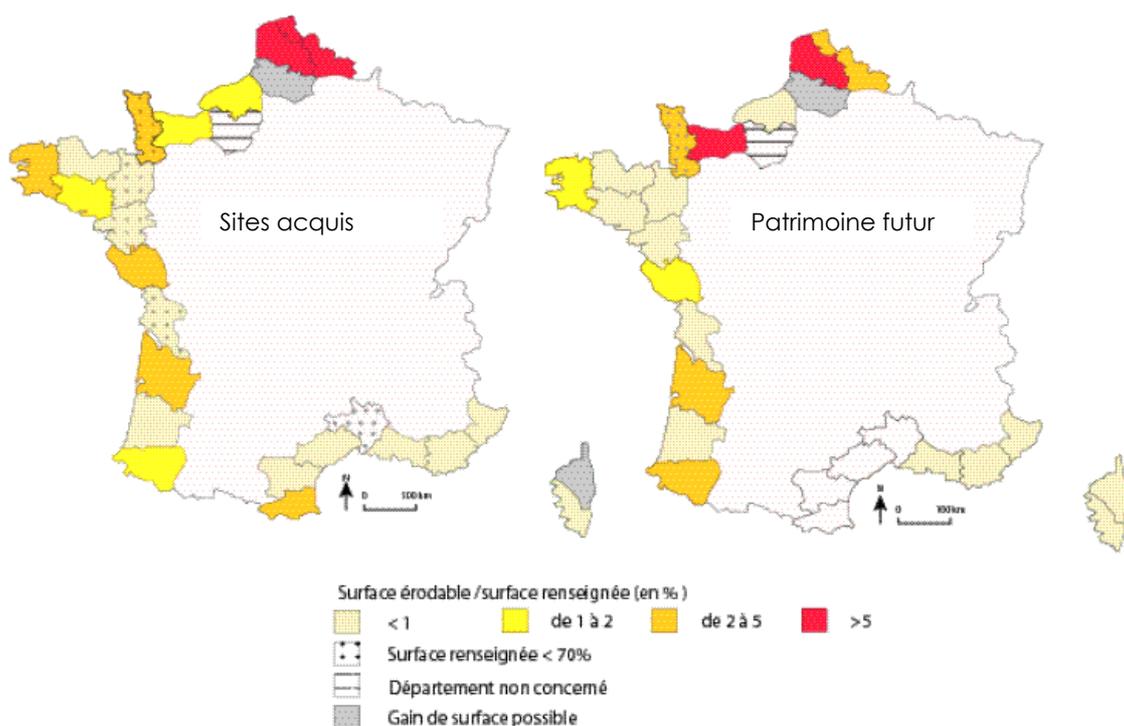


Figure 86 : Evolution de l'exposition à l'érosion par département, source rapport 2005 du Conservatoire du Littoral Scénarios d'érosion et de submersion à l'horizon 2100

2. L'aléa submersion marine

a. La méthodologie employée

L'aléa de submersion marine a été étudié grâce à une approche topographique en tenant compte, dans certains cas, des protections naturelles. Les altitudes des terrains ont été confrontées aux cotes des plus hautes mers prévisibles. Pour les zones de polders, la hauteur de l'ouvrage est comparée à la cote des pleines mers de vives-eaux actuelles majorée d'éventuelles surcotes, de la montée probable du niveau marin de 44 cm à l'horizon 2100 et de la montée du jet de rive accrue par diminution de la réfraction de la houle, suite à l'augmentation des

profondeurs. L'état des ouvrages a également parfois été pris en compte. Enfin, les cartographies tiennent compte d'inondations importantes comme celles de 1990 dans les Bas-Champs picards.

L'étude ne prend par contre pas en compte les effets des submersions, comme la remontée des nappes phréatiques et les difficultés de drainage des basses terres.

b. Les conclusions pour le Nord – Pas de Calais

Dans les limites du territoire actuel détenu par le Conservatoire du Littoral, 88 ha des sites non endigués pourraient être épisodiquement submergés. Les sites particulièrement touchés seraient ceux de la Dune d'Aval et de la Dune Dewulf. Cette superficie pourrait atteindre 134 ha suite à l'acquisition de terrains supplémentaires par le Conservatoire du Littoral. Ces submersions seraient la conséquence de la rupture du cordon dunaire. Pour la Somme, à l'exception du Hâble d'Ault dont la surface inondable n'a pas pu être quantifiée, les sites ne semblent pas être touchés par cet aléa à l'horizon 2100.

Façade	Sites acquis		Patrimoine futur	
	Surface inondable en 2100 (ha)	Surface inondable / Surface renseignée	Surface inondable en 2100 (ha)	Surface inondable / Surface renseignée
Nord	57,3	9,2 %	58,8	3,9 %
Pas de Calais	31,2	1,2 %	75,7	1 %

Tableau 15 : Bilan de l'exposition à la submersion pour les sites non endigués du Conservatoire du Littoral du secteur Nord – Pas de Calais – Picardie, source rapport du Conservatoire du Littoral, Scénarios d'érosion et de submersion à l'horizon 2100, 2005

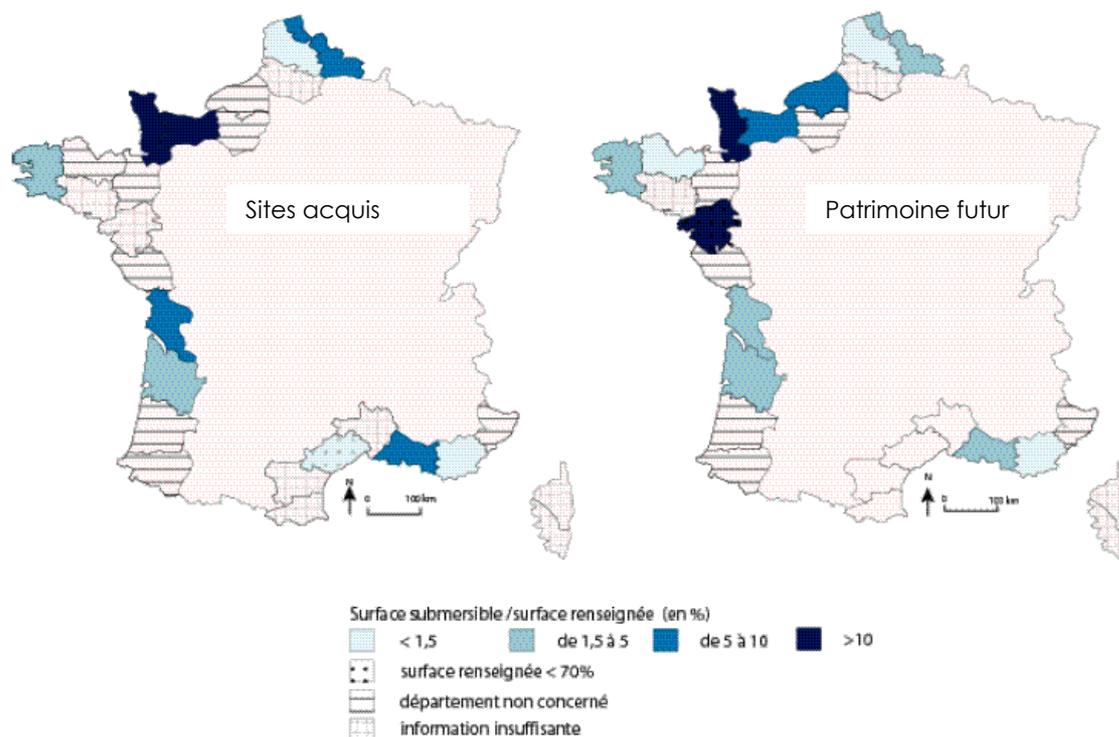


Figure 87 : Evolution de l'exposition à la submersion des sites non endigués par département, source rapport du Conservatoire du Littoral, Scénarios d'érosion et de submersion à l'horizon 2100, 2005

Quant aux sites endigués, le Conservatoire du Littoral est actuellement propriétaire de 266 ha de renclôtures. Ce chiffre pourrait augmenter de 1844 ha d'ici 2100 avec une grande majorité des terrains peu exposés à l'élévation du niveau marin dans les baies de Somme et d'Authie. Seuls 5 % de la surface endiguée du patrimoine futur devrait être vulnérable face à l'aléa de submersion marine, notamment en Rive Sud de la Baie d'Authie.

Globalement les résultats fournis par l'étude du Conservatoire du Littoral de 2005 sont les suivants :

Façade	Sites acquis		Patrimoine futur	
	Surface submersible en 2100 (ha)	Surface submersible / Surface renseignée	Surface submersible en 2100 (ha)	Surface submersible / Surface renseignée
Nord	57,3	9,2 %	58,8	3,9 %
Pas de Calais	31,2	1,2 %	236,7	3,2 %

Tableau 16 : Bilan de l'exposition à la submersion pour l'ensemble des sites du Conservatoire du Littoral du secteur Nord – Pas de Calais – Picardie, source rapport du Conservatoire du Littoral, Scénarios d'érosion et de submersion à l'horizon 2100, 2005

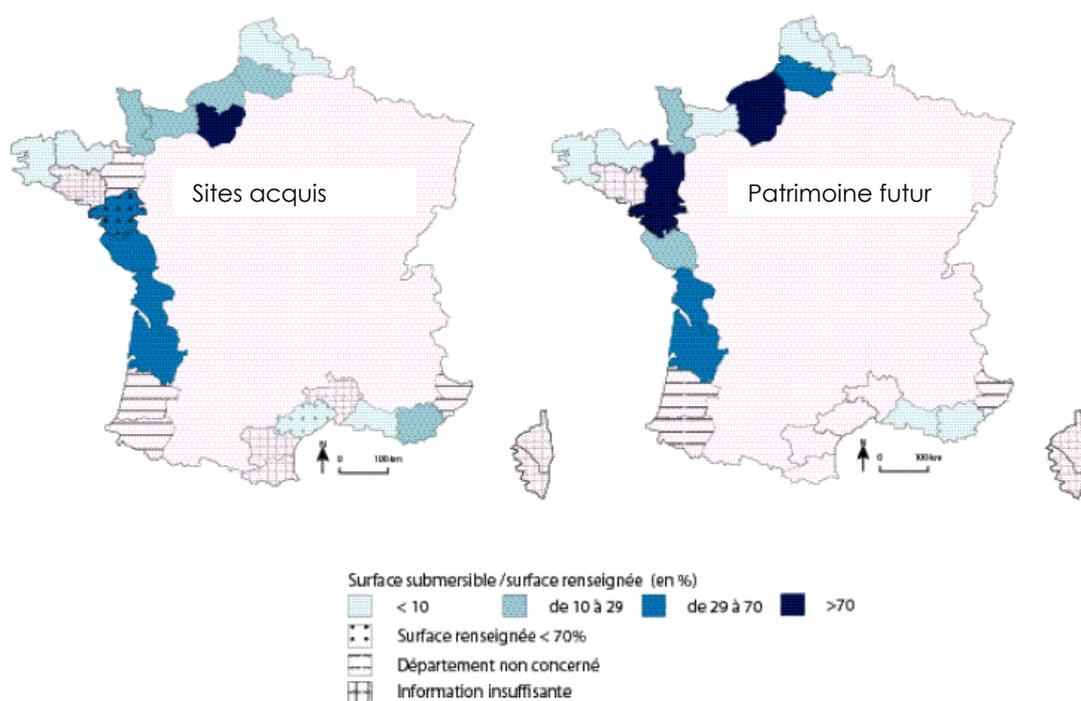


Figure 88 : Evolution de l'exposition à la submersion de l'ensemble des sites par département, source rapport du Conservatoire du Littoral, Scénarios d'érosion et de submersion à l'horizon 2100, 2005

III. Discussion sur les difficultés et la fiabilité des résultats obtenus

L'ensemble des résultats présentés est à interpréter avec précaution car il existe de nombreuses sources d'incertitudes liées notamment aux imprécisions dues à la qualité et à la quantité des données.

Prenons l'exemple de la thèse de M. Chaverot. Les données climatologiques, issues de trois stations météorologiques situées à Boulogne-sur-Mer, Calais et Dunkerque comportent des lacunes, en général inférieures à 4 % pour la force et la direction des vents et à 9 % pour les données de pression atmosphérique. Si cela ne nuit en général pas à la qualité des observations, ces mesures sont à interpréter avec prudence compte tenu de l'interruption de relevés pour la station de Calais Marck par exemple, de changements de capteurs ou de nouvelles pratiques d'observations.

Les données marégraphiques sont, quant à elles, le résultat de mesures de niveaux d'eau observés et enregistrés dans les ports de Boulogne-sur-Mer, Calais et Dunkerque. Ces hauteurs sont issues de l'action combinée de la marée astronomique prédite et des conditions météorologiques. Les incertitudes viennent essentiellement des périodes de non observations, comme l'illustre le graphique ci-dessous, ainsi que de la faible étendue temporelle des données.

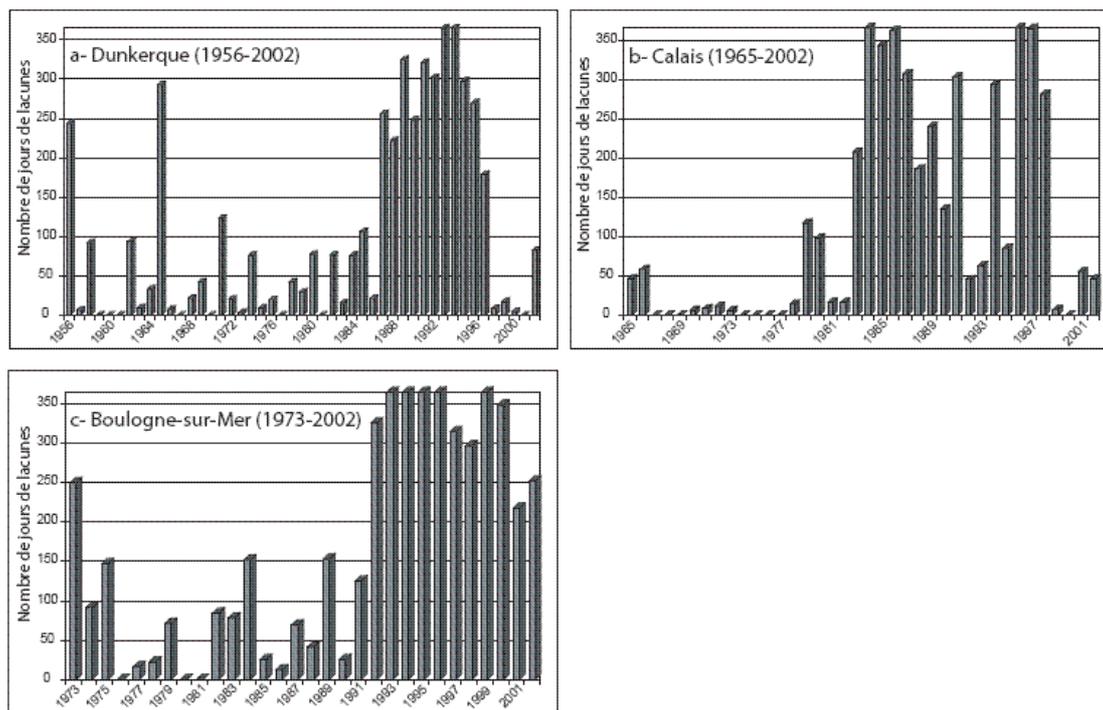


Figure 89 : Répartition annuelle des lacunes marégraphiques des trois ports de la Côte d'Opale.

Source thèse de S. Chaverot, Université du littoral Côte d'Opale, 2006

La fiabilité des résultats obtenus dépend également des hypothèses prises dans les modèles. L'approche pour caractériser l'aléa de submersion marine est souvent simpliste dans la mesure où elle se limite à une étude topographique dont

les données ne sont, par ailleurs, pas toujours d'une grande précision. De plus, la plupart des documents présentés ne tient pas compte de l'état des ouvrages de défense, voire de leur existence. Enfin, pour les modèles tenant compte des effets du changement climatique, il est souvent difficile d'estimer de manière précise l'évolution des paramètres climatiques, et ce surtout à l'échelle régionale, en raison notamment de la variabilité propre du climat sur le long terme, la capacité des hommes à ralentir ou au contraire à accélérer le réchauffement et les variations locales du niveau marin.

Ces incertitudes conduisent parfois à des divergences d'opinions au sein du monde de la recherche. Ainsi, à titre d'exemple, le PLAGÉ considère-t-il le risque de submersion sur le secteur de Wissant comme improbable à court terme et faible à moyen terme alors que l'Université du Littoral Côte d'Opale le considère comme un risque réel.

Forte de ces constatations, le préfet de la région Nord – Pas de Calais a lancé en mai 2006 un programme de travail visant à préciser les aléas côtiers liés à l'érosion et aux submersions marines aux horizons 2050 et 2100 grâce notamment à une étude topographique fine par méthode LIDAR et à une étude Visite Simplifiée Comparée (VSC) effectuée par le CETE Nord- Picardie qui classe les ouvrages en fonction de critères techniques et stratégiques. Au cours de ce programme, supervisé par la DIREN, la question de la régionalisation du changement climatique dans le Nord – Pas de Calais sera également examinée, pour tenter de déterminer des évolutions possibles du régime des houles, des surcotes extrêmes, des vents et des conditions météorologiques. La présente synthèse bibliographique s'inscrit dans cette étude.

IV. Conclusion

La Côte d'Opale est donc un secteur complexe en raison notamment de la présence de deux façades maritimes d'orientations différentes et de deux mers reliées entre elles par un détroit avec de forts courants de marée. L'espace intertidal y est relativement large et soumis à des vagues courtes de faible énergie, influencées par des perturbations météorologiques. Dans un tel contexte, l'étude des aléas naturels littoraux aux horizons 2050 et 2100 est relativement difficile, d'autant que de nombreuses incertitudes demeurent, notamment en ce qui concerne les effets régionaux du changement climatique. Les quelques études locales actuelles ont toutefois permis de définir des grandes orientations de gestion pour la Côte d'Opale.

D'après l'étude PLAGE, le maintien du trait de côte est préconisé sur la moitié du littoral du Nord – Pas de Calais, notamment par le recours aux ouvrages de défense lourde sur 30 % de celui-ci. Les milieux naturels sans risques représentent 1/3 du littoral. Aucune intervention n'est envisagée dans ces secteurs. Enfin, pour le linéaire restant, la solution de composition est retenue, ce qui signifie que l'on trouve un compromis entre diminuer la sensibilité du littoral à l'érosion et adapter l'occupation du sol. Pour les secteurs à risques faibles, il convient d'atténuer légèrement les phénomènes d'érosion pour avoir suffisamment de temps pour mettre en place des mesures appropriées, comme le déplacement d'une partie des équipements. Si les risques sont moyens, il convient de retarder le plus longtemps possible l'adaptation de l'occupation du sol et donc de réduire les phénomènes d'érosion.

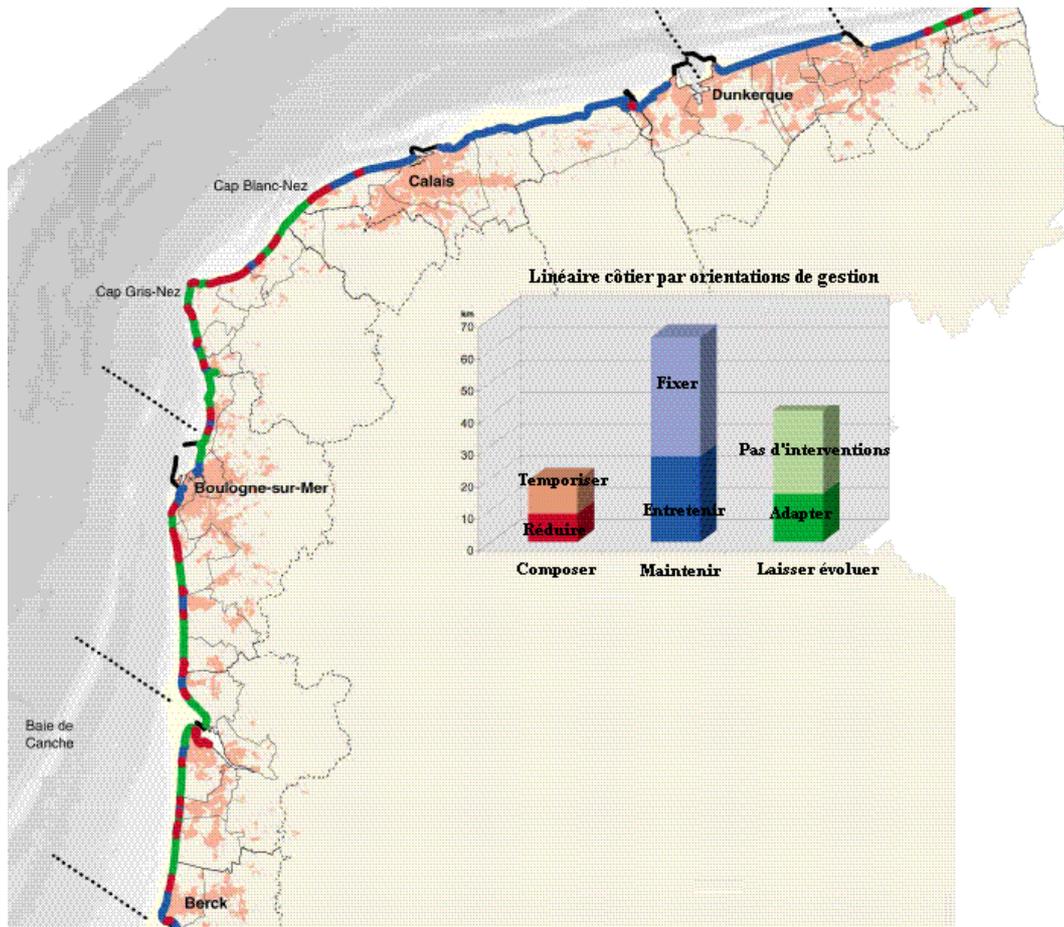


Figure 90 : Linéaire côtier par orientation de gestion, source Plan Littoral d'Actions pour la Gestion de l'Erosion (PLAGE), 2006.

Ces différentes stratégies ont bien sûr un coût. A titre d'information, les investissements engagés, pour la région Nord – Pas de Calais, dans les ouvrages de défense contre la mer sont estimés à 11 millions € entre 1984 et 1994. Les frais d'entretien pourraient quant à eux être évalués, pour cette même période, à des chiffres compris entre 840 000 et 915 000 €. La fixation des dunes par la plantation d'oyats et autres brise-vents est estimée à 2.18 millions € tandis que l'acquisition foncière par le Conservatoire du Littoral et les Conseils Généraux du Nord et du Pas de Calais, qui contribue par ailleurs à la lutte préventive contre l'érosion, est évaluée à 305 000€.

Bilan de la période 1984 - 1994

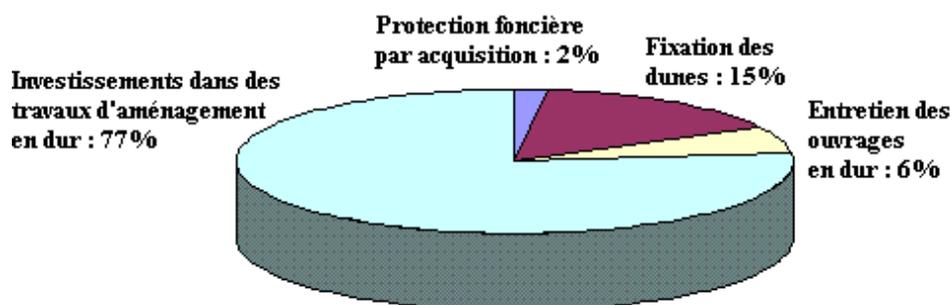


Figure 91 : Coût de dix années de protection du littoral contre l'érosion dans le Nord – Pas de Calais, source Plan Littoral d'Actions pour la Gestion de l'Erosion (PLAGE), 2003.

Pour la période 2003 – 2008, 10 à 12 millions € pourraient être nécessaires, d'après l'étude PLAGE. Ce coût pourrait s'élever en raison de réparations éventuelles sur des digues et perrés qu'il est difficile de chiffrer. Il faut également ajouter l'accompagnement général, les expertises ainsi que les actions de suivi et d'actualisation du PLAGE. La mobilisation de ces fonds pourrait se faire au titre du Contrat de Plan Etat-Région ou grâce à des fonds structurels européens. Charge ensuite à l'Etat, au Conseil Régional, aux Conseils Généraux et au Syndicat Mixte de la Côte d'Opale de coordonner la mobilisation de ces enveloppes financières.

L'étude des aléas côtiers dans la région Nord – Pas de Calais a donc mis en évidence la réelle complexité de l'analyse qui ne s'arrête pas aux frontières géographiques du pays. Dans ce contexte, le partage de connaissances et d'expériences avec nos voisins européens est indispensable pour progresser et trouver des solutions de gestion durable adaptées aux problèmes locaux. Ainsi le chapitre 3 aborde-t-il quelques exemples nationaux et internationaux en matière de protection contre les aléas côtiers.

Chapitre 3

La protection contre les aléas côtiers : quelques exemples nationaux et internationaux

I. La nécessité d'échanger

A. La création de réseaux régionaux, nationaux et internationaux

1. Aux niveaux nationaux et régionaux

L'étude des différents projets en cours sur la question des risques côtiers montre, jusqu'à un passé récent, une insuffisante coordination entre les acteurs compétents de la région Nord – Pas de Calais. Les initiatives étaient relativement indépendantes mais témoignaient de l'intérêt porté à cette problématique tant au sein de la recherche, des collectivités territoriales et des services de l'Etat. De plus, les acteurs impliqués dans l'étude des risques côtiers semblaient méconnaître les travaux et l'expérience de nos partenaires étrangers sur cette question, parfois tout simplement en raison de la langue. Ces constats avaient été pointés par le rapport de M. Batel en 2005.

Si aujourd'hui, la connaissance des risques a progressé, il s'agit désormais de l'intégrer aux politiques mises en place pour la gestion du trait de côte. Citons par exemple le port autonome de Dunkerque et les collectivités locales.

Forte des conclusions de ce rapport, la DIREN Nord – Pas de Calais a souhaité, dans son étude de caractérisation de l'aléa de submersion marine intégrant les conséquences du changement climatique, tirer profit des travaux réalisés dans la région, à l'échelle nationale et à l'étranger. Elle a donc débuté le projet par une étude bibliographique et un recensement des groupes de réflexion et projets d'études existant sur le sujet. Ce paragraphe vise essentiellement à les expliciter.

a. Au sein de la recherche

A l'échelle internationale, le projet franco-britannique **Beaches at Risk** (BAR) rassemble des universitaires normands, nordistes et anglais. Il a pour objectif principal l'augmentation des connaissances et la diffusion des bonnes pratiques en terme de gestion côtière. Il vise notamment à identifier les plages et les dunes les plus vulnérables face au risque d'érosion ainsi que leur sensibilité face à l'élévation du niveau de la mer et à l'accentuation des tempêtes. Le projet a débuté en 2003 et devrait s'achever courant 2007.

La France fait également partie des projets CoPraNet, COREPOINT et ENCOR. Le projet **CoPraNet** (Coastal Practice Network) est un projet de trois ans qui s'est achevé fin 2006. Il a pour objectif principal la mise en place d'un réseau d'échange d'informations et d'expériences, d'une part pour favoriser le développement d'approches de type GIZC et d'autre part pour faciliter la diffusion de connaissances relatives aux modes de gestion du tourisme durable, de l'érosion côtière et des plages.

Le projet Européen **COREPOINT** (Coastal REsearch POLicy INTegration) est quant à lui né suite à une prise de conscience du manque d'échanges et de coordination entre décideurs politiques et centres de recherche, du manque d'engagement des autorités compétentes et du grand public, ainsi que de la constatation de progrès inégaux en matière de GIZC entre les différents pays d'Europe du Nord-Ouest.

L'objectif de ce projet, qui a débuté en novembre 2004 et devrait s'achever en avril 2008, est de faire de l'Europe du Nord-Ouest une région d'excellence en matière de Gestion Intégrée des Zones Côtières.

Enfin, le projet européen **ENCORA** (European Network for Coastal Research Coordination Action), piloté par le Rijkwaterstaat, souhaite faire coopérer les organismes de recherche côtière européens et la Communauté des Praticiens sur les thématiques de la Gestion Intégrée des Zones Côtières. ENCORA est un réseau de réseaux nationaux connectés entre eux par l'étude de problématiques côtières diverses. Il est financé par l'Union Européenne pendant trois ans à compter de février 2006.

Le projet **RESPONSE**, quant à lui soutenu par le programme LIFE Environnement de la Commission Européenne, vise à développer une méthodologie pour cartographier l'évolution des côtes ainsi que les risques côtiers au Royaume-Uni, en France et en Italie en intégrant les paramètres du changement climatique.

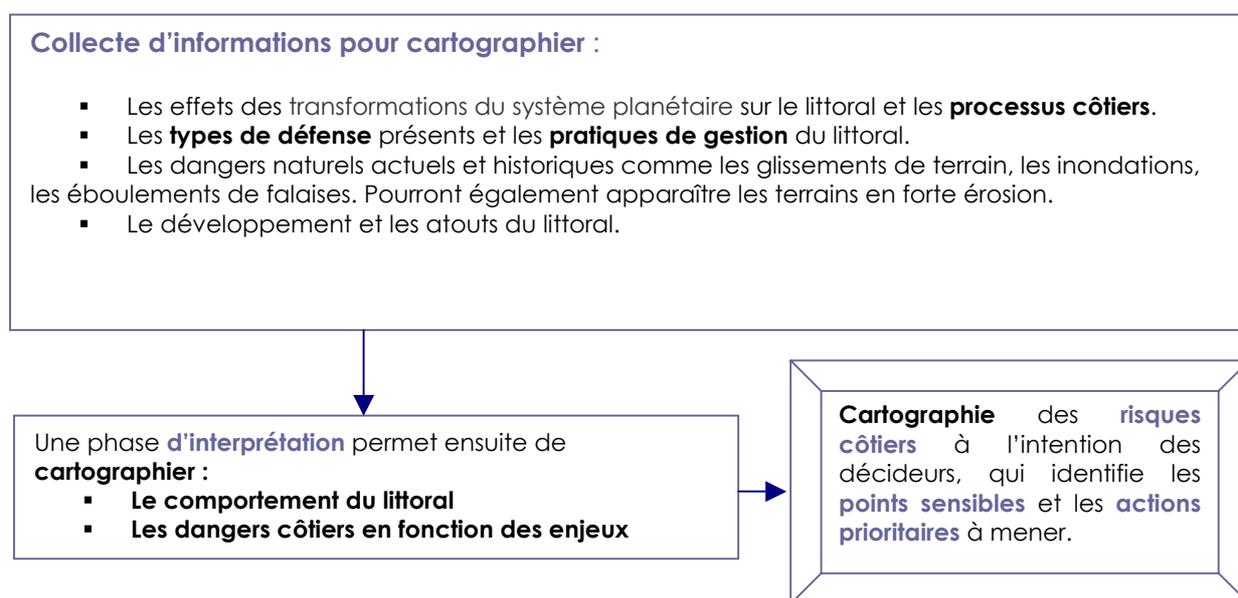


Figure 92 : La méthodologie de cartographie des risques et de l'évolution côtière du projet RESPONSE prenant en compte les effets du changement climatique. Elle est actuellement testée sur les littoraux de la Manche, de la Mer du Nord au niveau de la côte du Comté du Yorkshire, de l'Océan Atlantique, de la Mer Méditerranée et de la Mer Adriatique. Source site Internet http://www.coastalwight.gov.uk/r_fr_news.htm.

Mené par le Centre pour l'Environnement Littoral de l'île de Wight de septembre 2003 à septembre 2006, le projet **RESPONSE** a également pour objectif l'évaluation des coûts actuels et prévisionnels de la gestion des risques côtiers.

Enfin, le projet **EUROSION**, mené par la Direction pour l'environnement de la Commission Européenne à l'initiative du Parlement Européen, s'est achevé en 2004. Les rapports rendus incluent une évaluation cartographique de la vulnérabilité des côtes européennes au risque d'érosion côtière, une étude sur les pratiques existantes de gestion du trait de côte, un ensemble de guides pratiques pour une meilleure prise en compte du risque d'érosion côtière, en particulier dans les plans de politique publique, ainsi que des propositions visant à améliorer la gestion du trait de côte au niveau des institutions locales, régionales, nationales et européennes. Les études

menées ont mis en lumière la sous-estimation de l'aléa érosion côtière. Les investissements dans les zones à risques se poursuivent et parfois s'accroissent car peu de PPR prennent actuellement en compte le risque d'érosion tandis que les pouvoirs publics semblent davantage dédommager les habitants plutôt que de réaliser des investissements pour maintenir le trait de côte.

Au niveau national, ***l'Institut Français de Recherche pour l'Exploitation Durable de la Mer*** (IFREMER) est un organisme public chargé de la surveillance et de la mise en valeur des zones côtières. Il s'occupe également de l'exploration et de l'exploitation des fonds océaniques afin de comprendre les processus géophysiques, géochimiques et biologiques des fonds marins. Pour cela, il dispose d'équipements capables d'acquérir des données océanographiques qu'ils mettent ensuite au service de la communauté scientifique nationale.

Le ***Service Hydrographique et Océanographique de la Marine*** (SHOM) au sein de la marine nationale est quant à lui responsable de l'information nautique. Il est chargé de collecter, valider et diffuser les informations utiles aux navigateurs, professionnels de la marine et plaisanciers. Il a également pour mission de recueillir et diffuser des informations plus spécifiques au milieu marin, utiles à l'élaboration de documents à caractère opérationnel. Dans le cadre de ses activités, le SHOM a mis en place le projet Litto3D qui vise à approfondir la connaissance du littoral. Une base de données historiques rassemblant les mesures existantes a été constituée par l'IGN et le SHOM. Le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine a, de plus, grâce au site du Golfe du Morbihan étudié la faisabilité de la constitution d'une base de données liant de manière cohérente les parties immergées et émergées. Une première mission de laser aéroporté a été effectuée en juin 2005, complétée par des relevés hydrographiques grâce à un sondeur multifaisceaux, système acoustique mesurant la profondeur, le long de la route d'un navire équipé. Cet instrument permet d'explorer rapidement de larges zones océaniques et côtières. Un modèle numérique altimétrique entre la mer et la terre a ainsi pu être défini avec une précision décimétrique. Le SHOM a la volonté de généraliser cette technique à l'ensemble des côtes françaises afin de compléter les études réalisées sur le trait de côte et les isobathes en France métropolitaine.

Enfin, le projet ***DISCOBOLE*** (Données pour le dimensionnement des Structures Côtières et des Ouvrages de BOrd de mer à Longue Echéance), mené conjointement par les départements LNHE et SPE d'EDF R&D, le Centre d'Etudes Techniques Maritimes Et Fluviales (CETMEF), l'Université de Bretagne Occidentale et le Laboratoire de Géographie Physique (CNRS) devrait permettre d'approfondir la question du risque de submersion marine. L'estimation de certains effets du changement climatique sur le climat maritime et côtier devrait permettre d'améliorer le dimensionnement et la gestion de certains ouvrages de défense.

Il existe également deux projets ayant trait au secteur Méditerranée. Le projet ***IMPLIT*** (Impact des phénomènes extrêmes liés au Changement Climatique sur les hydro-systèmes méditerranéens français) s'inscrit dans le prolongement des projets IMFREX et MEDWATER réalisés dans le cadre du programme de recherche GICC. Il a pour objectif l'analyse, à l'échelle régionale du Golfe du Lion, des phénomènes couplés fortes houles et tempêtes ainsi que leurs impacts géomorphologiques et hydrologiques sur le littoral. Ces recherches devraient permettre d'orienter les

politiques publiques. Le projet devait durer deux ans à compter de 2004. Il est donc a priori achevé.

Le projet **GICC-MEDWATER** s'inscrit également dans une perspective d'étude des effets du changement climatique sur le littoral méditerranéen en tirant profit des modèles de régionalisation du changement climatique capables de descendre à une résolution spatiale de cinquante kilomètres. Une attention particulière est portée à l'analyse du cycle hydrodynamique de la mer Méditerranée.

L'étude s'appuie sur différents modèles : des modèles couplés du système climatique global, des modèles climatiques régionaux, notamment Arpège-Climat de Météo-France et LMDZ de l'IPSL avec les scénarii A2 et B2 du GIEC d'évolutions possibles des gaz à effet de serre, un modèle dynamique de la mer Méditerranée et un modèle sur l'écosystème de la mer Méditerranée. Le projet a débuté en mars 2003 et s'est terminé en février 2006.

Au niveau local, dans la région Nord – Pas de Calais, des travaux portent sur l'étude des risques côtiers. Citons par exemple la **thèse de M. Deboudt** de 1997 qui étudie la géomorphologie historique des littoraux dunaires du Pas de Calais et du Nord-Est de la France, ou les travaux de recherche de **Mme Meur-Férec**, géographe à l'Université du Littoral Côte d'Opale, qui a traité à l'érosion sur la frange côtière.

Plus récemment, la **thèse de M. Chaverot**, soutenue en Mai 2006 à l'Université du littoral Côte d'Opale, évalue les actions des forçages météo-marins sur le niveau d'eau et la réponse du trait de côte dans le secteur d'étude de la Côte d'Opale. La thèse s'inscrit dans un contexte de changement climatique qui pourrait avoir pour conséquences un relèvement du niveau marin et une recrudescence des tempêtes en fréquence et en intensité à l'échelle mondiale, à l'origine de processus d'érosion plus importants et de risques de submersion marine le long des côtes basses meubles du Nord – Pas de Calais.

Nous pouvons également évoquer **le mémoire de M. Suret** qui, en vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur de l'Ecole Supérieure des Géomètres Topographes (ESGT), a adopté une approche topographique fine sur un secteur donné de la région Dunkerquoise pour cartographier l'aléa de submersion marine dans cette zone.

b. Au sein des collectivités locales et des services de l'Etat

Les analyses relatives aux risques côtiers ont surtout été menées depuis la fin des années 1990 au travers des études de **l'Observatoire du Littoral**. Cet organe regroupe, dans le cadre d'une convention cadre, le Ministère en charge de l'Equipement, de l'Environnement, la DIACT, le Secrétariat Général de la mer et l'Institut Français de l'ENvironnement (IFEN). L'Observatoire du Littoral est chargé du suivi du littoral d'un point de vue géographique, environnemental et socio-économique grâce à la mise en place d'indicateurs. L'IFEN, opérateur technique de l'Observatoire du Littoral fait, en effet, partie du projet européen de développement durable des côtes européennes DEDUCE qui a mis au point vingt-huit indicateurs dont l'objectif est de permettre aux acteurs locaux, régionaux et nationaux de savoir comment les choses évoluent en terme d'occupation des espaces naturels littoraux, de protection et d'amélioration de la diversité naturelle et culturelle, de promotion et de soutien de l'économie côtière durable, de bon état du littoral et des eaux de baignade, de réduction de l'exclusion sociale, de respect des ressources naturelles

et de caractérisation des risques littoraux liés au changement climatique. L'Observatoire du Littoral a également pour mission de mutualiser et d'organiser l'information en vue d'apporter des éléments méthodologiques aux acteurs de la gestion du littoral tout en anticipant les effets du changement climatique sur la frange côtière. Un outil de cartographie interactif sur les données géographiques et les indicateurs devrait être disponible prochainement.

Le **Syndicat Mixte de la Côte d'Opale** regroupe, quant à lui, quatorze structures intercommunales du littoral Nord - Pas de Calais, les quatre chambres de commerce et d'industrie de Boulogne/Montreuil, Calais, Dunkerque et Saint-Omer ainsi que les deux chambres d'agriculture du Nord et du Pas de Calais. Le SMCO s'est engagé avec l'appui technique du Conseil Régional Nord - Pas de Calais dans l'élaboration du **Plan Littoral d'Action pour la Gestion de l'Erosion**¹² (PLAGE).

Enfin, le Laboratoire des Ponts et Chaussées dépendant du **Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement** (CETE) de Lille et le **Service Maritime de Boulogne Calais** (SMBC) ont contribué à la réalisation des études préalables du Plan de Prévention des Risques (PPR) des côtes basses meubles du Pas de Calais. Ont été pris en compte les phénomènes de recul du trait de côte correspondant à la disparition de zones érodées par la mer, de submersion marine et de recouvrement de sable à la suite d'un déplacement dunaire. Ces trois aléas ont été cartographiés.

Il est également à noter que le LNHE réétudie régulièrement le risque de submersion marine sur certains sites sensibles, comme la centrale nucléaire de Gravelines pour adapter les normes de sécurité des ouvrages de défense destinés à protéger les infrastructures.

2. Au niveau international

Plusieurs projets de réflexion, d'actions et de prévention sur les risques côtiers sont actuellement menés par nos voisins européens. Citons par exemple le projet **COASTNET**. Basée au Royaume-Uni, cette organisation internationale est dédiée à la promotion du développement durable des littoraux et des mers. Elle vise à préserver les zones côtières ainsi que la diversité biologique et à protéger les populations qui y habitent. Elle souhaite également promouvoir l'échange d'informations et d'études pour trouver des solutions à long terme adaptées, intégrant si possible les démarches de *Gestion Intégrée des Zones Côtières* (GIZC). Chaque année est organisé un colloque dans lequel sont envisagées les modalités d'un partenariat international. Un tel partenariat permet en effet d'améliorer la circulation de l'information vis-à-vis du public notamment, de profiter des expériences des autres pays, de rassembler davantage de fonds. Ont également été définies, lors du colloque de 2005, les modalités d'un partenariat durable, à savoir la fixation d'objectifs clairs, communs, l'implication primordiale des membres, la mise à disposition de ressources appropriées ainsi qu'un système de gestion clair et coordonné. Un tel partenariat international serait envisageable en 2010.

Le projet **SAFECOAST** regroupe des organismes en charge de la gestion côtière des Pays-Bas, de l'Allemagne, de la Belgique, du Danemark et du Royaume-Uni dont l'objectif est l'échange et le partage des expériences et connaissances côtières en lien avec le changement climatique. Les membres de l'équipe projet

¹² Le PLAGE a été détaillé de manière plus approfondie dans le chapitre 2 paragraphe intitulé « Une prise de conscience progressive des Autorités du Nord – Pas de Calais ».

souhaitent également proposer des gestions modernes et innovantes des côtes de la Mer du Nord en 2050. Du fait de la grande variabilité spatiale des sites et des cultures différentes, ils ne visent pas le développement d'une stratégie de gestion commune mais plutôt une compréhension mutuelle des facteurs qui ont poussé les pays à choisir tel ou tel ouvrage de protection, ceci dans le but d'améliorer les politiques nationales. Ce projet, qui fait suite au projet *COMMon strategies to reduce the RISK of storm floods in coastal lowlands (COMRISK)*, devrait s'achever en juin 2008.

Le projet européen *COMBined functions in COASTal defence zones (COMCOAST)* développe quant à lui des solutions innovantes contre les risques d'inondations des zones côtières. Il est fondé sur un échange de connaissances et d'expériences entre les pays membres, à savoir les Pays-Bas, le Royaume-Uni, l'Allemagne, la Belgique et le Danemark, pour développer les meilleures pratiques possibles en terme de gestion du littoral. Le projet a débuté en avril 2004 et devrait s'achever en décembre 2007.

Enfin, le projet **Chain of Safety** qui regroupe les Pays-Bas, le Royaume-Uni, l'Allemagne, la Belgique et le Danemark, a pour objectif de faire coopérer ces pays et de favoriser le partage d'informations quant aux procédures de gestion de crises à mettre en oeuvre en cas d'inondation côtière. Ce projet a débuté en avril 2006 et devrait s'achever en juin 2008. Une attention particulière sera accordée à l'étude des plans d'urgence pour définir un plan commun de gestion de crise d'ici 2013.

Ces quelques projets régionaux, nationaux et internationaux montrent une réelle prise de conscience des Autorités, et notamment chez nos voisins européens, quant à la nécessité d'échanger les pratiques et les connaissances en terme de gestion côtière. Le projet COMRISK a montré l'importance de définir une stratégie commune de gestion des risques côtiers qui n'est toutefois pas synonyme d'harmonisation des politiques, notamment en raison de la grande hétérogénéité des paramètres socio-économiques ou culturels nationaux et régionaux. De plus, les études menées lors de ce projet ont montré l'insuffisance de la conscience du risque. Des campagnes d'informations doivent être mises en place pour sensibiliser la population.

B. Une volonté de communication avec le grand public

En 2002, des acteurs de la recherche et de l'Etat provenant du Comté de l'Essex, de la Flandre occidentale, de la Flandre orientale et de la Province de Zeelande se mobilisent dans le cadre du projet *European Solutions by Cooperation And Planning in Emergencies (ESCAPE)* pour réaliser des valises d'informations à destination des populations en cas de sinistre. Une approche commune sur des plans d'évacuation et des attitudes à adopter lors d'une crise générée par une submersion est alors adoptée. Ce projet devrait être suivi du projet AWARE. Les populations devraient être formées aux risques à la fois marins mais aussi terroristes ou chimiques. Le SIRACEPC de la Préfecture du Nord a été sollicité pour participer à ce projet qui regroupe aujourd'hui la Flandre, les comtés du Kent et de l'Essex, l'Estonie ainsi que des régions frontalières en Espagne, aux Pays-Bas, au Portugal, en Allemagne et en Suède.

Dans les années 2003 - 2004, une étude a été lancée sur la perception par la population des systèmes de défense côtiers de la mer du Nord et sur leur souhait éventuel de participer aux plans d'aménagement de ces systèmes de défense. Une telle étude est primordiale pour orienter les politiques et les campagnes d'informations. Deux milles questionnaires ont alors été distribués à Oostende en Belgique, Ribe au Danemark, St. Peter-Ording en Allemagne, Geleente Sluis aux Pays-Bas et Skgness au Royaume-Uni.

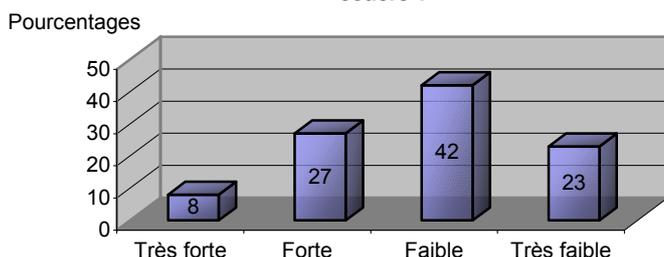
20.6 % des questionnaires ont été renvoyés avec la répartition suivante :

Pays	Questionnaires distribués	Réponses	Pourcentage de réponses
Belgique	400	110	27,5
Danemark	400	89	22,3
Allemagne	400	85	21,3
Pays-Bas	400	82	20,5
Royaume-Uni	400	45	11,3
Total	2000	411	20,6

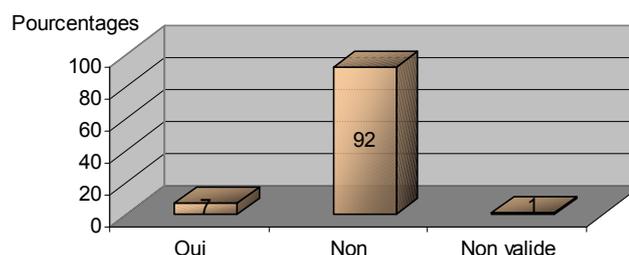
Tableau 17 : Pourcentages de réponses obtenues, source rapport du sous-projet Comrisk intitulé « Public perception of coastal flood defence and participation in coastal flood defence planning », 2004

Les principaux résultats obtenus sont les suivants :

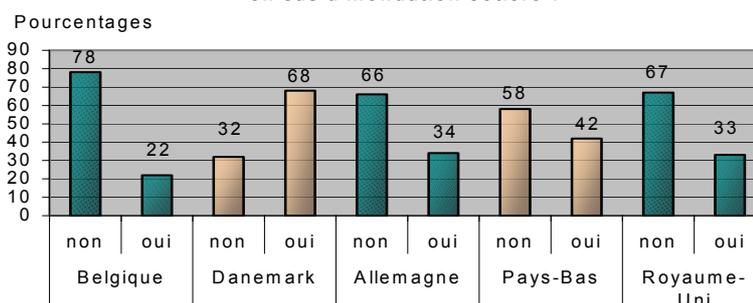
A quel niveau estimez-vous la probabilité d'une inondation côtière ?



Avez-vous pris des mesures personnelles pour vous protéger contre les inondations ?



Savez-vous que faire en cas d'inondation côtière ?



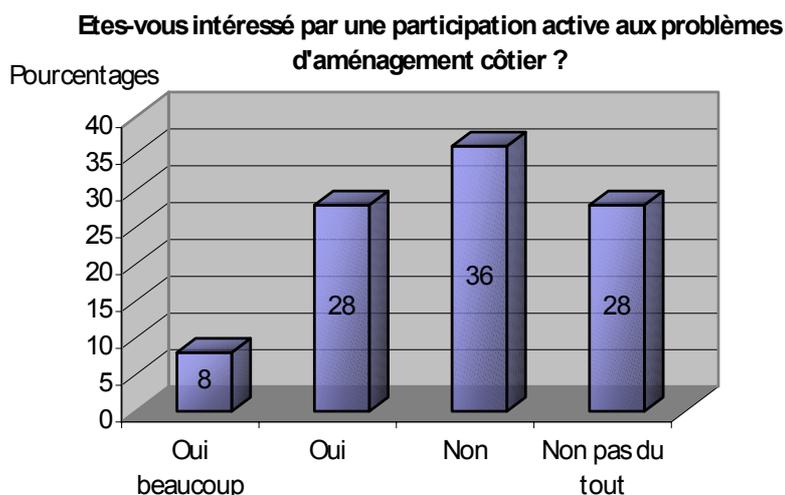


Figure 93 : Graphiques des principales conclusions de l'étude, source rapport du sous-projet Comrisk intitulé « Public perception of coastal flood defence and participation in coastal flood defence planning », 2004

Ce sondage montre donc une très grande hétérogénéité des résultats pour l'ensemble des questions posées. Les conclusions des différents pays divergent également pour la question « Savez-vous que faire en cas d'inondation côtière ? ». Quoiqu'il en soit, améliorer la perception du risque est un moyen d'accroître la sécurité en zone côtière surtout lorsque l'on remarque que la plupart des personnes interrogées ne savent pas que faire en cas de brèche. Pourtant un tiers d'entre elles souhaite participer activement aux plans d'aménagement côtiers. Ce résultat semble encourageant. La sensibilisation au risque d'inondations et les informations concernant les plans de gestion de crise doivent se poursuivre pour accroître les réflexes lors d'une situation d'urgence et ainsi diminuer les pertes matérielles et humaines.

Cette nécessité de communiquer a été reprise dans l'atelier du 28 et 29 mars 2006 du projet SAFECOAST. La prise de conscience du risque augmente lorsqu'une personne en est la victime ou lorsque l'Etat rend la personne responsable de ses biens en l'obligeant à souscrire une assurance. La communication autour de gestes simples à adopter renforce cette prise de conscience et contribue à réduire les éventuels dommages. Selon les membres des pays européens présents lors de cet atelier, la communication doit être adaptée à chaque catégorie sociale et doit être renforcée en milieu scolaire ainsi que chez les personnes plus âgées pour réactualiser la connaissance. Il est en effet difficile de connaître à l'heure d'aujourd'hui les besoins de demain.

Plus généralement, il existe très souvent un item communication dans chaque projet. Certains sites comme ceux des projets EUROSION, COMRISK ou COASTNET recensent les grandes conclusions des études tandis que d'autres projets développent des « boîtes à outils » à destination des gestionnaires et du grand public, pour leur permettre d'accroître leurs connaissances en terme de gestion côtière. Citons l'exemple du projet BAR. Le projet COMCOAST présente quant à lui l'ensemble des solutions innovantes visant à réduire les dommages liés aux risques côtiers ainsi que les sites pilotes associés.

II. La gestion des zones côtières dans quelques pays européens

A. La stratégie de Gestion Intégrée des Zones Côtières (GIZC)

Suite à la Conférence des Nations-Unis pour l'Environnement et le Développement de 1992, le concept de « gestion intégrée des zones côtières » a suscité un réel intérêt au sein des organisations internationales, de l'Union Européenne et de nombreux Etats.

Inscrite au chapitre 17 de l'Agenda 21, elle se définit, d'après le doyen Prieur dans le *Modèle de Loi pour la gestion durable des zones côtières* comme « l'aménagement et l'utilisation durable des zones côtières prenant en considération le développement économique et social lié à la présence de la mer tout en sauvegardant, pour les générations présentes et futures, les équilibres biologiques et écologiques fragiles de la zone côtière et les paysages ». Cette définition ajoute surtout que « la mise en place d'une gestion intégrée des zones côtières exige la création d'instruments institutionnels et normatifs assurant une participation des acteurs et la coordination des objectifs, des politiques et des actions, à la fois sur le plan territorial et décisionnel et impose de traiter les problèmes non pas au coup par coup mais de façon globale et en tenant compte de l'interaction entre tous les éléments qui composent l'environnement ».

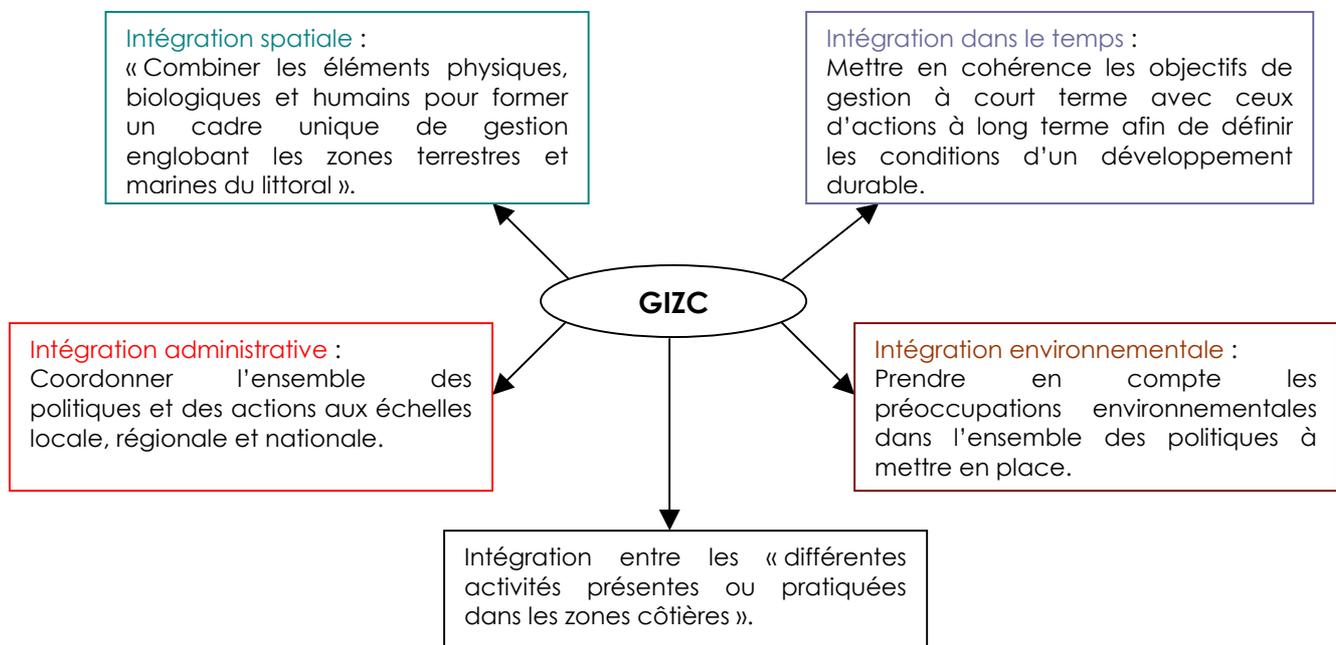


Figure 94 : Le concept de « gestion intégrée des zones côtières », d'après un article de M. Lozachmeur, Docteur en droit public à la Faculté de droit de Nantes, 2005

La GIZC est donc une démarche volontariste concertée. Ce n'est pas la simple application d'une politique décidée à l'échelle nationale. Elle nécessite

l'implication de l'ensemble des acteurs, à tous les niveaux et dans tous les domaines, qu'ils soient administratifs, scientifiques, écologistes, exploitants, investisseurs, collectivités ou Etat. La GIZC, d'après une brochure du réseau *Coastal Practice Network (CoPraNet)* intitulée *Integrated coastal management : do we really have the choice ?*, est désormais nécessaire pour faire cohabiter les diverses activités, parfois contradictoires, du littoral et assurer leur développement durable. La GIZC permet, en effet, d'accroître les profits avec des retours sur investissements relativement importants, de réduire les dommages liés aux risques côtiers et aux catastrophes naturelles tout en restaurant les habitats naturels.

La mise en place d'une stratégie efficace de GIZC passe par une intervention forte du gouvernement qui doit s'efforcer de créer des structures, des instituts de recherche, des indicateurs pour suivre l'évolution des paramètres naturels et adapter les politiques en conséquence. Des moyens financiers appropriés sont également nécessaires. Enfin, l'échange de connaissances et d'expériences avec nos voisins étrangers, une communication efficace entre les acteurs ainsi que l'implication de tous, y compris de la population, sont autant de facteurs qui concourent au succès de la gestion intégrée des zones côtières.

S'il est reconnu que le concept de GIZC est l'un des processus de management le plus efficace pour intégrer des problématiques liées à la préservation des ressources marines et terrestres, tout en assurant le développement économique des zones côtières, cette stratégie est encore peu répandue. Ce n'est qu'en décembre 1995 que la Commission Européenne annonce le lancement d'un programme de démonstration sur l'aménagement intégré des zones côtières, fondé sur trente-cinq sites pilotes. En septembre 2000, elle publie une *Stratégie européenne de gestion intégrée des zones côtières* et propose au Parlement Européen d'adresser une recommandation aux Etats membres afin de favoriser la mise en place d'une telle stratégie à l'échelle nationale. Cette recommandation est adoptée en mai 2002. Les initiatives de GIZC sont alors nombreuses mais les Etats éprouvent des difficultés à mettre en œuvre des politiques et des programmes. Il est en effet peu aisé de faire collaborer un grand nombre d'acteurs, les uns concernés par l'environnement, les autres par l'aménagement du territoire. Imposer des « décrets » n'est donc pas chose facile. Ce constat s'applique bien évidemment aussi à la France.

B. La gestion des zones côtières dans les pays européens proches de la France

Les pays limitrophes de la Mer du Nord sont particulièrement affectés par les risques côtiers.

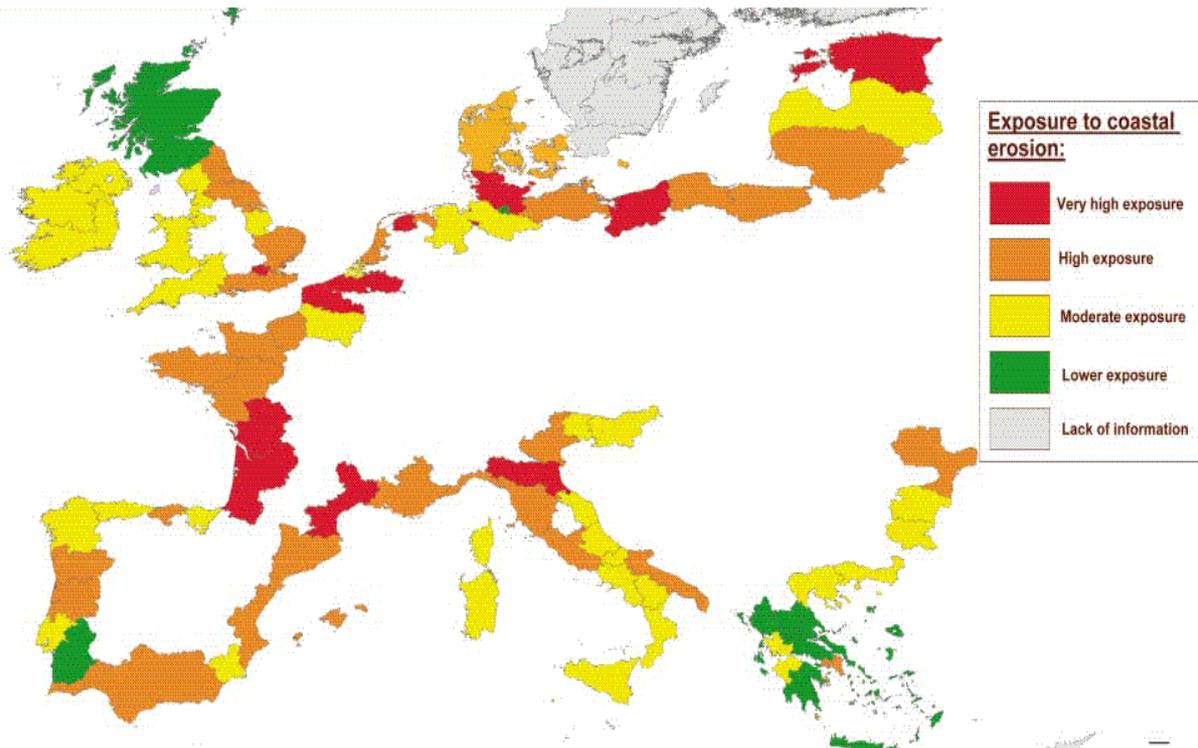


Figure 95 : Exposition des pays européens à l'érosion côtière, source rapport intitulé Vivre avec l'érosion côtière en Europe du site Internet EUROSION, 2004

Chaque pays, que ce soit la Belgique, les Pays-Bas, le Royaume-Uni, le Danemark ou l'Allemagne, a développé des politiques de protection des zones côtières adaptées à la menace à laquelle ils étaient confrontés, à leur histoire et leur culture. Des différences peuvent également exister au sein d'une même région. Prenons l'exemple du Land de Schleswig Holstein. Pour les zones côtières de la Mer du Nord, la population construit des ouvrages de défense lourde depuis près de 1 100 ans. Une stratégie de réhaussement des digues ne semble donc pas les gêner. Il n'en va pas de même pour les régions côtières de la Mer Baltique de ce même Land qui a vu construire ses premières digues en 1872 après un épisode de submersion marine. Ces personnes sont beaucoup plus sceptiques quant aux aspects bénéfiques de ces systèmes de défense qui contribuent à artificialiser le littoral et nuisent à certaines activités économiques comme le tourisme par exemple. Les niveaux de protection varient de façon considérable selon les pays.

Les projets européens COMRISK et SAFECOAST regroupant la Belgique, les Pays-Bas, le Royaume-Uni, le Danemark et l'Allemagne, ont mené une étude permettant de comparer les différentes stratégies de gestion côtière mises en place.

1. L'exemple du Royaume-Uni

a. Les impacts du changement climatique en Angleterre

Avec ses 2200 km² de terres soumis au risque de submersion, la vulnérabilité du Royaume-Uni face aux impacts du changement climatique est importante mais varie régionalement et localement en fonction de la nature des espaces littoraux et

de leur type d'utilisation par la société. 5 % de la population vit actuellement dans les régions côtières.

Pour comprendre les différences régionales de sensibilité face au changement climatique, il faut remonter au début de l'Holocène. Durant cette période, l'Ecosse et dans une moindre mesure l'Irlande, ont connu des mouvements d'élévation isostatique de compensation tandis que le sud-est de l'Angleterre et le Pays de Galle se sont peu à peu affaissés. Ainsi l'élévation du niveau marin s'ajoute-t-il à des tendances isostatiques régionales non négligeables.

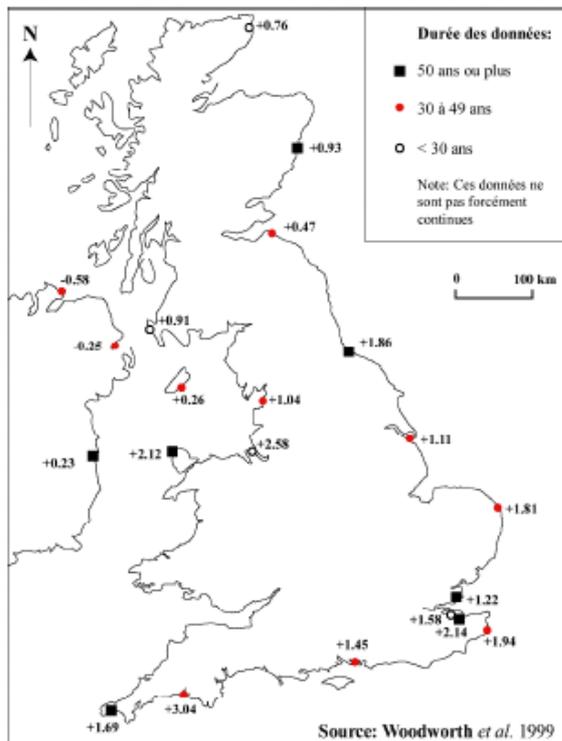


Figure 96 : Vitesses d'élévation du niveau relatif de la mer sur les côtes du Royaume-Uni, source extrait du colloque d'Arles de 2000.

Aujourd'hui, on observe en moyenne une vitesse d'élévation plus importante dans le sud de l'Angleterre qu'en Ecosse.

Cette tendance à l'élévation du niveau de la mer s'est accentuée durant le XX^{ème} siècle et devrait se poursuivre au cours du XXI^{ème} siècle. Le programme britannique d'étude des effets du changement climatique UKCIP¹³ financé par le Ministère de l'Agriculture, de la Pêche et de l'Alimentation, chargé de la politique de défense côtière, a permis la publication, en 2002, de valeurs d'élévations moyennes globales du niveau marin en fonction de la quantité de gaz à effet de serre émise aux horizons 2020, 2050 et 2080. Les simulations ont été effectuées grâce au modèle développé par le centre britannique Hadley.

Scénarios	2020 (m)	2050 (m)	2080 (m)
Emissions faibles	0,06	0,14	0,23
Emissions moyennes plutôt faibles	0,07	0,15	0,26
Emissions moyennes plutôt fortes	0,06	0,15	0,3
Emissions fortes	0,07	0,18	0,36

Tableau 18 : Estimations de l'élévation du niveau moyen global absolu de la mer à différents horizons selon le modèle développé par le centre Hadley, source rapport du RIKZ intitulé *Inventory of climate change scenarios applied in the North Sea countries*, décembre 2005

¹³ UKCIP : UK Climate Impacts Programme

Nous constatons des variations très faibles entre les différents scénarios durant la première moitié du XXI^{ème} siècle. Les incertitudes sont par contre beaucoup plus importantes ensuite. Ce tableau indique également une accentuation du phénomène à partir de la seconde moitié du XXI^{ème} siècle puisque l'écart des élévations entre 2050 et 2080 est plus important qu'entre 2020 et 2050.

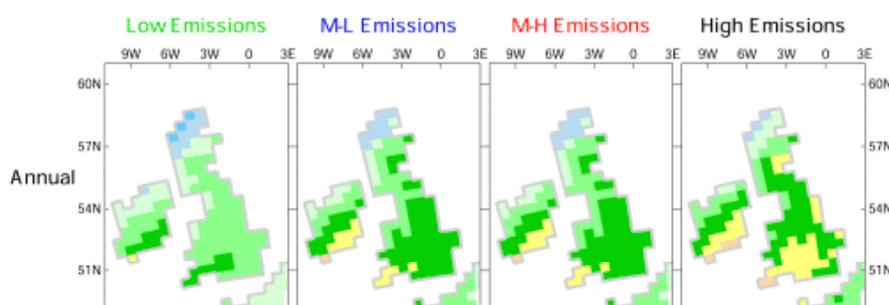
Ces élévations globales doivent ensuite être ramenées à l'échelle régionale en tenant compte du mouvement tectonique qui peut être à l'origine d'un abaissement ou d'un soulèvement des terres.

	Phénomènes de subsidence ou de soulèvement des terres en mm/an	Augmentation du niveau de la mer en cm par rapport à la période 1961 - 1990					
		Faible émission de gaz à effet de serre			Forte émission de gaz à effet de serre		
		2020	2050	2080	2020	2050	2080
Londres	-0,8	8	13	17	18	42	77
Nord-est de l'Angleterre	0,2	3	5	6	13	34	66
Nord-ouest de l'Angleterre	0,6	1	2	3	11	31	63
Ecosse	0,8	0	1	0	10	30	60
Sud-est de l'Angleterre	-0,5	6	11	14	16	40	74
Sud-ouest de l'Angleterre	-1	9	15	20	19	44	80
Pays de Galle	-0,5	6	11	14	16	40	74

Tableau 19 : Phénomènes de subsidence et de soulèvement en mm par an au Royaume-Uni
Source site Internet de l'UKCIP.

Ces écarts plus importants que lorsque l'on ne considère que l'élévation absolue du niveau de la mer s'expliquent également par les différences climatiques régionales. Le réchauffement des océans, à l'origine de la dilatation thermique, n'est pas uniforme sur l'ensemble des côtes du Royaume-Uni. Les variations de pression atmosphériques peuvent également influencer la distribution des élévations du niveau de la mer.

Dans le cadre du programme d'étude UKCPI, des simulations ont été effectuées pour estimer l'évolution des températures.



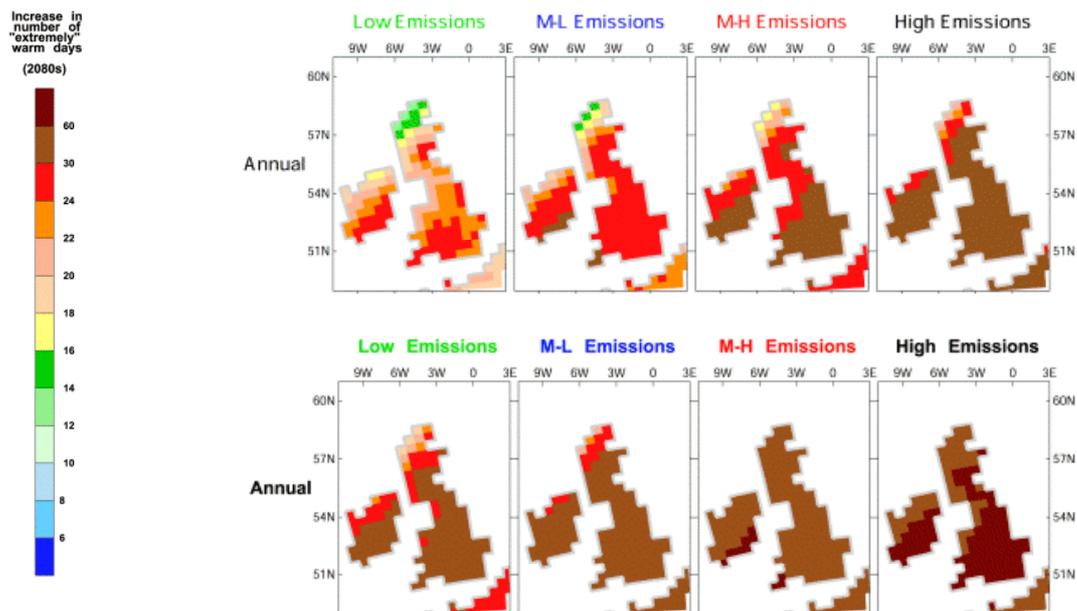


Figure 97 : Evaluation de l'augmentation du nombre de jours de chaleur extrême au Royaume-Uni aux horizons 2020, 2050 et 2080, source site Internet de l'UKCIP

Comme pour l'élévation relative du niveau de la mer, les écarts de températures sont très faibles pour les différents scénarios à l'échelle annuelle durant la première moitié du XXI^{ème} siècle. A l'horizon 2080, les incertitudes sont beaucoup plus fortes. Les simulations ayant également été effectuées pour le Nord de la France, il m'a paru intéressant de comparer les résultats obtenus avec ceux donnés par le modèle national de Météo-France. A échéance 2100, le modèle français ARPEGE Climat prévoit une augmentation de la température moyenne de 2 à 4°C en hiver et de 4 à 7°C en été, sachant qu'au cours du XX^{ème} siècle le réchauffement a été plus marqué dans le Sud que dans le Nord. Les conclusions du modèle du centre Hadley concordent donc approximativement avec ceux de Météo-France.

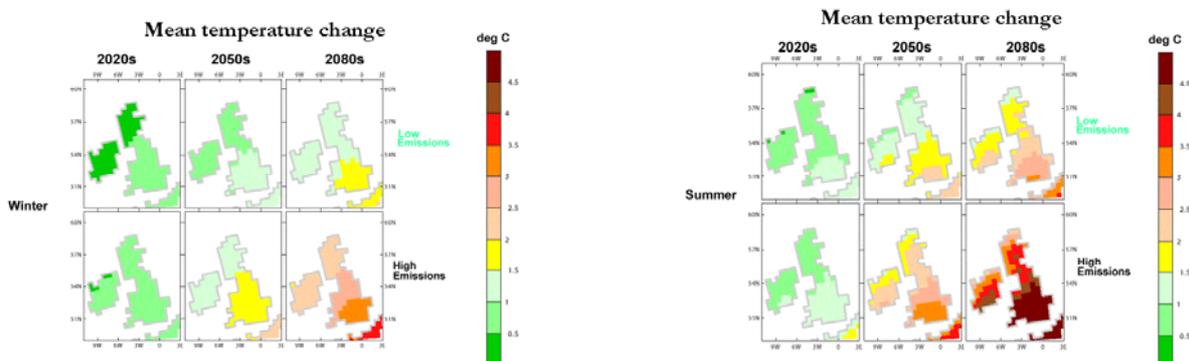


Figure 98 : Evolution des températures aux horizons 2020, 2050 et 2080 selon deux scénarios d'émission de gaz à effet de serre en hiver et en été, source site Internet de l'UKCIP

Les hauteurs des surcotes sont encore difficiles à prévoir car faut coupler deux modèles de simulation pour les estimer. Le modèle atmosphérique du Centre Hadley donne des indications sur les vents et la pression atmosphérique qui sont intégrées dans un modèle développé par *Proudman Oceanographic Laboratory* (POL). Une

résolution de 30 km est utilisée. Les hauteurs des surcotes simulées pour l'avenir sont pour l'instant inférieures à celles déjà observées localement car le modèle nivelle les hauteurs sur 30 km. Nous pouvons simplement dire qu'il y aura probablement une élévation notable de la hauteur des surcotes au large des côtes sud-est du Royaume-Uni et une diminution au niveau du tunnel de Bristol.

Les modèles estiment également un changement de la hauteur des niveaux d'eau de période de retour 50 ans. Des simulations ont été faites avec différents scénarios d'évolution des gaz à effet de serre à l'horizon 2080.

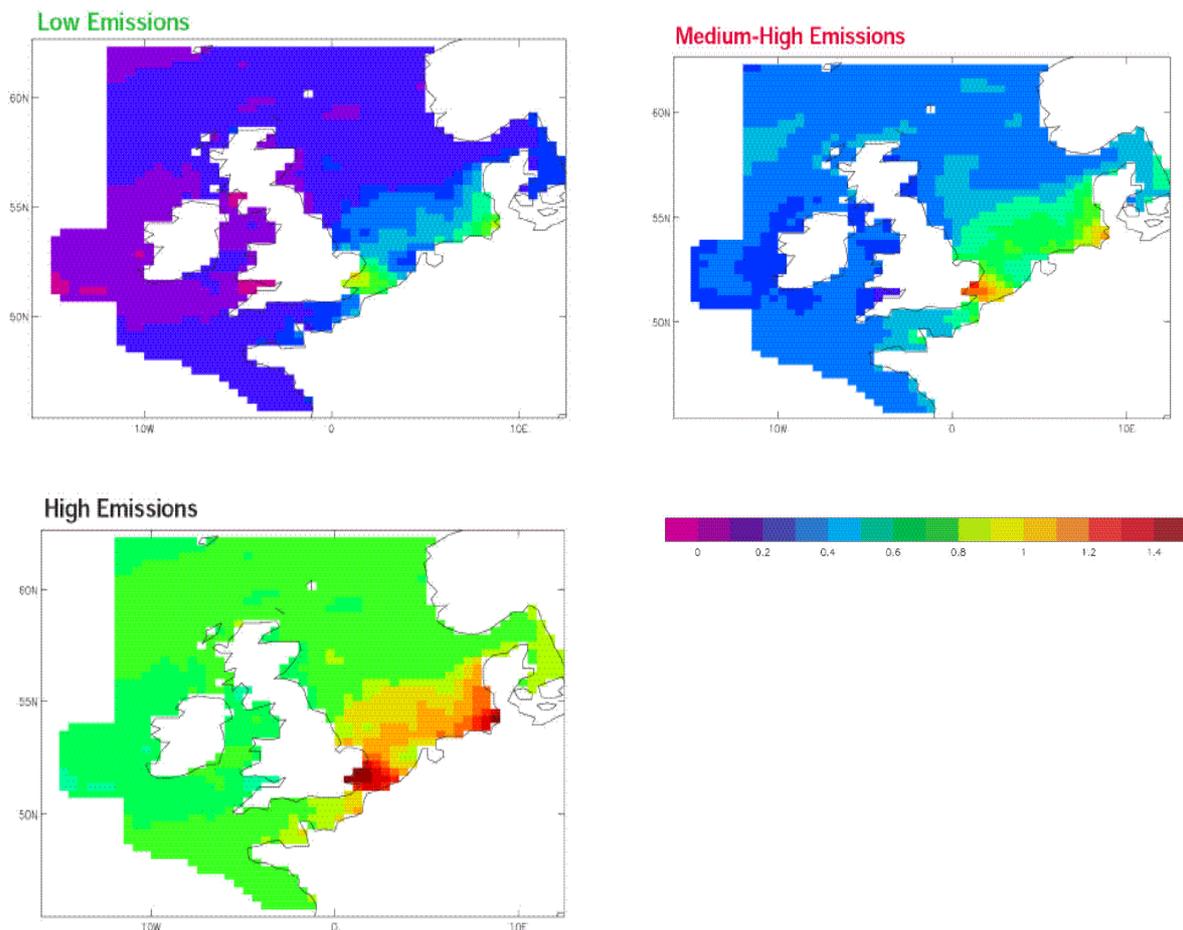
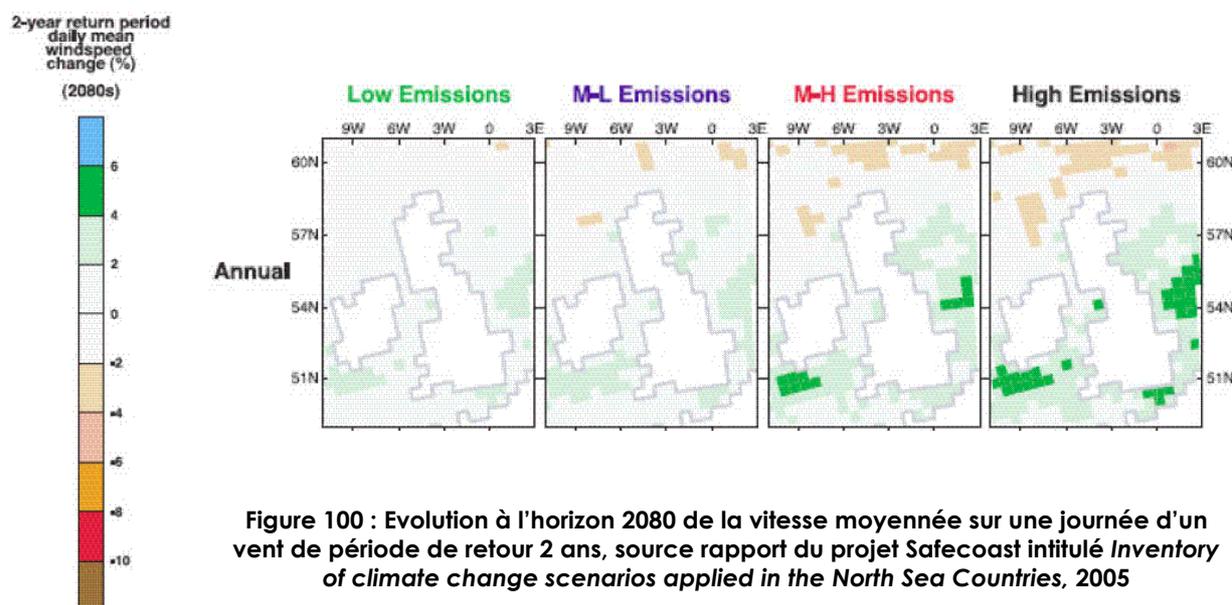


Figure 99 : Evolution des hauteurs des niveaux d'eau de période de retour 50 ans en fonction de trois scénarii d'évolution des gaz à effet de serre correspondant à une augmentation des niveaux marins de 9, 30 et 69 cm.

Nous constatons donc des hauteurs de niveaux d'eau de période de retour 50 ans plus importantes sur la côte sud-est que sur le reste des côtes britanniques. Pour le littoral du Nord Pas de Calais, d'après ces modèles dont les résultats sont à interpréter avec prudence, en 2080, les hauteurs des niveaux d'eau de période de retour 50 ans augmenteraient de 0.8 et 1.3 m pour un scénario moyen en terme d'émission de gaz à effet de serre. De plus, selon un article d'Anne C. de la Vega-Leinert et de Robert J. Nicholls, de l'Université de Middlesex au Royaume Uni, un événement de surcote ayant aujourd'hui une probabilité d'occurrence de 1 : 100 aura d'ici la fin du siècle une probabilité de moins de 1 : 5 avec le scénario maximal prévu pour l'élévation maximale du niveau marin. Le niveau de risque devrait donc s'accroître au fil des décennies.

Enfin, s'il est encore difficile de quantifier les directions du vent à l'horizon 2080, les modèles ont estimé, à cette date, des modifications régionales éventuelles de la force du vent. Ce paramètre est important dans la mesure où les vents forts contribuent à générer des surcotes s'ils sont accompagnés d'une faible pression atmosphérique.



A l'horizon 2080, les simulations indiquent que la vitesse d'un vent moyennée sur une journée de période de retour de deux ans devrait s'intensifier sur les côtes sud et est de l'Angleterre, notamment en hiver et au printemps, avec une augmentation comprise entre 2 et 8 % suivant les scénarios. Il y aurait peu de changements pour le reste des côtes britanniques avec même une réduction possible de la vitesse du vent jusqu'à 10 % en été et en automne.

Ces évolutions climatiques devraient accroître les risques naturels littoraux, notamment dans le sud-est de l'Angleterre. Les milieux les moins fortement touchés par l'érosion, comme les falaises rocheuses ou les plages de galets sont principalement situés en Ecosse tandis que les plages sableuses ou les marais littoraux, plus sensibles à l'érosion sont essentiellement présents en Angleterre et au Pays de Galles. Le Royaume-Uni possède également de vastes plaines sableuses de faible altitude, inférieure à cinq mètres, localisées dans l'est et le sud de l'Angleterre, le long des grands estuaires comme celui de la Tamise ou sur les côtes du Wash et d'East Anglia.

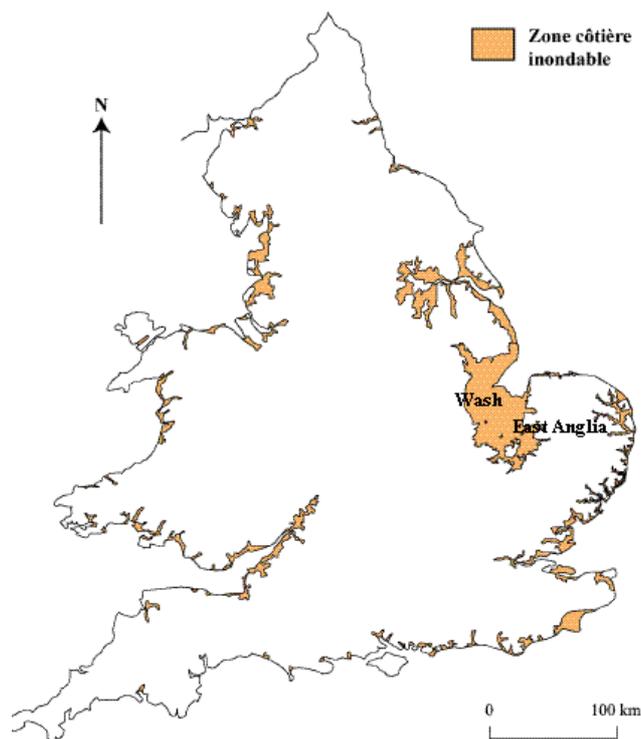


Figure 101 : Zones côtières inondables en Angleterre et aux Pays-Bas, article intitulé *Les conséquences de l'élévation accélérée du niveau de la mer au Royaume-Uni*, site Internet de l'Université du Middlesex au Royaume-Uni, 2000.

b. La stratégie anglaise de défense côtière

Le Ministère de l'Agriculture, de la Pêche et de l'Alimentation (DEFRA)¹⁴ est en charge de la politique de défense côtière qui comprend la gestion des risques d'inondations et d'érosion. Le Ministère de l'Environnement, Transport et Régions (DETR) est également associé ainsi que d'autres organisations gouvernementales comme *English Nature* ou *English Heritage* qui assurent la protection de la nature et des monuments historiques. Les Autorités locales et l'Agence de l'Environnement peuvent construire des ouvrages de défense lorsqu'elles l'estiment nécessaire. Elles assurent leur planification, leur exécution et leur maintenance. Les Autorités locales, par le biais notamment des plans locaux de l'Agence de l'Environnement, sont donc en charge de la défense contre les risques liés aux inondations et à l'érosion côtière.

La zone côtière du Royaume-Uni est fortement protégée par une grande diversité de structures de défense qui jouent un rôle déterminant dans le développement et le maintien des activités économiques du pays. Du simple endiguement à l'immense barrière anti-tempête construite sur la Tamise et opérationnelle depuis 1982, ces ouvrages de protection, qui s'étendent sur 1200 km le long des côtes anglaises et galloises, protègent environ 1.5 millions de personnes et 160 000 propriétés résidentielles et commerciales. Cependant, la dégradation des écosystèmes s'avère préoccupante ; les quatre cinquièmes des zones côtières et galloises étant actuellement anthropisés à des degrés divers. Une étude est actuellement menée dans le cadre du programme pilote *REGional climate change*

¹⁴ La traduction anglaise du Ministère de l'Agriculture, de la Pêche et de l'Alimentation est le DEFRA ou *Department of environment, food and rural areas*.

Impact response Studies (REGIS) pour tester une méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité des côtes. Les sites de l'East Anglia et du nord ouest de l'Angleterre sont à l'étude.

Face à la vulnérabilité des zones côtières, le DEFRA a mis en place, dans les années 1990, une stratégie de planification et de gestion des rivages qui vise à réduire les dommages humains et matériels engendrés par les inondations ou liés à l'aléa érosion. Les plans de gestion de la zone côtière et ceux des estuaires sont guidés par les principes de précaution, de pollueur-payeur ou du caractère irremplaçable de certaines valeurs environnementales. Ainsi des restrictions d'aménagements dans des zones inondables ou sensibles à l'érosion sont-elles préconisées. Cependant, ces guides n'ont pas de valeur réglementaire et l'on comprend bien que de telles mesures de restrictions ne peuvent s'appliquer que dans les zones à faible densité et faible valeur économique. Cette absence de contraintes légales s'inscrit au cœur de la démarche de GIZC puisque les politiques reposent sur un consensus volontaire entre usagers, acteurs et décideurs.

L'intégration des effets du changement climatique dans les politiques de défense côtière est également encouragée. A ce titre le DEFRA a retenu, en 2003, un scénario moyen d'élévation du niveau de la mer de 4.5 mm par an dans les cinquante prochaines années, valeur à laquelle il convient d'ajouter les variations régionales. D'autres préconisations aux maîtres d'ouvrage ont également été mentionnées, comme l'indique le tableau ci-dessous.

Moyenne de l'augmentation relative du niveau moyen marin	6 mm par an en Anglia, Thames, au nord et au sud est de l'Angleterre (sud de Flamborough Head) 5 mm par an au sud ouest de l'Angleterre et au Pays de Galle 4 mm par an dans le nord ouest et au nord est de l'Angleterre (Nord de Flamborough Head)
Condition de vagues extrêmes	Hauteur de la vague : + 10% en 2080 Période de la vague : + 5 % en 2080

Tableau 20 : Scénarios de changement climatiques pour le Royaume-Uni, source rapport du RIKZ, intitulé *Inventory of climate change scenarios applied in the North Sea countries, 2005*.

Depuis quelques années, le Royaume-Uni a tendance à recourir aux méthodes plus « douces » de défense côtière avec la célèbre maxime britannique « Making Space for Water ». L'alimentation artificielle en sable des plages et la réhabilitation de marais salés sont encouragées. Ainsi, en 1996, l'Agence de l'Environnement affirmait que le niveau de protection d'une digue de trois mètres de haut, d'un coût de £400 par mètre linéaire, accompagnée d'un marais salé de 80 mètres de largeur, équivalait à celui d'une digue de douze mètres, d'un prix de £5000 par mètre linéaire, sans plage ni marais devant elle. Pour ce qui est du rechargement des plages, il est nécessaire d'évaluer le coût économique et de disposer d'un gisement d'emprunt d'une granulométrie adaptée suffisante pour assurer la continuité de l'opération. Le rechargement de plages comprend les notions de *beach reprofiling*¹⁵, *beach nourishment*¹⁶ et de *beach recycling*¹⁷. Actuellement *beach nourishment* et *beach reprofiling* sont les deux principes les plus

¹⁵ *Beach reprofiling* signifie remodeler artificiellement la plage à l'aide des matériaux existant.

¹⁶ Le concept de *Beach nourishment* est défini comme un rechargement de plage à partir de matériaux extérieurs.

¹⁷ *Beach Recycling* signifie rétablir artificiellement un transit littoral interrompu totalement ou artificiellement par un ouvrage par exemple.

répandus dans le sud de l'Angleterre, dans les comtés du Sussex et de l'East Kent. Le troisième concept est parfois critiqué par certains dans la mesure où il vient à l'encontre des processus naturels. Actuellement, le sud-ouest de l'Angleterre dépense en moyenne £100 millions pour cette solution qui reste donc une méthode très compétitive en terme de protection côtière.

La stratégie de «réalignement contrôlé» ou de repli stratégique, dans la mesure où elle est planifiée peut également se présenter comme une solution intéressante dans les secteurs côtiers à faible occupation humaine. Elle consiste généralement à créer une brèche dans les ouvrages de défense de façon à faire pénétrer l'eau jusqu'à une nouvelle ligne de défense construite plus à l'intérieur des terres. Il est également possible d'élargir une plaine inondable. Des zones humides intermédiaires sont ainsi créées.

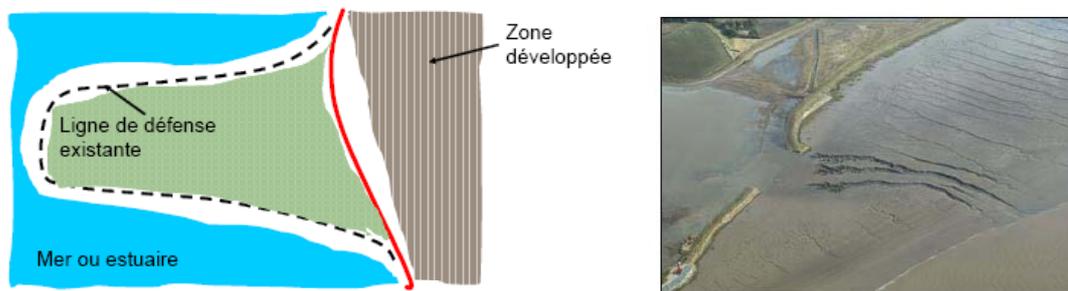


Figure 102 : A gauche, le principe du réalignement stratégique, à droite l'exemple d'une brèche artificielle créée dans la digue de Paull Holmes Strays, dans l'estuaire du Humber en Grande Bretagne, source rapport des ateliers du Conservatoire du Littoral du 5 avril 2005.

Une telle solution comporte de nombreux avantages, et notamment la diminution du coût des ouvrages de défense par la réduction des dimensions des ouvrages, l'augmentation de la pérennité et de l'efficacité des défenses secondaires, car une partie de l'énergie des vagues serait absorbée par les zones humides, la création ou la restauration d'écosystèmes ainsi qu'un moyen de compenser la disparition actuelle des marais salés. S'il existe encore des réticences de la part des propriétaires, ce principe de gestion côtière permet donc de prendre en compte les aspects environnementaux et sociaux des inondations et de la protection du littoral.

Des sites tests ont été mis en place en Angleterre, au Pays de Galle et en Ecosse pour tenter de comprendre les éléments moteurs et les réticences quant à la mise en oeuvre de cette stratégie.

Situé dans l'estuaire de Humber, le site de Paull Holme Strays composé de terres agricoles poldérisées a vu la naissance en 2003 d'un espace de 80 ha de marais maritimes suite à une brèche dans les digues en mauvais état. Une nouvelle ligne de défense a alors été créée à l'intérieur des terres. Une sédimentation très importante a permis l'accueil rapide des populations animales tandis que les résidents, plutôt opposés au projet de prime abord, ont, d'après Mme Ledoux, fonctionnaire de la Commission Européenne à Eurostat, progressivement compris les bénéfices créés, notamment en terme de tourisme.

Nous pouvons également citer l'exemple de Nigg Bay en Ecosse. Face au délabrement des systèmes de protection, le propriétaire des terrains situés à l'aval, a

lui-même été à l'origine de l'ouverture d'une brèche afin d'envahir 25 ha de terres agricoles. Avec le temps, un marais salé propice à la création de nouveaux habitats devrait se former. Les difficultés sont dans ce cas venues des démarches administratives puisqu'il s'agissait du premier site de réalignement en Ecosse.

Les études menées ont montré que les principales réticences d'une telle stratégie venaient essentiellement de l'opinion publique. Toutefois, les facteurs institutionnels et financiers jouent également un rôle important. La solution du « réalignement contrôlé » est, en effet, beaucoup moins répandue en Ecosse qu'en Angleterre car, contrairement à l'Angleterre où le DEFRA assure un rôle principalement stratégique et financier tandis que l'Agence pour l'Environnement a davantage un rôle exécutif, en Ecosse les Autorités locales ont un rôle financier. C'est aux propriétaires qu'incombe la responsabilité de protéger les terres. L'approche stratégique est donc difficile dans un tel contexte et le schéma institutionnel est en cours de révision.

D'autres sites sont actuellement à l'étude sur l'île de Wight, et notamment sur la façade est. Ce secteur est particulièrement vulnérable aux risques liés aux submersions marines, à l'érosion et au débordement des cours d'eau. L'objectif de ces études est de développer une stratégie de gestion des rivières et des côtes pour les cent prochaines années et de mettre en place un plan de travail pour les cinq années à venir.



Figure 103 : Localisation de l'île de Wight en Angleterre, source site Internet pamir.chez-alice.fr

Quelle que soit la stratégie de gestion côtière adoptée, le gouvernement britannique est conscient que le risque nul n'existe pas. C'est pourquoi il investit beaucoup dans la prévention. D'ici 2013, £226 millions devraient être consacrés à la réalisation de campagnes d'informations à destination des populations locales et à la cartographie des zones potentiellement soumises aux risques d'inondation et d'érosion.

Il existe, d'autre part, des plans de secours mis en place par DEFRA et l'Agence pour l'Environnement qui se déclinent au niveau local, régional et national. Le gouvernement a également mis en place des équipes à l'échelle régionale, les *Regional Resilience Teams*, chargées de coordonner les actions locales en cas d'inondations majeures et de rapporter les problèmes locaux au niveau national. En 2004, des simulations d'inondations par submersion marine ont eu lieu dans plusieurs régions de l'Angleterre et du Pays de Galle. Elles ont impliqué plus de 1000 personnes. Le nouveau programme de gestion de crise devrait intégrer les recommandations de cet exercice. Enfin, l'acte *Civil Contingencies Act* de 2004 formalise un certain nombre d'obligations pour les Autorités locales et les services de secours. Cet acte, réalisé suite aux sévères inondations d'automne et d'hiver 2000 et à l'épidémie de vache folle de 2001, définit clairement les rôles et responsabilités des Autorités locales, notamment en terme de mise en place de plans de secours, de communication avec le public, de partage de l'information avec les autres Autorités locales et de déploiement des services de secours en cas de nécessité. L'acte définit également les conditions de déclaration d'une situation d'extrême urgence et les outils réglementaires utilisables pour mettre fin à la crise. Il est désormais possible, grâce à l'acte, de déclarer l'état d'urgence dans une région spécifique et de mettre en place une législation temporaire dans le secteur touché.

Pour conclure sur le cas du Royaume-Uni, nous nous appuyerons sur le rapport britannique de juin 2006, présenté lors d'un meeting au Danemark entre les managers de la Mer du Nord.

La tendance du DEFRA est actuellement à la délégation des responsabilités en terme de gestion côtière. L'Agence pour l'Environnement prend désormais les décisions de construction des ouvrages de défense lorsque le montant est inférieur à £50 million. Elle devrait bientôt se voir attribuer la responsabilité des travaux de lutte contre l'érosion côtière. DEFRA serait alors responsable de la mise en place des grandes orientations politiques nationales en terme de gestion côtière et de l'allocation des ressources financières. « Making Space for Water » est désormais le credo britannique pour lutter contre les risques de submersion marine et d'érosion côtière à long terme. Ce concept inclut la prise en compte de l'ensemble des facteurs socio-économiques, touristiques et environnementaux, l'amélioration de la connaissance des aléas inondation et érosion, la coopération entre les acteurs concernés, le développement de solutions innovantes avec la mise en place de sites tests, ainsi que la prise en compte des risques dans les plans d'aménagement du territoire. Un guide est paru récemment sur ce sujet.

2. L'exemple de l'Allemagne

a. Les impacts du changement climatique en Allemagne

Le centre de recherche allemand *Deutsches Klimarechenzentrum* (DKRZ) est chargé du développement d'un modèle climatique qui simule le comportement de l'atmosphère, de l'océan, de la cryosphère et de la biosphère, ainsi que les interactions existant entre ces différentes composantes. Il s'appuie sur des modèles et des techniques de mesures développés par l'Institut Max Planck.

Le projet *Klimawandel und präventives Risiko und Küstenschutzmanagement an der deutschen Nordseeküste*¹⁸ (KRIM) utilise les estimations en terme de changement climatique du projet *KLIMAänderung und Unterweserregion*¹⁹ (KLIMU) qui avait pour objectifs l'étude de la sensibilité des paramètres hydrologiques, écologiques et socio-économique de l'estuaire de Weser ainsi que la réponse des marais au changement climatique. L'étude devait également proposer des réponses en terme de stratégie de gestion de la Weser inférieure. Ce projet, terminé en 2000, qui s'inscrivait dans le programme de recherche « Climate Change and the Coast », regroupait notamment l'Institut de Recherche GKSS, les universités de Brunswick, Hanovre et Brême ainsi que Bio-Consult, spécialisé dans les problématiques environnementales.

Le projet KRIM se voulait quant à lui de répondre à la question : quelle stratégie adopter en terme de défense côtière face au changement climatique ? Les simulations sur les températures, les précipitations, les vents et la relation vent/niveau des plus hautes mers ont été effectuées en 1998, à l'horizon 2050, en considérant un doublement de la concentration en CO₂ grâce au modèle couplé atmosphère/océan ECHAM 4/OPYC 3 dans le cadre du projet KLIMU pour Brême.

Saisons	Période de référence : 1961 - 1990	Horizon 2050
Décembre - janvier - février	1.5 °C	+ 2.9 °C
mars - avril - mai	8.2 °C	+ 3.2 °C
juin - juillet - août	16.6 °C	+ 2.7 °C
septembre - octobre - novembre	9.6 °C	+ 2.2 °C
Annuel	9 °C	+ 2.7 °C

Saisons	Période de référence : 1961 - 1990	Horizon 2050
Décembre - janvier - février	1.715 mm/jour	+ 0.269 mm/jour
mars - avril - mai	1.732 mm/jour	+ 0.383 mm/jour
juin - juillet - août	2.251 mm/jour	- 0.136 mm/jour
septembre - octobre - novembre	1.889 mm/jour	+ 0.231 mm/jour
Annuel	1.897 mm/jour	+ 0.187 mm/jour

Saisons	Période de référence : 1961 - 1990	Horizon 2050
Décembre - janvier - février	5.02 m/s	+ 0.33 m/s
mars - avril - mai	4.65 m/s	+ 0.22 m/s
juin - juillet - août	3.97 m/s	- 0.17 m/s
septembre - octobre - novembre	4.42 m/s	+ 0.30 m/s
Annuel	4.51 m/s	+ 0.17 m/s

Tableau 21 : Résultats des simulations concernant l'évolution des températures, des précipitations et de la vitesse du vent, réalisées dans le cadre du projet KLIMU pour Brême
Source site Internet du projet KLIMU

¹⁸ Le Projet KRIM pourrait se traduire en français par Changement climatique, prévention des risques et gestion côtière dans les côtes allemandes de la Mer du Nord.

¹⁹ Le projet KLIMU pourrait se traduire en français par changement climatique et région de la Weser inférieure.

Ce modèle prévoyait donc pour Brême une augmentation moyenne des températures de 2.7 °C à l'horizon 2050, avec des augmentations importantes en hiver et au printemps dont on sait aujourd'hui grâce aux modèles plus récents que les valeurs sont un peu surestimées, une augmentation annuelle des précipitations de 10% avec une forte augmentation au printemps et une réduction en été ainsi qu'une augmentation de la vitesse du vent en automne et en hiver.

S'appuyant sur ces résultats, les chercheurs du projet KRIM ont dégagé une tendance évolutive des paramètres précipitations, température, vent, élévation du niveau de la mer, niveau des hautes et basses marées à l'horizon 2050, par rapport à 1990.

Augmentation du niveau moyen marin	+ 55 cm
Augmentation moyenne de l'espace tidal	+ 25 cm
Augmentation du vent moyen durant les événements météorologiques extrêmes	7%
Augmentation de la température	+ 2.8 °C
Augmentation des précipitations	10%

Tableau 22 : Evolution de différents paramètres climatiques entre 1990 et 2050, source site Internet du projet KRIM et rapport du RIKZ, intitulé *Inventory of climate change scenarios applied in the North Sea countries, 2005*.

L'institut de recherche GKSS a, de plus, analysé les tempêtes passées, et notamment celles ayant généré des submersions. Dans un récent article de 2005, GKSS présente ses principales conclusions. Le niveau moyen marin absolu devrait augmenter de 0.2 m en 2030 et de 0.7 m en 2085 mais pourrait s'élever de 20 à 40 cm supplémentaires le long des côtes allemandes durant les tempêtes.

a. La stratégie allemande de défense côtière

Les états côtiers de la Mer du Nord, c'est-à-dire la Basse Saxe, Brême, Hambourg et Schleswig Holstein, sont responsables de leurs systèmes de défense côtière, régulés par des actes spécifiques de défense côtière comme à Hambourg ou des actes plus généraux appelés *State Water Acts* dans les autres états.



Figure 104 : Les Länder allemands, site Internet www.routard.com

Les principes techniques et financiers, et notamment les niveaux de sécurité requis lors du dimensionnement des ouvrages de défense sont généralement définis dans des plans spécifiques à chaque Etat. Ainsi les plans de protection contre les risques côtiers sont-ils différents selon les états. L'approche de Schleswig Holstein quant à l'intégration des effets du changement climatique dans ces plans est par exemple celle du rapport de 2001 du GIEC, à savoir une augmentation du niveau marin absolu de 50 cm d'ici 2100 tandis que la Basse-Saxe considère un niveau d'élévation absolu de la mer de 60 cm d'ici la fin du siècle et un affaissement progressif du Land de 6 à 10 cm d'ici 2100 d'après le rapport du RIKZ de décembre 2005 intitulé *Inventory of climate scenarios applied in the North Sea Countries*.

Le gouvernement fédéral peut participer au financement de certains ouvrages à hauteur de 70 % mais la maintenance est assurée à 100 % par les états côtiers. Ainsi 11 240 km² sont-ils potentiellement soumis au risque de submersion, ce qui représente 17.5 % des quatre états.

L'Allemagne, comme la plupart des pays européens de la Mer du Nord a longtemps privilégié les systèmes de défense lourde pour sécuriser sa côte.

Prenons l'exemple de Schleswig Holstein où les niveaux de sécurité adoptés ne prennent en compte ni les considérations démographiques ni la valeur économique des terrains submersibles. Le niveau de protection attendu s'appuie sur l'analyse de différents paramètres : le niveau d'eau maximal, la hauteur d'eau montante sur l'ouvrage maximale que l'on nomme aussi *Wave run up* et une marge de sécurité de 50 cm pour intégrer les effets de l'élévation du niveau marin dans la conception de l'ouvrage et le tassement possible de la digue après construction.

De ces paramètres découlent des critères de pente et de hauteur pour l'ouvrage. Le niveau d'eau maximal pris en compte doit respecter trois conditions. Les ouvrages doivent être construits pour résister :

- à une période de retour des niveaux marins d'au moins cent ans ;
- au niveau d'eau le plus haut enregistré lors d'une tempête en tenant compte de l'élévation du niveau marin depuis ;
- à la conjonction des facteurs niveau moyen marin, forte marée de printemps et plus haute surcote enregistrée.

Il est prévu, dans le nouveau plan de 2001, que ces paramètres soient réévalués tous les 10 ans.

D'importants travaux de renforcement des digues sont prévus pour les quinze prochaines années. D'après la conférence des managers de la Mer du Nord de juin 2006, cela affecterait 353 km de digues pour un coût total de 880 millions d'euros.

Si la tendance actuelle semble encore être au réhaussement des digues pour lutter contre le changement climatique, les plans de protection contre les risques côtiers privilégient progressivement les stratégies de gestion intégrée des zones côtières.

Prenons l'exemple du plan de gestion de Schleswig Holstein. Ce Land possède 1190 km de côtes et environ 3 800 km² de zones basses, soit 25% de la superficie totale du Land qui regroupe 345 000 personnes.

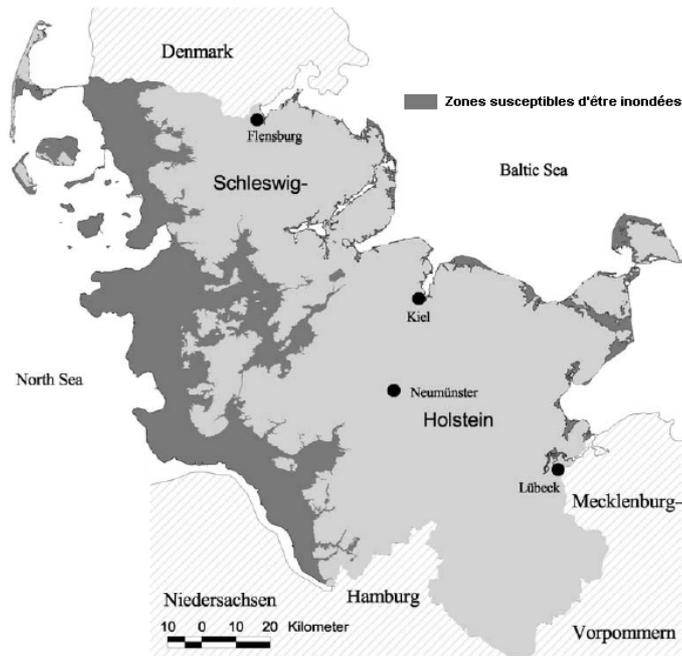


Figure 105 : Illustration des zones potentiellement inondables sur le Land de Schleswig Holstein, source article de Jacobus Hofstede intitulé *A new coastal defense master plan for Schleswig Holstein*, 2004

Outre le renforcement des digues, d'autres solutions plus « douces » comme le rechargement de plages ou les stratégies de réhabilitation de marais salés sont prises.

Depuis 1963, 36 millions de m³ de sable ont été déversés pour un coût total de 144 millions d'euros sur les îles de Sylt et Förd pour limiter l'érosion côtière. L'île de Sylt, située dans l'Etat du Schleswig Holstein, a longtemps été protégée par des systèmes de défense lourde type épis ou murs en béton. Toutefois, ces mesures ont été contre-productives à long terme car elles ont contribué à perturber les transits sédimentaires le long de la côte, engendrant une forte érosion à l'aval. De nouvelles mesures plus souples, type rechargement de plages ou recours aux géotextiles ont alors été mises en place. Si elles ne suppriment pas le besoin de systèmes de défense lourde, elles permettent d'accroître leur efficacité et leur longévité. L'île de Sylt constitue donc un bon exemple de rechargement de plage réussi car les sédiments ayant des caractéristiques appropriées peuvent être dragués non loin de l'île, à faibles coûts et sans impacts environnementaux irréversibles. La quantité de sédiments transportée par dérive littorale est de plus relativement faible. Un rechargement a lieu tous les six ans en moyenne. Les coûts et l'impact environnemental sont donc limités.

En 1995, un plan de gestion des marais salés de Schleswig Holstein a également été mis en place conjointement par les Autorités de défense côtière et environnementale, les marais salés constituant à la fois une solution de défense à ne pas négliger et une zone écologique fragile de valeur.

La stratégie de « réalignement contrôlé », envisagée comme une réelle solution au Royaume-Uni, est par contre peu répandue en Allemagne sur les côtes de la mer du Nord. Une comparaison entre ces deux pays a été réalisée par

l'Université du Middlesex en 2002. Contrairement à l'Angleterre, l'Allemagne n'a pas un besoin urgent de compensation des habitats des zones intertidales et la dégradation des ouvrages de défense lourde n'est pas aussi importante que dans certains secteurs du Royaume-Uni. De plus, les droits de propriété sont forts, notamment à Schleswig Holstein. La résistance face à ce nouveau type de protection serait donc importante. Ainsi, au Royaume-Uni et sur les côtes allemandes de la Mer Baltique, moins affectées par des épisodes tragiques de submersion que les côtes allemandes de la Mer du Nord, la stratégie de « réalignement contrôlé » est envisagée comme une solution durable et économiquement rentable tandis que dans les autres états allemands, le maintien du statut quo s'avère globalement pour le moment la stratégie retenue.

En 2001, Schleswig Holstein adopte un nouveau plan de gestion intégrée de la zone côtière. Pour la première fois en Allemagne, les principes de GIZC allaient être appliqués. La défense côtière doit désormais s'intégrer aux plans d'aménagement et prendre en compte d'autres paramètres que l'aspect purement sécuritaire. L'information au public doit être renforcée et les effets du changement climatique pris en compte avec leurs incertitudes.

Concrètement, le concept de ce plan concorde avec les principes de GIZC puisqu'il s'agit d'un document d'engagement de la part des états signataires qui n'a pas de valeur réglementaire légale. Le public ainsi que de nombreux organismes publics et privés ont été consultés pour la mise en œuvre de ce plan.

La mise en place de la stratégie de gestion intégrée des zones côtières se poursuit en Allemagne comme le prouve un récent rapport de 2006. Les lois intègrent progressivement ces concepts comme le prouve la loi *Raumordnungsgesetz des Bundes* concernant l'aménagement des territoires des Länder ou la loi *Gemeinschaftsaufgabe zur Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes* relative à l'amélioration des structures agricoles et de la protection côtière. Les énergies renouvelables sont encouragées sur les zones littorales, à l'image des espaces naturels. Des efforts restent toutefois à faire, notamment en terme de communication, principalement entre les acteurs concernés par la mise en œuvre de la stratégie de GIZC. Des indicateurs de performance doivent également être mis en place.

Afin de limiter les risques, les actes de Schleswig Holstein et de Basse Saxe définissent des zones tampons respectives de 100 m et 50 m côté terre à partir du système de protection côtière ou de la limite du trait de côte. L'urbanisation est interdite dans ces secteurs. Ces normes sont inscrites dans les plans locaux d'urbanisme.

L'Allemagne a également défini, grâce au *Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe*, un certain nombre de règles pour la gestion des crises liées aux inondations. Comme pour la défense côtière, chaque Land est responsable de la mise en œuvre des moyens nécessaires à la gestion des catastrophes naturelles. Ce système a été actualisé suite aux attentats du 11 septembre 2001. Le gouvernement fédéral et les états oeuvrent désormais de manière moins indépendante ; de nouveaux instruments de cartographies apparaissent tandis qu'un centre de gestion de crise commun gouvernement Fédéral/Etats, *Gemeinsames Melde- und Lagezentrum*, est créé en 2002. Les Etats sont toujours responsables de l'alerte qui doit être donnée idéalement dans les 6 à 72 heures précédant l'inondation. Au niveau fédéral, les informations des états sont

centralisées et utilisées à des fins d'informations et de prévention, notamment pour les autres états.

Nous concluons sur le cas de l'Allemagne en mentionnant que, si le pays affiche une réelle volonté de mettre en place des techniques de défense côtière plus douces, il semble que la tendance soit encore à l'heure actuelle au réhaussement et au renforcement des ouvrages de défense lourde, en tenant compte des effets du changement climatique. Les inondations de 2002 ont donné naissance à un programme qui a pour objectif principal l'amélioration de la protection préventive contre les inondations. Il se décline sous la forme d'amendements au code de l'urbanisme *Baugesetzbuch*, aux lois fédérales sur l'eau *Wasserhaushaltsgesetz* et *Bundeswasserstrassengesetz*, sur l'aménagement des territoires *Raumordnungsgesetz des Bundes* et sur le service météorologique allemand. L'idée est d'indiquer dans chaque Land les zones inondables suite à une inondation de période de retour centennale ainsi que les secteurs potentiellement inondables suite à une brèche dans un barrage ou un mur de protection par exemple, pour les intégrer dans les plans de développement urbain. Certaines zones pourraient alors être interdites de construction, la tendance étant, lorsque cela est possible, et comme diraient les anglais « Making Space for Water ».

3. L'exemple du Danemark

a. Les impacts du changement climatique au Danemark

Il n'existe actuellement aucune estimation officielle des effets du changement climatique au Danemark. Seule l'Autorité Côtière Danoise a déterminé, au sein d'un projet interne de recherche, quelques estimations sur les impacts du changement climatique le long des côtes danoises. Les chiffres ci-dessous se veulent l'interprétation du rapport IPCC de 2001.

	Scénario A2 (IPCC 2001)	Scénario B2 (IPCC 2001)
Élévation absolue du niveau marin à l'horizon 2050	0.13 m	0.13 m
Augmentation de la hauteur des vagues	2 %	1 %
Transport de sédiments supplémentaires de la Mer du Nord vers le Danemark	5.1 %	2.5 %
Élévation du profil transverse	0.03 m	0.03 m

Tableau 23 : Evolution de quelques paramètres climatiques à l'horizon 2100, source rapport du RIKZ intitulé *Inventory of climate change scenarios applied in the North Sea countries*, décembre 2005

L'élévation relative du niveau de la mer dépend bien sûr des mouvements tectoniques locaux. D'après l'Autorité Côtière Danoise, un soulèvement des terres de 3 cm pourra être considéré dans la partie centrale des côtes danoises de la Mer du Nord à l'horizon 2050. L'élévation relative du niveau de la mer pourrait donc être de 10 cm le long des côtes danoises de la Mer du Nord à l'horizon 2050.

Le Ministère Danois de l'Environnement a également mis en place un groupe d'experts constitué de membres, entre autres représentatifs des secteurs agricoles et touristiques ou concernés par les questions relatives à l'aménagement du territoire, à la défense côtière ou à la protection de la nature. Ce groupe est chargé de faire

des recommandations en terme de stratégie nationale pour limiter les impacts des effets du changement climatique. Il proposera différents scénarios réalistes d'évolution des paramètres climatiques qui pourront être intégrés dans les politiques de gestion des zones côtières.

b. La stratégie de défense côtière danoise

Avec ses 7300 km de côtes, le Danemark est entouré de quatre mers. 25 des 49 villes de plus de 10 000 habitants sont situées sur la côte. 40 % de la population vit à moins de 3 km du littoral.

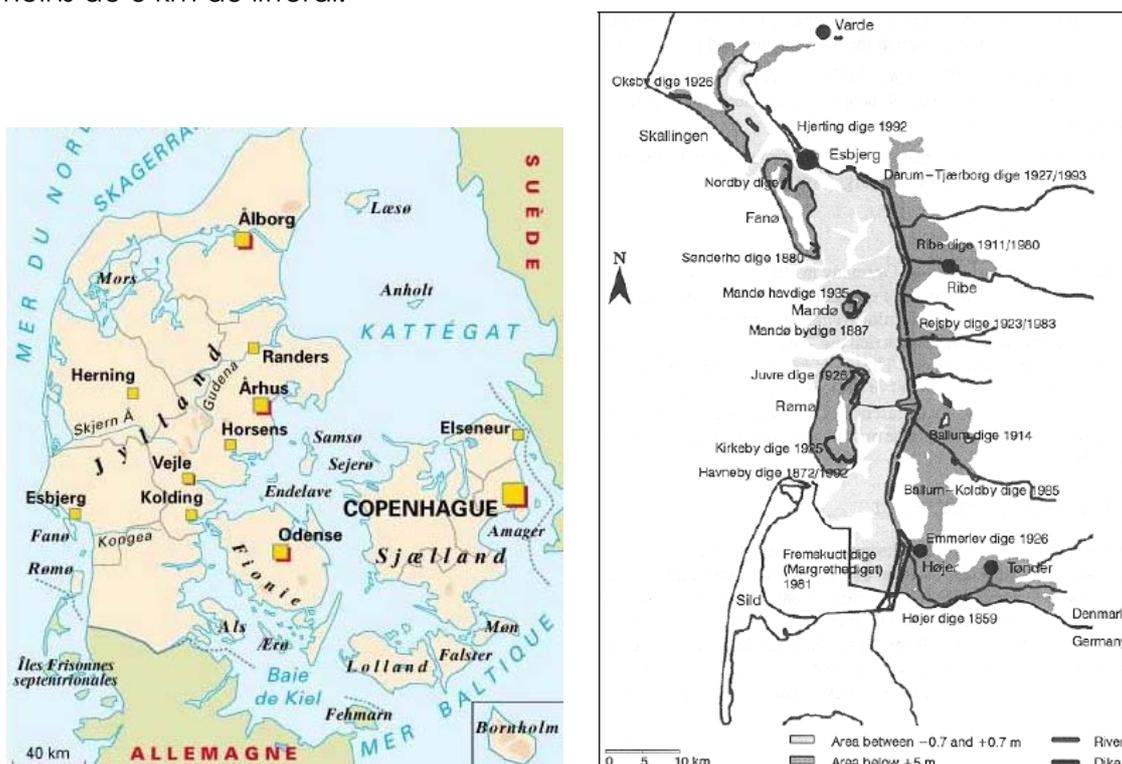


Figure 106 : Le territoire danois, source site Internet
http://www.europaplanet.com/danemark/carte_danemark.htm et
<http://www.tawinfo.nl/engels/downloads/FloodingRiskDenmark.pdf>

350 km de digues protègent les côtes entre Kattegat et la Mer Baltique. Ces digues sont relativement basses, ce qui s'explique par la quasi absence de marée et un niveau d'eau de 1.5 à 2 mètres lors d'une inondation d'occurrence cinquantennale. Ces zones ne présentent pas de danger pour les populations, même en cas de brèche dans la digue. Ceci n'est pas le cas pour le secteur côtier situé entre Esbjerg et l'Allemagne. L'amplitude tidale est de l'ordre de 1.5 mètres à 2 mètres tandis qu'une inondation de période de retour 50 ans engendrerait un niveau d'eau d'une hauteur comprise entre 4 et 4.7 mètres. 100 km de digues protègent ces terrains.

Les zones côtières de la Mer du Nord sont quant à elles protégées par des dunes tandis que des côtes basses sableuses ou argileuses protègent le reste du territoire.

Suite aux inondations aux Pays-Bas et en Allemagne de 1953 et 1962, un comité spécial a été mis en place au Danemark en 1964 pour évaluer les conditions de sécurité des ouvrages existants. Les résultats de l'étude en 1976 ont généré le

renforcement de la digue de Ribe qui devait être capable de résister à un niveau d'eau de période de retour 200 ans. D'importants travaux de maintenance ont été entrepris sur l'ensemble des digues. Le gouvernement central finance en général 50 à 70 % des frais mais peut aller jusqu'à 100 % sur l'ensemble des côtes danoises à l'exception de celles de la Mer Baltique. Ce qui n'est pas financé par le gouvernement central est à la charge des Autorités locales. Sur les côtes de la Mer Baltique, les coûts sont à la charge totale du propriétaire. Ces informations proviennent de publications tirées du site Internet du réseau d'experts néerlandais ENW pour la protection contre les inondations.

Le gouvernement danois, comme pour l'Angleterre, a basé les niveaux de protection sur une étude coûts/bénéfices. Ainsi les deux digues majeures de Ribe et Højer doivent être capables de résister à un niveau d'eau de période de retour 200 ans. Mis à part ces deux cas, les niveaux de protection des digues résultent d'accords entre les Autorités locales et le gouvernement central, en s'appuyant que les recommandations de l'Autorité Côtière Danoise. La plupart des digues importantes sont conçues pour résister à un niveau d'eau de période de retour de 50 ans.

Pour ce qui est de la protection par les dunes, les Autorités danoises ont mis en place en 1982, un plan destiné à limiter l'érosion. Un niveau de sécurité correspondant à un niveau d'eau de période de retour au moins centennale était exigé. Les dunes ont alors été renforcées par des blocs de support. Des brise-lames ont été installés dans les secteurs les plus sujets à l'érosion. Ces mesures ont été accompagnées de rechargements de plages.

Les Autorités Danoises ont toujours souhaité protéger les milieux naturels et les populations. Depuis 1937, la loi de protection de la Nature interdit toute construction dans une zone de 100 mètres élargie à 300 mètres en 2003 le long de la côte. Dans les 2700 mètres suivant s'ajoute une zone d'« urbanisation contrôlée ». Les principes de la GIZC sont donc parfaitement intégrés dans la politique danoise puisque l'idée est ici de protéger les espaces côtiers en autorisant le développement urbain ainsi que les infrastructures touristiques dans les secteurs où les enjeux économiques et sociaux sont majeurs.

A partir du 1^{er} janvier 2007, les municipalités ont pris la plupart des responsabilités en terme de protection des espaces côtiers et d'aménagement du territoire. Seule la construction d'installations techniques et d'infrastructures touristiques majeures continue à être régulée par l'Etat. Le Danemark sera divisé en cinq régions chargées de définir les grandes orientations régionales des plans d'aménagement, desquelles naîtront les plans locaux.

Nous concluons en mentionnant que si le Danemark a longtemps eu recours à la stratégie de défense lourde comme la plupart des pays européens, le pays semble désormais la coupler à des méthodes plus douces comme le rechargement de plages, couplé à un contrôle plus strict de l'aménagement du territoire. L'utilisation simultanée de brise-lames et de rechargements de plages pourrait s'expliquer, d'après l'article *Risks, safety standards and probabilistic techniques in five countries along the North Sea* tiré du site Internet du réseau d'experts néerlandais ENW pour la protection contre les inondations, par la confiance forte des Autorités locales et des populations envers les structures de défense lourde. Quoi

qu'il en soit, le Danemark a toujours souhaité préserver les espaces naturels et travaille continuellement sur ce sujet.

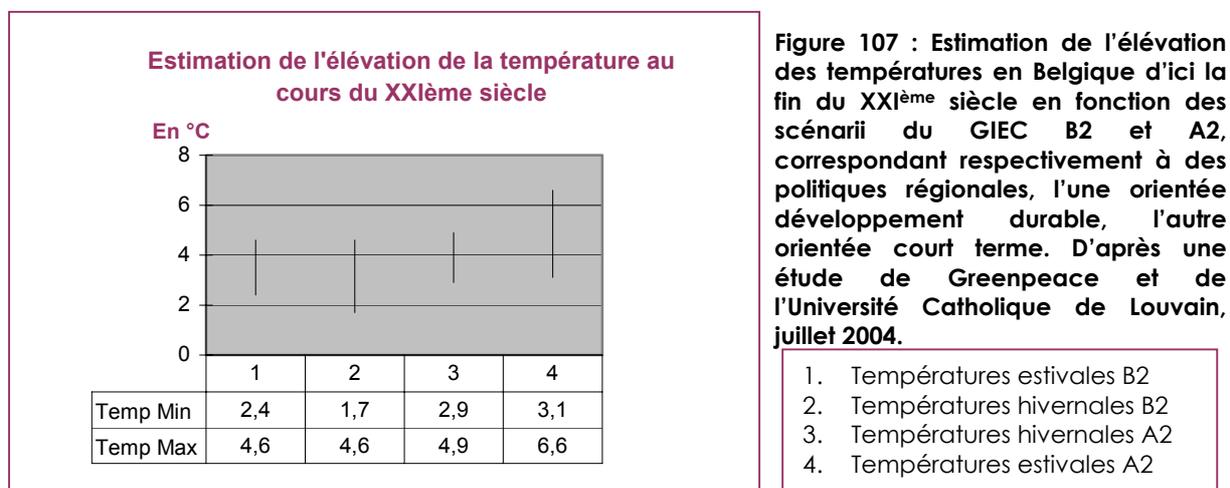
En terme de gestion de crise liée à une inondation par submersion notamment, un article du Copenhagen Post de décembre 2005 signale que le sud du Jutland et l'île de Lolland sont particulièrement vulnérables face au risque d'inondation. L'Agence Danoise de Gestion des situations d'urgence placée sous l'autorité du Ministère de la Défense Danois gère les équipes de secours à l'échelle nationale, supervise celles au niveau local et fait remonter les problèmes rencontrés aux Autorités, conformément à ce que prévoit la législation sur l'état de préparation des services de secours de 1993. Cette législation évolue constamment, l'objectif étant de toujours pouvoir répondre avec souplesse et rapidité à n'importe quelle catastrophe.

4. L'exemple de la Belgique

a. Les conséquences du changement climatique en Belgique

Les évolutions des paramètres climatiques, publiées lors de la quatrième communication nationale sur les changements climatiques en 2006 en Belgique, ont été déterminées grâce aux résultats des modèles généraux de circulation présentés dans le troisième rapport d'évaluation du GIEC et d'un ensemble de simulations issues du projet européen PRUDENCE.

Ces modèles prévoient donc pour la Belgique une hausse significative des températures d'ici 2100, avec une nette augmentation pour le scénario A2 durant l'été.



En terme de précipitations, il est prévu, en Belgique, une hausse hivernale de 3 à 30 % d'ici la fin du siècle ainsi qu'une baisse estivale allant du statut quo à une chute atteignant 50 % en moyenne. La probabilité de fortes chaleurs devrait croître de manière significative. A l'horizon 2100, un été sur deux pourrait être aussi chaud et sec que celui de 2003. Les épisodes de fortes pluies devraient également être plus importants tandis que les simulations effectuées lors du projet PRUDENCE montrent qu'il y aurait d'ici la fin du siècle une augmentation des vents extrêmement violents.

Le centre de recherche hydraulique et hydrologique a, quant à lui, publié des estimations sur l'augmentation du niveau absolu marin en Belgique entre 2000 et 2050.

Niveaux d'eau	Augmentation absolue de 2000 à 2050
Niveau de la haute marée	0.3 m
Niveau de la basse marée	0.15 m
Niveau moyen marin	0.225 m

Tableau 24 : Estimation des évolutions climatiques de certains paramètres, source rapport du RIKZ intitulé *Inventory of climate change scenarios applied in the North Sea countries*, décembre 2005

La Belgique participe à de nombreux programmes de recherche internationaux. Citons par exemple CLlimate VARIability and Predictability (CLIVAR), CLlimate and Cryosphere (CliC), Stratospheric Processes And their Role in Climate (SPARC) ou le European Network of Earth System Modelling (ENES). Des experts belges sont également présents dans des groupes tels que le GIEC ou l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM). L'Université Catholique de Louvain est fortement impliquée dans la thématique du changement climatique.

b. La stratégie de défense côtière belge

La Belgique est d'ailleurs un bon exemple de synthèse sur les stratégies utilisées pour lutter contre les effets du changement climatique.

La côte belge est actuellement protégée par une digue sur plus de 30 km, soit sur approximativement la moitié de la longueur côtière égale à 65 km. Plages et dunes assurent une grande partie de la protection de l'arrière-littoral. Néanmoins, les côtes belges sont fortement touchées par l'érosion et l'augmentation probable de la fréquence et de l'intensité des tempêtes pourrait accélérer ce phénomène. En effet, les fortes tempêtes, sous l'effet des vagues, des courants et du vent intensifient les échanges sédimentaires entre les dunes, la plage et l'avant-plage. Le sable est déposé sur l'avant plage avant d'être ramené sur la plage lors d'un temps plus calme. Or actuellement ce mécanisme est défaillant sur 60 % des zones côtières belges, laissant une situation favorable à l'érosion et fragilisant les systèmes de défenses naturelles.

Des brise-lames ont donc été installés pour réduire l'énergie arrivant sur les côtes et ainsi limiter l'érosion. Ces ouvrages durs de protection relèvent de la compétence du Gouvernement Flamand, Agence des Services Maritimes et Côtiers, Division Côtes. D'après le rapport du groupe des managers de la Mer du Nord, NSCMG, intitulé *Flooding risk in coastal areas*, les ouvrages et barrières naturelles de protection attendus doivent supporter un niveau d'eau de période de retour 1000 ans. Ce standard de sécurité n'est toutefois pas atteint partout le long de la côte. Des techniques douces de rechargement de plages sont également utilisées chaque année (rechargements compris entre 500 000 et 1 000 000 de m³).

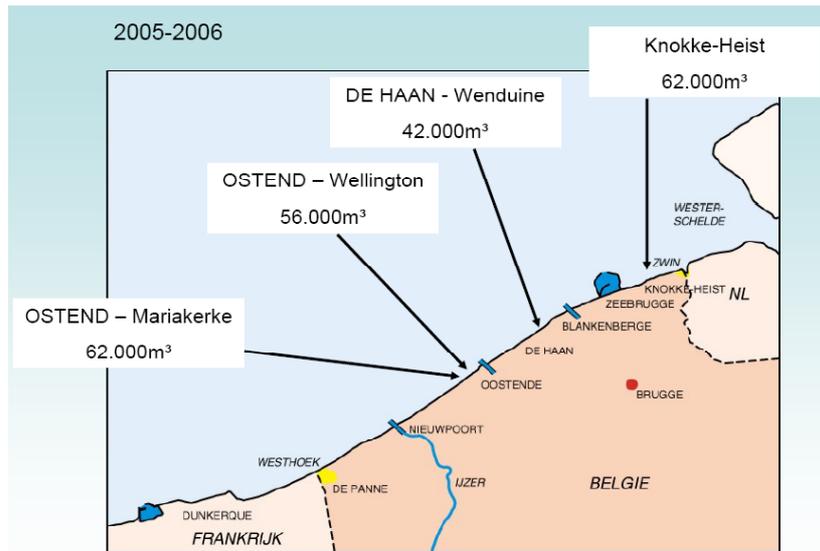


Figure 108 : Localisation des rechargements de plage en Belgique, source conférence du groupe NSCMG à Elsinore au Danemark du 13 au 15 juin 2006.

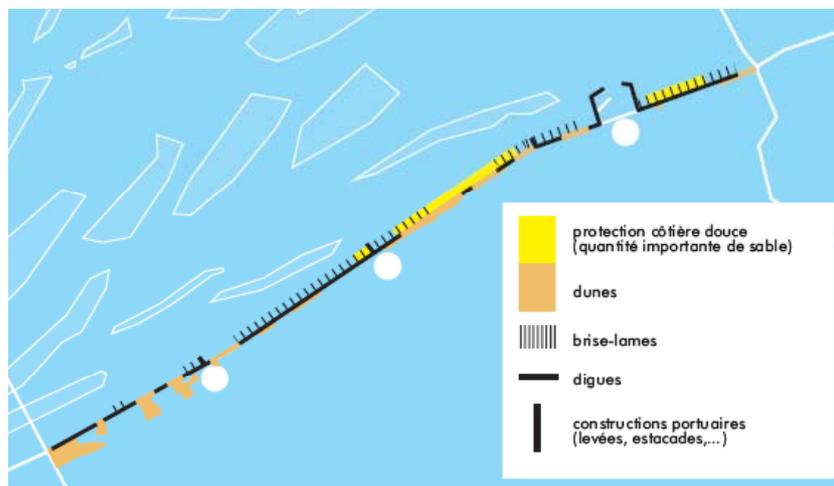


Figure 109 : Protection côtière du littoral belge, source rapport du projet GAUFRE, intitulé *Un Océan d'Espace, Vers un plan de structure d'aménagement pour une gestion durable de la Mer du Nord*, 2005

Une élévation du niveau de la mer de 60 cm est prévue d'ici 2100 pour ce qui est du renforcement des digues.

Pour affiner ces données, un cabinet de consultants belges, IMDC, a publié en 2005 les évolutions des niveaux d'eau relatifs marins moyens et des plus hautes marées à l'horizon 2055. Ces données devraient, à terme, être intégrées dans les plans de construction des ouvrages de défense des côtes belges.

Niveaux d'eau	Augmentation relative de 2005 à 2055
Niveau de la haute marée	0.3 m
Niveau moyen marin	0.25 m

Tableau 25 : Scénario de changement climatique qu'il serait bon de prendre en compte dans la stratégie de défense côtière belge, source rapport du RIKZ intitulé *Inventory of climate change scenarios applied in the North Sea countries*, décembre 2005.

L'estuaire de l'Escaut a un caractère assez particulier compte tenu de sa très grande sensibilité aux marées et de l'importance de la densité de population dans le bassin versant.

Le plan Sigma, adopté suite aux inondations de 1976, avait pour objectif principal la défense du bassin de l'Escaut maritime contre les raz-de-marée en provenance de la Mer du Nord. Il se déclinait en trois points :

- L'aménagement de territoires inondables contrôlés ou « zones d'inondations contrôlées » et de digues de séparation
- Le réhaussement et le renforcement des 512 km d'infrastructures de défense
- La construction d'un barrage anti-tempête à Oosterweel.

Les zones d'inondations contrôlées comportent de nombreux avantages. Un aménagement optimal des terres permet de créer de véritables espaces écologiques, créant ainsi des opportunités sociales, économiques et environnementales, tout en protégeant les populations des inondations. La bonne qualité de l'eau est assurée puisque sédiments et polluants sont maintenus dans les bassins de rétention. Ces zones constituent également un réel habitat pour la faune et la flore et contribuent à promouvoir le tourisme dans ces régions.

Elles sont notamment utilisées pour garantir la protection contre les inondations et contenir l'excès d'eau lors de violentes tempêtes. Citons l'exemple du site de Tielrodebroek dans l'estuaire du Scheldt. La hauteur de la digue palier située côté mer a été diminuée de manière à ce que, lorsque les niveaux d'eau atteignent leurs valeurs maximales, l'eau se répande dans la zone d'inondations contrôlées. Le principe est explicité grâce au schéma ci-dessous.

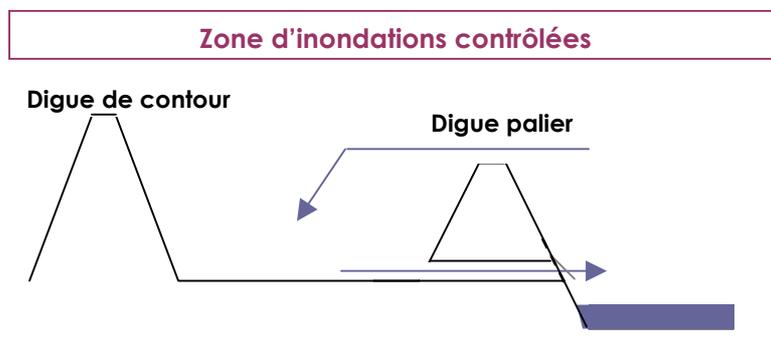


Figure 110: Un des principes d'une zone d'inondations contrôlées. En cas de débordement, l'eau passe au dessus de la digue de palier et se répand dans la zone d'inondations contrôlées. L'eau repart ensuite vers la mer lorsque celle-ci est plus calme.

Un autre principe de zone d'inondations contrôlées avec cette fois création d'une zone écologique est présenté ci-dessous :

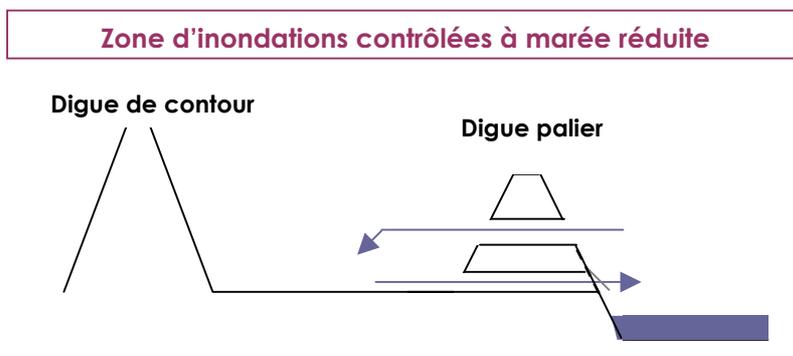


Figure 111: Principe d'une zone d'inondations contrôlées avec création d'une zone écologique. A marée montante, l'eau se répand dans la zone d'inondations contrôlées. A marée descendante, l'eau repart vers la mer.

D'après une vidéo du site <http://www.comcoast.org/>

La quatrième communication nationale sur les changements climatiques de 2006 estime que le niveau de risque, en Belgique, dans les conditions climatiques actuelles, correspond à une inondation tous les 350 ans. D'ici la fin du siècle, la fréquence pourrait être réduite à une inondation tous les 25 ans, à cause de l'élévation de l'océan. Face à ce constat, un nouveau plan Sigma a été adopté en 2005. De nouvelles zones d'inondations contrôlées devraient apparaître dans les prochaines années tandis qu'une élévation maximale du niveau de la mer de 60 cm doit être prise en compte. Le Parlement Flamand a souligné l'importance d'avoir une vision long-terme de la situation, notamment en matière de sécurité, d'accessibilité et de naturalité. Renforcer les digues ne résout pas le problème de maîtrise des submersions. Au contraire il l'aggraverait car la population a tendance à se sentir plus en sécurité avec des digues plus hautes, ce qui n'est pas le cas. L'idée est donc de contrôler les inondations pour en limiter les dégâts.

Un groupe projet FRaME ou « Flood Risks Management in Estuaries » étudie actuellement cette possibilité de créations de zones d'inondations contrôlées dans les estuaires depuis 2003. Le projet est a priori terminé. Différents sites sont testés au Royaume Uni, en Belgique et aux Pays-Bas.



Figure 112 : Sites tests des zones d'inondations contrôlées
 Source site Internet <http://www.frameproject.org>

Si les zones d'inondations contrôlées peuvent être une solution adaptée, elles ont un coût à la fois social, financier et environnemental. Citons l'exemple du front marin d'Antwerp sur lequel des études portent quant à l'aménagement d'une zone d'inondations contrôlées. Il faut, en effet, prendre en compte les développements économiques importants que connaît la région, et en particulier l'expansion possible du port, la présence d'une centrale nucléaire à proximité de la zone d'étude et les résistances des habitants. Il faut évidemment que ces zones contribuent à réduire le risque d'inondation.

Ces différentes stratégies de lutte contre l'impact du changement climatique sur les espaces côtiers montrent donc la nécessité de trouver des solutions adaptées à chaque endroit du littoral. Il existe une grande variabilité spatiale, de par les enjeux et les paramètres physiques du milieu naturel, différents d'une zone à l'autre. La prise en compte des conséquences du changement climatique sur le littoral est donc une question difficile qu'il est toutefois nécessaire de traiter dans une optique de développement et de réduction de la vulnérabilité des espaces côtiers. La Belgique est d'ailleurs membre du projet European Spatial Planning : Adapting to Climate Events (SPACE), financé par l'Union européenne et le gouvernement britannique.

Ce projet a pour objectif principal la recommandation de stratégies d'adaptation au changement climatique dans le cadre des processus d'aménagement des territoires aux niveaux européen, national et local. D'autre part, la Belgique souhaite mettre en place un nouveau plan de gestion intégrée des côtes flamandes sur la totalité des côtes flamandes à l'exception du centre d'Ostende. Ce projet qui a débuté en 2006 devrait s'achever fin 2009.

En matière de gestion de crise, l'arrêté royal du 31 janvier 2003 définit le cadre légal d'interventions du gouvernement fédéral en matière de planification d'urgence lorsqu'une ou plusieurs des caractéristiques suivantes sont réunies :

- Au moins deux provinces sont concernées
- Les moyens à utiliser dépassent les moyens dont un Gouverneur de Province dispose dans le cadre de sa mission de coordination
- Menace ou présence de nombreuses victimes
- Survenance ou menace d'effets majeurs sur l'environnement ou la chaîne alimentaire
- Atteintes ou menaces d'atteintes aux intérêts vitaux de la nation ou aux besoins essentiels de la population
- Nécessité de mise en œuvre et de coordination des différents départements ministériels ou organismes fédéraux
- Nécessité d'une information générale à la population.

Lors du déclenchement d'une phase fédérale, trois cellules d'évaluation, de gestion et d'information sont convoquées au sein du Centre Gouvernemental de Coordination et de CRise (CGCCR). La Direction Générale Centre de Crise a publié, au Moniteur Belge, en Mars 2006, l'Arrêté Royal de février 2006 qui poursuit des objectifs d'actualisation des principes de planification d'urgence, d'intégration dans un texte réglementaire des évolutions depuis la circulaire du 11 juillet 1990, notamment en matière d'approche multidisciplinaire et d'analyse des risques. Elle fournit également une aide aux Bourgmestres et aux Gouverneurs dans le cadre de leur obligation légale d'établir un plan d'urgence et d'intervention pour gérer toute situation de crise à laquelle ils seraient confrontés.

Suite aux inondations de 2005, la Direction Générale Centre de Crise a débuté la rédaction d'un plan national d'urgence qui pourrait s'appliquer lors d'inondations continentales, de marées de tempêtes dans l'Escaut et de montées soudaines du niveau d'eau suite à une pluie violente ou à la rupture d'une digue.

Nous concluons sur le cas de la Belgique en mentionnant que, face au changement climatique, le pays semble s'adapter en multipliant les zones d'inondations contrôlées et les rechargements de plages. La Belgique semble désormais plus préoccupée par les questions liées à l'aménagement des zones côtières. Actuellement, les ouvrages de protection des côtes requièrent un permis d'urbanisme auquel doit être jointe une étude d'incidence sur l'environnement. Les zones dunaires sont interdites à toute construction, à l'exception des travaux réalisés pour protéger les espaces côtiers. Ces travaux sont toutefois interdits durant la saison de nidification, du 15 avril au 15 septembre. Pour la première fois en 2005, le rapport environnemental flamand de 2005 comporte un paragraphe intitulé « Côtes et mer » dans lequel figurent les aires des espaces protégés, notamment par les directives oiseaux et habitats. Le projet GAUFRE, ou *Vers un schéma de structure pour une gestion durable de la mer du Nord*, illustre également une volonté de la part du

gouvernement fédéral de réaliser une planification spatiale optimale de la partie belge de la Mer du Nord. Au cours de ce projet, une méthodologie favorisant l'interdisciplinarité et la participation publique a été développée.

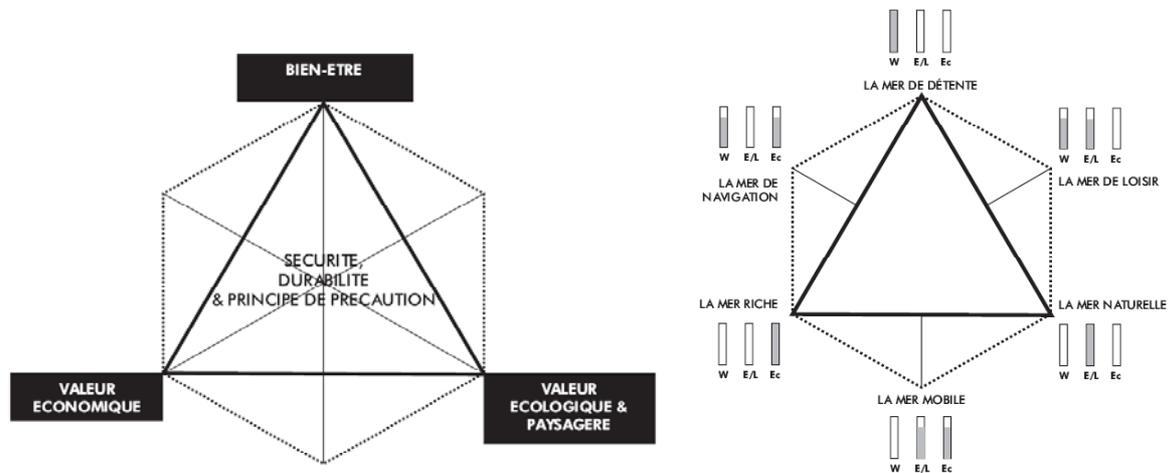


Figure 113 : Principe d'une planification optimale du littoral belge, source rapport du projet GAUFRE, intitulé *Un Océan d'Espace, Vers un plan de structure d'aménagement pour une gestion durable de la Mer du Nord*, 2005

5. L'exemple des Pays-Bas

a. Les conséquences du changement climatique aux Pays-Bas

La division de recherche climatique et sismologique de l'Institut Royal Météorologique Hollandais KNMI est responsable des recherches et de la diffusion des informations relatives au changement climatique. Selon un récent rapport publié en mai 2006, les estimations ont été réalisées à partir de la démarche suivante :

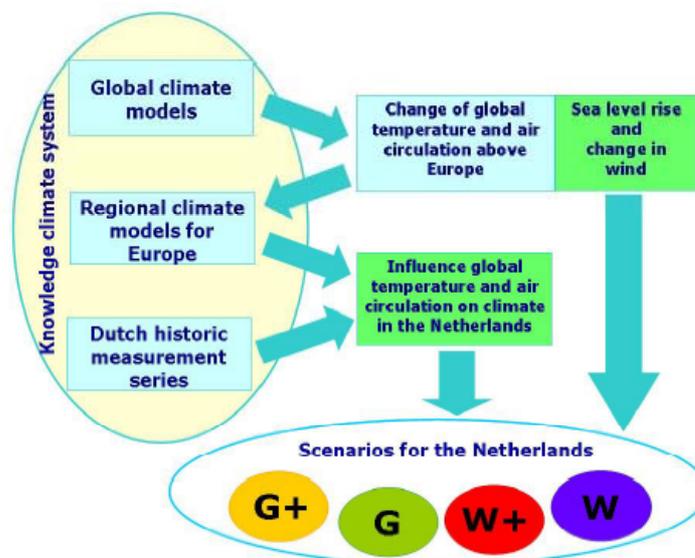
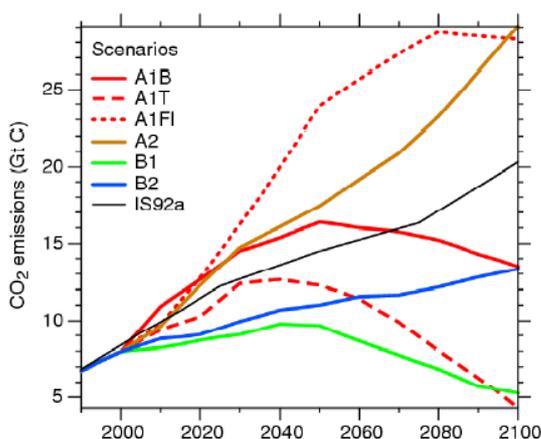


Figure 114 : Présentation schématique de la méthodologie utilisée pour la construction des scénarios climatiques du KNMI, source rapport intitulé *KNMI Climate Change Scenarios for the Netherlands*, 2006.

Les scénarios G et G+ correspondent globalement aux scénarios B1 et B2 du GIEC tandis que les scénarios W et W+ concordent davantage avec les scénarios A1 et A2 du GIEC.



SRES Scenario	Relevant scenario's for 2050	Relevant scenario's for 2100
A2	W, W+	W, W+
B1	G, G+	G, G+
B2	G, G+	G, G+
A1FI		
A1B	W, W+	W, W+, G, G+
A1T		

Figure 115 : Correspondance entre les scénarios d'évolution des gaz à effet de serre des Pays-Bas et du GIEC.

La température moyenne du pays devrait augmenter de 1 à 2°C d'ici 2050 par rapport à 1990. Les hivers devraient être plus humides comme dans les autres pays européens.

Le dernier rapport de 2006 du KNMI estime l'élévation du niveau de la mer comprise entre 35 et 85 cm à l'horizon 2100, avec un scénario moyen de 60 cm. Les conclusions sont récapitulées dans le tableau ci-dessous :

		G	G+	W	W+
2050	Augmentation du niveau marin	15 - 25 cm	15 - 25 cm	20 - 35 cm	20 - 35 cm
2100	Augmentation du niveau marin	35 - 60 cm	35 - 60 cm	40 - 85 cm	40 - 85 cm

Tableau 26 : Augmentation du niveau moyen marin absolu, source conférence du groupe NSCMG à Elsinore au Danemark du 13 au 15 juin 2006.

b. La stratégie de défense côtière aux Pays-Bas

Dans les années 1300, une grande partie des Pays-Bas était encore submergée. Progressivement, les Néerlandais conquièrent des terres en construisant des digues et en évacuant les eaux excédentaires à l'aide de moulins à vent. De nombreuses stations d'assèchements, financées par de riches marchands d'Amsterdam permirent aux XVI^{ème} et XVII^{ème} siècle d'aménager de grands polders²⁰.

Actuellement les deux tiers des Pays-Bas sont menacés par le risque d'inondation par la mer. Ces zones regroupent une densité de population importante ainsi qu'un nombre conséquent d'infrastructures et d'activités vitales pour l'économie du pays. Le bon fonctionnement du pays tient avant tout à l'existence d'ouvrages de protection fiables.

²⁰ Les polders sont des étendues de terre dont le niveau est inférieur à celui de la mer. Les polders sont réalisés par drainage qui provoque l'assèchement de marais, de lacs ou de zones littorales.

Les inondations de 1953 ont rappelé la vulnérabilité du territoire. Le Sud-Ouest du pays a été complètement dévasté, 1800 personnes sont décédées, plus de 150 000 hectares ont été submergés. Suite à cette catastrophe, le plan Delta a été élaboré et mis en oeuvre. Il avait pour objectif principal la construction de digues et de barrages destinés à protéger le Sud-Ouest des Pays-Bas contre les inondations.

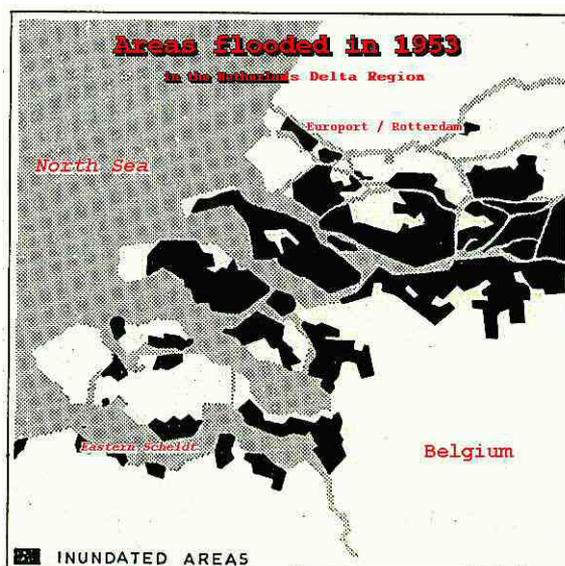


Figure 116 : Illustration des zones inondées aux Pays-Bas en 1953, source mémoire de Benoît Suret, 2006

Un barrage anti-tempête en Escaut Oriental, à Oosterscheldekering, a été construit dans le cadre du Plan Delta. L'ouvrage hydraulique est impressionnant. Il compte 62 vannes d'acier coulissant entre 656 piliers de béton. En temps normal, les vannes sont levées laissant libre champ aux marées.

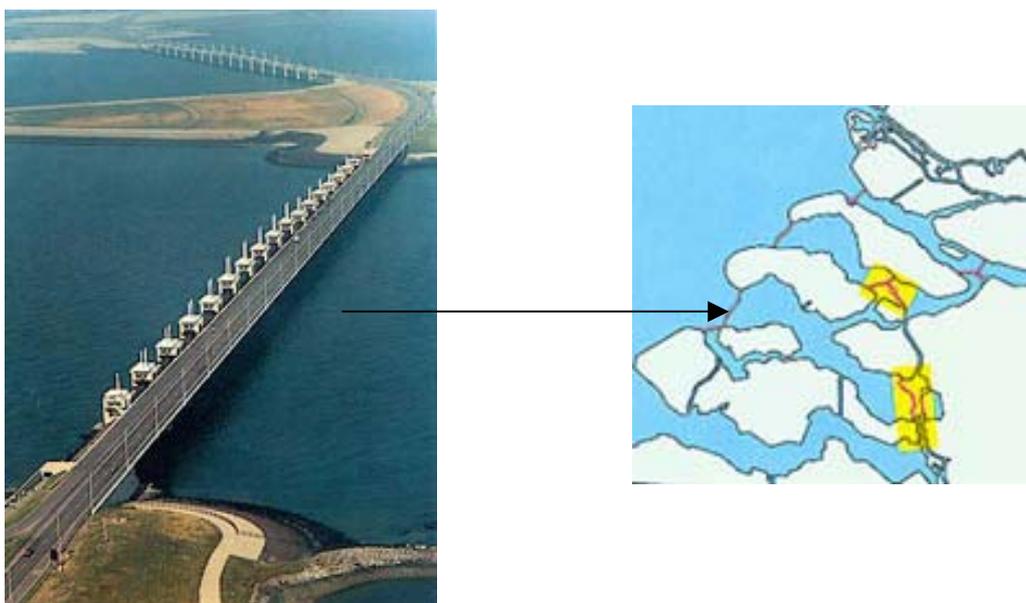


Figure 117 : Le barrage d'Oosterscheldekering, source mémoire de Benoît Suret, 2006

En 1993 et 1995, de nouvelles inondations eurent lieu. Les dégâts matériels furent nombreux. Suite à ces événements le Plan Delta fut actualisé et une loi fut

adoptée en 1996. Elle prescrit les niveaux de sécurité à respecter pour chaque tronçon de digue. Cette loi préconise une actualisation de ces normes tous les cinq ans depuis 1996. La seconde évaluation de 2006, d'après la conférence des managers de la Mer du Nord qui s'est tenue au Danemark en juin 2006, montre par exemple que 54 % des systèmes de défense aux Pays-Bas sont fiables tandis que 23 % ne sont pas considérés comme sûrs. La loi ne mentionne par contre pas, d'après le rapport de décembre 2005 du RIKZ intitulé *Inventory of climate change scenarios applied in the North Sea Countries*, les suppositions à faire quant aux scénarios climatiques à adopter lors de la conception de nouveaux ouvrages. Il existe en fait trois types de politiques. Un scénario d'augmentation du niveau relatif marin de 20 cm par siècle est préconisé pour les politiques court terme dont la durée de vie n'excède pas cinq ans, comme le rechargement de plages. De petits investissements et un grand niveau de flexibilité sont conseillés. Un scénario moyen, équivalant à une augmentation du niveau relatif moyen de 60 cm par siècle est requis pour les politiques à échéance 50 – 100 ans. Lorsque de gros investissements sont nécessaires pour une politique très long terme (à échéance 100 – 200 ans) et lorsque ceux-ci sont peu modulables, une élévation du niveau marin relatif de 85 cm par siècle doit être prise en compte ainsi qu'une augmentation de 10 % de la vitesse du vent. De l'espace doit être préservé pour les solutions futures de renforcement.

La stratégie de défense côtière aux Pays-Bas semble actuellement davantage tournée vers le renforcement des digues avec 742 millions d'euros prévus pour la période 2007-2020.

D'après le rapport de 2005 du groupe de travail des pays de la Mer des Wadden de 2005, à savoir le Danemark, l'Allemagne et les Pays-Bas, intitulé *Solutions for Sustainable Coastal Protection in the Wadden Sea Region*, le Ministère des Transports, des Travaux Publics et de la gestion de l'eau hollandais fournit les conditions aux limites hydrauliques. Des organismes plus locaux, en anglais les *Water Boards*, vérifient la conformité des ouvrages avec ces valeurs et réalisent des plans de renforcement si nécessaire. Ces plans sont ensuite soumis au ministère qui définit des priorités d'intervention et décide de ceux qui seront mis en application. Le gouvernement finance les travaux de renforcement tandis que les *Water Boards* sont responsables de la maintenance journalière. Il est à noter que les Pays-Bas font partie du projet COMCOAST. Ils souhaitent donc développer des solutions nouvelles pour freiner au maximum les mécanismes de dégradation des digues.

Toutefois, les Pays-Bas se tournent progressivement vers le recours aux méthodes plus douces. Les premiers rechargements de plage ont eu lieu en 1979 à Texel et Ameland.



Figure 118 : Localisation des sites de Texel, Ameland et Egmond aux Pays-Bas, source <http://www.globalsurfers.com/maps/region/Hollandnorth.gif>

La quantité totale de sable déversée sur l'ensemble du pays entre 1979 et 2002 a été de 47.6 millions de m³. Avec une augmentation du niveau de la mer de 20 cm par siècle, cette quantité pourrait doubler d'ici la fin du siècle, l'idée étant de maintenir le trait de côte de 1991. Les dunes constituent également un système de défense efficace et le gouvernement hollandais s'emploie à les préserver. Des études portant sur la sécurité des dunes sont en cours. Parallèlement, le concept de drainage des plages est expérimenté sur le site d'Egmond pendant trois ans, jusqu'en 2009 sur une longueur de 6 km.

En matière de plans d'aménagement du territoire, le Ministère de l'Environnement et du Logement dicte les grandes lignes. Elles sont appliquées dans les plans régionaux et revus tous les dix ans. Des plans plus détaillés existent également à l'échelle locale. Le dernier plan régional de 2004 prend davantage en compte les effets du changement climatique. De l'espace supplémentaire est par exemple laissé aux fleuves majeurs. Dans la province de Friesland, une zone tampon de 125 m côté terre et 200 m côté mer, hors des villes côtière, doit être libre le long des systèmes de défense. Sauf en cas d'enjeux économiques majeurs, aucune infrastructure n'est autorisée dans ce secteur. Pour les villes côtières, le plan d'aménagement préconise la réalisation d'une zone tampon de 50 m côté terre.

Toutefois, les mesures de prévention ne peuvent pas suffire car le risque zéro n'existe pas. Ainsi un système d'information, le *High-water Information System* ou HIS a-t-il été mis en place suite aux inondations de 1993 et 1995. Il a pour objectifs principaux :

- Le suivi en temps réel des niveaux d'eau en cas de tempêtes. Des informations sont ainsi données sur la gravité de la situation compte-tenu des connaissances détenues sur la résistance des ouvrages de défense ;
- La diffusion d'informations quant aux conséquences possibles d'une inondation des terres suite à la rupture d'un ouvrage de défense ;
- L'information sur les mesures à mettre en œuvre pour limiter au maximum les risques.

HIS possède donc deux missions. L'une est opérationnelle (suivi des données en temps réel) tandis que l'autre vise à préparer les politiques publiques à mettre en œuvre.

Dans cette phase de préparation, il existe trois modules. Le module « inondation » s'intéresse aux zones potentiellement inondables lors de la rupture d'une brèche. Il donne également un aperçu de l'efficacité des mesures possibles de protection. Le module « pertes matérielles et humaines » estime les dégâts causés par une inondation. Les bénéfices d'une évacuation sont aussi évalués. Enfin le module « évacuation » s'intéresse au temps, aux différents itinéraires employés en fonction de paramètres climatiques, de l'état des lieux de la circulation pour acheminer les personnes vers des endroits sûrs. Les simulations effectuées ont été utilisées dans différents projets, comme FLORIS/VNK (Flood Risk in the Netherlands) qui vise à calculer la probabilité de submersion derrière chacun des 53 tronçons de digues, l'identification des éventuels points vulnérables sur les systèmes de défense et l'évaluation des conséquences d'une inondation et de ses incertitudes. Le projet devrait se poursuivre jusqu'en 2009. Les simulations effectuées servent également à fournir un appui scientifique aux décideurs politiques chargés de l'élaboration des plans d'aménagement des territoires et des plans de gestion de crise.

Les Pays-Bas, particulièrement vulnérables face au risque d'inondation, combinent stratégies de défense lourde et douce pour se protéger contre les risques de submersion. Les niveaux de sécurité sont spécifiques à chaque tronçon de digue et les systèmes de protection doivent en général pouvoir supporter des niveaux d'eau de périodes de retour comprises entre 2000 et 10 000 ans. Les recherches sur les effets du changement climatique ou les conséquences d'une submersion causée par une brèche dans un ouvrage par exemple se poursuivent pour tenter d'adapter continuellement les plans de secours et d'aménagement du territoire. Les premières conclusions du projet FLORIS ont montré que les dégâts pouvaient être réduits en limitant l'urbanisme dans les zones côtières. Si cette constatation entraîne parfois des réticences de la population, surtout dans un petit pays comme les Pays-Bas, l'idée mûrit progressivement, comme le montre le plan d'aménagement de Friesland.

C. La gestion des zones côtières en France

La France compte 5 500 km de côtes en métropole et 1 500 km en Outre-Mer. Sur les 36 778 communes, 883 sont littorales maritimes. Elles représentent 22 250 km², soit 4.05 % du territoire métropolitain. Comme nous l'avons vu dans le chapitre 1, les enjeux sur ces façades maritimes sont forts et les risques côtiers grandissants, notamment en raison des effets du changement climatique.

1. Un bref historique sur la politique du littoral en France

Les fondements de la politique d'aménagement du littoral datent de 1973, suite au rapport d'un groupe d'études créé par le comité interministériel d'aménagement du territoire de 1971. Ce groupe préconise l'institution d'un opérateur foncier dédié à la sauvegarde et à la mise en valeur d'un tiers du linéaire côtier naturel en partenariat avec les collectivités territoriales concernées. Ainsi le Conservatoire du littoral et des rivages lacustres est-il créé en 1975. Un an plus tard, des orientations de gestion sont définies. L'urbanisation du bord de mer doit être évitée, les constructions reportées le plus en arrière possible du rivage de bord de mer et les zones naturelles séparées des zones urbanisées. Ces principes sont repris en 1979 dans la directive d'Ornano relative à la protection et à l'aménagement du territoire.

La loi Littoral de 1986 marque une réelle avancée dans le partage des responsabilités juridiques et opérationnelles. Elle mentionne les bénéfices d'une coopération entre les parties prenantes et la nécessité d'avoir une vision long-terme. Ces orientations sont au nombre de sept d'après le rapport français d'application de la Recommandation du Parlement européen et du Conseil du 30 mai 2002 relative à la mise en oeuvre d'une stratégie de gestion intégrée des zones côtières en Europe. Il faut :

- Organiser l'aménagement en profondeur et non pas le long du rivage,
- Encadrer l'extension de l'urbanisation qui doit se faire dans la continuité de ce qui existe ou sous la forme de constructions intégrées à l'environnement,
- Définir les espaces côtiers les plus vulnérables face à l'urbanisation croissante qui devront faire l'objet d'une attention plus particulière,
- Préserver de toute urbanisation la bande des 100 mètres dans les zones encore naturelles et, de façon plus générale, éviter de porter atteinte aux rivages naturels,
- Interdire l'urbanisation à certains endroits pour préserver la « trame verte » du territoire,
- Protéger les espaces caractéristiques du territoire naturel en n'y prévoyant que des aménagements légers et réversibles à l'exception des équipements nécessaires à l'exercice des activités économiques traditionnelles ou à l'accueil du public,
- Permettre le libre accès au rivage.

Parallèlement, des outils d'aménagement et de planification sont mis en place. Les Schémas de Mise en Valeur de la Mer (SMVM) sont institués par l'article 57 de la loi n° 83-8 du 7 janvier 1983. Ils arbitrent les différentes utilisations de la terre et du littoral. Les Directives Territoriales d'Aménagement (DTA), créées par la loi de 1995 relative à l'aménagement et au développement des territoires, sont quant à elles des documents de planification élaborés par l'Etat, sous l'autorité du préfet, et soumis à enquête publique. Elles mettent en cohérence les objectifs contradictoires de développement d'infrastructures et de préservation des espaces naturels. Enfin les Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) fixent les grandes orientations de la gestion des ressources en eau dans les six bassins hydrographiques. A un niveau territorial plus fin, les Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) fixent les objectifs d'utilisation, de mise en valeur et de protection des ressources en eaux superficielles et souterraines tant d'un point de vue quantitatif que qualitatif, des écosystèmes aquatiques ainsi que des zones humides.

La loi n° 85-729 du 18 juillet 1985, modifiée par la loi du 2 février 1995, relative aux espaces naturels sensibles, celle du 2 mai 1930 sur les sites classés et inscrits, la loi n° 76-629 du 10 juillet 1976 concernant les réserves naturelles ainsi que les arrêtés de biotopes depuis 1976 permettant de prévenir la disparition de certaines espèces, s'inscrivent également dans les outils réglementaires de protection des espaces naturels.

Si les responsabilités de chacun semblent clairement identifiées, la coopération entre acteurs manque. Plusieurs événements comme la catastrophe de l'Erika ou les tempêtes de décembre 1999 ont contribué à une véritable prise de

conscience des Autorités quant à la nécessité de faire évoluer non seulement les instruments mais aussi les principes de la politique nationale du littoral de façon à favoriser une approche plus intégrée.

2. La stratégie française de gestion intégrée des zones côtières

La volonté française d'adopter une démarche de gestion intégrée date de 2001 mais il faut attendre le rapport de la Commission du Littoral du Conseil National de l'Aménagement du Territoire (CNADT) pour que la nouvelle politique du littoral se traduise par des mesures législatives et des décisions gouvernementales.

La décision de mettre en œuvre la recommandation européenne sur la gestion intégrée des zones côtières a été prise en avril 2003 lors d'un Comité Interministériel de la Mer. Dix mois plus tard, les modalités d'application sont définies tandis qu'un appel à projet est lancé en janvier 2005 par le Comité Interministériel de l'Aménagement et du Développement des territoires (CIADT) et le secrétariat général de la mer, l'objectif étant de promouvoir le développement équilibré des littoraux par une gestion intégrée des zones côtières. 25 projets locaux ont été retenus. Les plus efficaces seront généralisés par voie réglementaire.

Enfin, la loi du 23 février 2005 relative au développement des territoires ruraux crée une instance nationale pour la politique du littoral, le Conseil National du Littoral.

L'approche choisie repose sur la concertation et la coordination de la vision des acteurs et de leurs actions. Chacun conserve ses responsabilités mais les instruments de planification sont établis de manière coordonnée. Il doit y avoir cohérences descendante et ascendante des stratégies. Les niveaux locaux intègrent les stratégies nationales tandis que le niveau régional peut se faire le porte parole des niveaux locaux auprès du gouvernement en faisant remonter leurs préoccupations et leurs attentes.

Ces principes et outils réglementaires ont donné naissance à divers projets. Ainsi suite à la loi n° 2006-436 du 14 avril 2006 relative aux parcs nationaux, parcs naturels marins et parcs naturels régionaux, le parc naturel marin d'Iroise à l'ouest de la Bretagne est-il en cours de création. Le plan de gestion du parc s'attachera à prendre en compte l'ensemble des enjeux du territoire, à informer et sensibiliser le grand public quant à la nécessité de préserver les espaces naturels, à restaurer les milieux trop dégradés, à aménager des accès et à assurer l'entretien de certains sites. Cette gestion se fera essentiellement de manière contractuelle. Nous pouvons également citer les efforts fournis en matière de politique agricole. Plus de la moitié des agriculteurs du littoral a actuellement choisi de souscrire à des contrats environnementaux qui leur permettent de bénéficier de financements nationaux et européens. Il s'agit essentiellement de Contrats Territoriaux d'Exploitation (CTE) et de Contrats d'Agriculture Durable (CAD). En Charente-maritime, ces financements ont permis de convertir certains secteurs à l'agriculture biologique, de remplacer le traitement phytosanitaire par un traitement mécanique ainsi que de maintenir et de reconquérir des prairies permanentes des marais charentais.

Ces projets qui favorisent l'approche intégrée des zones côtières, vont de pair avec les initiatives de recours aux techniques de défense douce, certes actuellement, semble-t-il, moins nombreuses en France que chez nos voisins de la Mer du Nord, mais qui se développent progressivement.

Le rapport des journées d'Etude de l'Association Nationale des Elus du Littoral (ANEL) des 27 et 28 avril 2006 à Torréilles cite quelques exemples.

Le site des Sables d'Olonne – Saint-Raphaël, soumis à une forte érosion avec des niveaux de haut de plage situés en dessous de la cote de pleine mer lorsque les coefficients de marée sont élevés, utilise le procédé Ecoplage. Le principe consiste à enterrer un drain dans le sol avec une pompe. En cas de mauvais temps, l'eau est aspirée par la pompe et le sédiment reste sur la plage. Une canalisation de refoulement restitue ensuite l'eau à la mer. Si 16 600 € sont dépensés chaque année, les promesses d'Ecoplage sont tenues. L'érosion est stabilisée, le haut de plage s'est élargi tandis que sur la partie est, le rocher a été recouvert de sable sur plusieurs centaines de mètres entre 1999 et 2005. Ce procédé est pour ce cas moins cher que le rechargement de plages, qui ici est à écarter en raison de la faible granulométrie du sable et de l'absence de gisements de cette même granulométrie.

Pourtant le rechargement de plage n'est pas à bannir puisqu'il est utilisé à Châtelaiillon-Plage depuis 1989. Pour répondre aux exigences touristiques et à l'érosion progressive de la plage, l'équipe municipale décide en 1989 de lancer des travaux d'une durée de 3 ans permettant un réensablement massif sur une large partie du linéaire de la plage. En 1998, un apport de l'ordre de 100 000 m³ de sédiments est déposé sur 600 m tandis qu'en 2004, 60 000 m³ sont déposés sur la côte Nord.

Sur le site de Plobannalec-Lesconil, dans le Sud Finistère, cinq ouvrages STABIPLAGE® perpendiculaires au trait de côte ont été installés. Les ouvrages en géocomposites permettent de diminuer l'énergie des courants et favorisent ainsi le dépôt de sédiments, à l'origine du réengraissement des plages et de la protection de la dune. Les ouvrages sont à terme recouverts par les sédiments. Le projet a débuté en mars 2004. Le suivi est assuré par l'Université de Brest et le CETMEF. Il permettra de quantifier et d'évaluer les processus de captage ainsi que le maintien sédimentaire opéré par ces ouvrages.



Figure 119 : Illustration de la technique STABIPLAGE®, source site Internet <http://www.stabiplage.com/>

Enfin, un projet de By-pass à Capbreton sur le littoral landais est à l'étude. Ce secteur est caractérisé par la présence d'un gouffre naturel à l'entrée du port qui induit des modifications très importantes en terme de propagation de la houle. La solution de by-pass est retenue pour rétablir le fonctionnement naturel de la zone. Le réseau routier ne permettant pas le rechargement par camion, un hydroéjecteur permet de mettre le sable en émulsion sur la plage sèche et aspire celui-ci par dépression puis le transfère à l'ensemble des plages à recharger par le biais de conduites.

Ces quelques exemples montrent désormais la réelle préoccupation quant à la nécessité de développer des solutions plus écologiques. Les ouvrages de défense lourde ne sont plus l'unique solution de protection côtière et de maintien du trait de côte. Des solutions et techniques alternatives existent. Chaque pays progresse à son rythme en fonction de ses traditions, des enjeux présents sur le territoire et de l'importance donnée à la gestion côtière par les différents gouvernements. Il est à remarquer l'importance de la coopération internationale qui permet, d'une part, de dynamiser les projets en cours et de tirer profit des expériences de ses voisins.

III. Conclusion

La constatation du manque de prise en compte des conséquences du changement climatique et la présence de forts enjeux sur le littoral a incité la DIREN Nord – Pas de Calais à recenser les études et projets d'études existant aux niveaux régionaux, nationaux et internationaux pour tirer profit de l'expérience et des connaissances en terme de gestion côtière, de ses voisins européens de la Mer du Nord. L'importance de la communication est évoquée de façon récurrente dans l'ensemble des projets. L'information au public, notamment par l'apprentissage de gestes simples, est en effet essentielle pour améliorer la perception du risque en zone côtière et limiter au maximum les dommages matériels et humains.

En matière d'aménagement du territoire, la stratégie de *gestion intégrée des zones côtières* est préconisée. Elle nécessite la collaboration de l'ensemble des acteurs, dans un secteur géographique donné, à tous les niveaux et dans tous les domaines, pour prendre en compte l'ensemble des paramètres socio-économiques, culturels et environnementaux, l'objectif étant d'aménager un ensemble cohérent de façon durable. Des moyens financiers appropriés, une communication efficace ainsi que l'échange de connaissances et d'expériences sont les clés de la réussite.

Ce rapport, en étudiant quelques exemples de stratégies de défense côtière s'inscrit dans cette perspective. Les principales conclusions pour le Royaume-Uni, l'Allemagne, le Danemark, la Belgique et les Pays-Bas sont récapitulées dans les tableaux ci-dessous. Les stratégies de défense côtière sont très variables d'un pays à un autre. Elles sont le reflet de la culture, de l'histoire et de l'importance accordée à la protection côtière par le gouvernement.

Principales conclusions des effets du changement climatique					Préconisations	
					Prendre en compte un scénario moyen d'élévation du niveau marin de 4,5 mm/an pour 2050	
Estimations de l'élévation absolue du niveau marin					Y ajouter les variations régionales	
Royaume-Uni	Scénarios	2020 (m)	2050 (m)	2080 (m)	- Moyenne de l'augmentation relative du niveau moyen marin : 6 mm par an en Anglia, Thames, au nord et au sud est de l'Angleterre (sud de Flamborough Head) 5 mm par an au sud-ouest de l'Angleterre et au Pays de Galle 4 mm par an dans le nord-ouest et au nord-est de l'Angleterre (Nord de Flamborough Head) - Condition de vagues extrêmes Hauteur de la vague : + 10% en 2080 Période de la vague : + 5 % en 2080	
	Emissions faibles	0,06	0,14	0,23		
	Emissions moyennes plutôt faibles	0,07	0,15	0,26		
	Emissions moyennes plutôt fortes	0,06	0,15	0,3		
	Emissions fortes	0,07	0,18	0,36		
Allemagne	Augmentation du niveau moyen marin à l'horizon 2050			+ 55 cm		Préconisations différentes suivant les Länders : - Elévation du niveau marin absolu de 50 cm d'ici 2100 pour Schleswig Holstein - Elévation du niveau marin absolu de 60 cm d'ici 2100 pour la Basse-Saxe avec un affaissement progressif de 6 à 10 cm.
	Augmentation moyenne de l'espace tidal			+ 25 cm		
	Augmentation du vent moyen durant les événements météorologiques extrêmes			7%		
	Augmentation de la température			+ 2.8 °C		
	Augmentation des précipitations			10%		
Augmentation du niveau moyen marin de 0,2 m à l'horizon 2030 et 0,7 m en 2085 avec une augmentation supplémentaire de 20 à 40 cm lors de fortes tempêtes						
Danemark			Scénario A2 (IPCC 2001)	Scénario B2 (IPCC 2001)	Etudes en cours	
	Elévation absolue du niveau marin à l'horizon 2050		0.13 m	0.13 m		
	Augmentation de la hauteur des vagues		2%	1%		
	Transport de sédiments supplémentaires de la Mer du Nord vers le Danemark		5.1 %	2.5 %		
	Elévation du profil transverse		0.03 m	0.03 m		
Estimation du soulèvement des terres danoises de 3 cm à l'horizon 2050						
Belgique	Niveaux d'eau		Augmentation absolue de 2000 à 2050			Prévoir une élévation moyenne du niveau marin de 60 cm d'ici 2100 Augmentation relative de 2005 à 2055 - du niveau de la haute marée : 0.3 m - du niveau moyen marin : 0.25 m
	Niveau de la haute marée		0.3 m			
	Niveau de la basse marée		0.15 m			
	Niveau moyen marin		0.225 m			
Pays-Bas		G	G+	W	W+	Trois types de politiques : - Court-terme : prévoir une augmentation du niveau marin relatif de 20 cm/siècle - A échéance 50 - 100 ans : prévoir une augmentation du niveau marin relative de 60 cm/siècle - A échéance 100 - 200 ans : prévoir une augmentation du niveau marin relative de 85 cm/siècle
	Augmentation du niveau marin d'ici 2050	15 - 25 cm	15 - 25 cm	20 - 35 cm	20 - 35 cm	
	Augmentation du niveau marin d'ici 2100	35 - 60 cm	35 - 60 cm	40 - 85 cm	40 - 85 cm	

	Stratégie de défense côtière	Tendance pour la gestion du territoire	Plans de secours
Royaume-Uni	Endiguement Barrière anti-tempête sur la Tamise Intérêt fort pour les méthodes dites douces, notamment le rechargement de plages et le réalignement contrôlé Systèmes de défense basés sur une analyse coûts/bénéfices	"Making space for water"	Civil Contingencies Act
Allemagne	Des plans différents suivant les Länder mais globalement un recours aux digues et à leur renforcement Des initiatives d'utilisation de techniques dites "douces" par le biais notamment de rechargements de plages ou de réhabilitation de marais salés Système de défense basé sur des conditions standard	Zones tampons de 100 m et 50 m respectivement dans les états de Schleswig Holstein et de Basse-Saxe	Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe
Danemark	Recours majoritaire aux digues et aux dunes Développement progressif de solutions plus écologiques Couplage fréquent de techniques dites "dures" et "douces" Sauf pour les digues de Ribe et Højer qui doivent être capables de résister à un niveau d'eau de période de retour 200 ans, le système de défense est basé sur une analyse coûts/bénéfices pour les digues. Pour les dunes, un niveau de sécurité pour des eaux de période de retour centennale est exigé.	Construction interdite dans une zone de 300 m le long de la côte Zone d'urbanisation contrôlée dans les 2700 m suivant	Sous la responsabilité de l'Agence Danoise de Gestion des situations d'urgence placée sous l'autorité du Ministère de la Défense Danois
La Belgique	Endiguement et recours aux dunes Utilisation de la technique du rechargement de plages sur quatre sites entre 2005 et 2006 et création de zones d'inondations contrôlées. Les systèmes de défense doivent supporter un niveau d'eau de période de retour 1000 ans.	Interdiction de toute construction dans les zones dunaires. Réflexion sur les plans d'aménagement intégrant la stratégie de GIZC.	Plan national d'urgence spécifique aux inondations actuellement rédigé par la Direction Générale Centre de Crise
Les Pays-Bas	Endiguement, barrages anti-tempête Renforcement des digues avec des solutions en test pour réduire les mécanismes de dégradation des digues Recours progressif aux rechargements de plage Niveaux de sécurité spécifiques à chaque tronçon de digue, en général conçu pour des périodes de retour fixées entre 2000 et 10 000 ans	Recours aux zones tampons, variables suivant les localisations. Dans les villes côtières, une zone tampon de 50 m est préconisée.	Situations de crises gérées par le High-Water Information System. Différentes études en cours pour évaluer les conséquences d'une inondation et ses incertitudes.

Conclusion

Le littoral du Nord – Pas de Calais compte 800 000 habitants dont 45 % vivent sur la frange côtière, ce qui en fait la deuxième région côtière la plus densément peuplée de France après la région Provence – Alpes – Côtes d'Azur.

A cette forte pression urbaine s'ajoutent les activités touristiques, la Côte d'Opale étant un véritable carrefour de l'Europe du Nord-Ouest, ainsi que les activités industrielles comme la zone portuaire de Dunkerque.

De forts enjeux sociaux, économiques et environnementaux sont donc situés sur ces territoires côtiers fragiles, en constante évolution, caractérisés par une grande diversité biologique où se mêlent des activités parfois contradictoires. Si le tourisme est un facteur essentiel au dynamisme économique de la région, il peut par exemple contribuer à déstabiliser ces milieux, mettant alors en danger non seulement les zones littorales mais aussi les secteurs arrière – littoraux dont l'altitude est située sous le niveau des plus hautes mers.

Ainsi la zone des Wateringues, située en Flandre Maritime dans le triangle Calais – Saint-Omer – Dunkerque, est-elle particulièrement vulnérable aux risques d'invasions marines, d'autant plus qu'elle regroupe 430 000 habitants, d'importants secteurs agricoles, des zones humides ainsi qu'une faune et une flore très variées.

Face à ces enjeux forts, il paraît naturel de s'intéresser à l'évolution du littoral de façon à caractériser les aléas côtiers pour les intégrer dans les politiques d'aménagement du territoire.

L'interaction de différents paramètres d'origine météorologique, marine et anthropique, présentés en figure ci-dessous, permettent d'expliquer les mécanismes d'évolution des côtes.

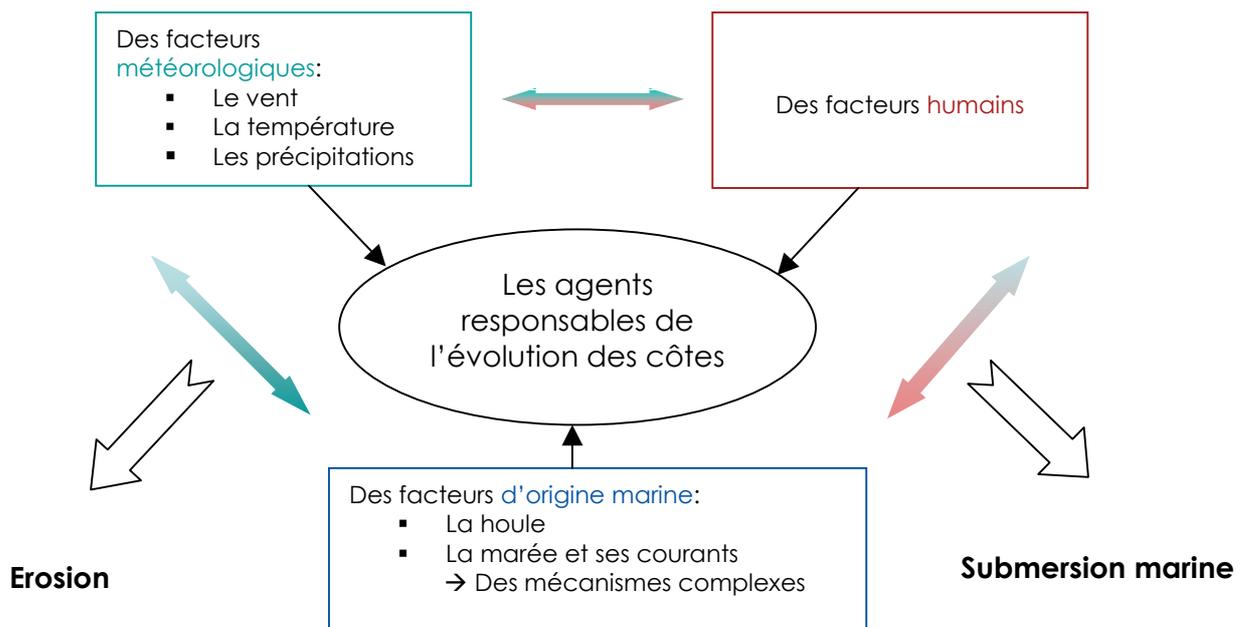


Figure 120 : Schéma explicatif simplifié de l'évolution permanente du littoral.

Cette évolution du littoral devrait s'accroître en raison du changement climatique. La hausse des températures, l'augmentation des précipitations en hiver, l'évolution du niveau marin principalement due à la fonte des glaces et à la dilatation thermique ainsi qu'une augmentation possible des événements météorologiques extrêmes sont autant de conséquences du changement climatique qui devraient fragiliser davantage le littoral.

Des solutions nouvelles sont actuellement développées pour tenter de faire face à l'augmentation possible de l'intensité des aléas naturels littoraux. Elles complètent les systèmes de défense lourde, type digues, perrés ou brise-lames, au caractère paradoxal puisque, s'ils permettent de lutter efficacement contre l'évolution du trait de côte, ils contribuent à désorganiser le courant de dérive littorale et peuvent créer des situations d'érosion nouvelles dans certains secteurs. C'est pourquoi, de nombreux pays se tournent vers des solutions plus écologiques type rechargements de plages, utilisation de fascines ou de ganivelles pour remodeler le haut des estrans, ou recours au by-passing pour rétablir un transit littoral interrompu par un obstacle. D'autres solutions innovantes comme l'utilisation des géosynthétiques ou des concepts de « crest drainage dike » ou « sandy dike », en permettant de retarder les phénomènes de dégradation des digues, intéressent également les scientifiques et les Autorités.

Le choix de telles solutions est largement conditionné par des paramètres locaux mais avant toute chose, il convient d'identifier les principaux secteurs soumis aux aléas naturels littoraux grâce aux caractéristiques morphologiques, hydrodynamiques et climatiques de la zone d'étude. C'est ce qui a été fait pour la Côte d'Opale. La fragilité d'un littoral comportant deux façades maritimes orientées différemment et étant soumis à de forts courants de marée, a favorisé la prise de conscience des Autorités du Nord – Pas de Calais quant à la nécessité d'agir et de lancer des études pour proposer des solutions adaptées de gestion des zones côtières si possible intégrant le concept de « gestion intégrée des zones côtières ».

Concernant les aléas naturels côtiers de la région :

- La région Nord – Pas de Calais n'est pas considérée comme une zone à risques vis-à-vis de l'aléa tsunami.
- Certains secteurs, notamment au sud de Boulogne-sur-Mer sont fortement touchés par l'érosion alors que d'autres sont plutôt en progradation. Citons, parmi ces derniers, le Port de Calais, Grand Fort Philippe ou Oye-Plage. Diverses études comme la thèse de M. Chaverot, l'étude PPR Côtes basses meubles du Pas de Calais ou l'étude PLAGE ont permis d'appréhender ou de cartographier cet aléa.
- Les études concernant l'aléa de submersion marine adoptent essentiellement une approche topographique et sont plutôt locales. L'étude PPR Côtes basses meubles du Pas de Calais définit une zone d'aléa fort susceptible d'être submergée d'ici dix ou quinze ans dans les secteurs de Oye-Plage, Sangatte, Tardinghen et Berck – Groffliers. Le mémoire de M. Suret rappelle que le secteur des Moères est le plus bas des waterings et qu'il est nettement situé sous le niveau des plus hautes mers (6 à 7 mètres). La thèse de M. Chaverot caractérise quant à elle les zones potentiellement submersibles sur le secteur de Sangatte avec des niveaux d'eau de périodes

de retour décennale, cinquantiennale et centennale. Parallèlement, les cartographies des zones inondées constatées du Nord et du Pas de Calais recensent les dommages causés par les inondations avec parfois leurs origines. Ces conclusions seront complétées et affinées avec les résultats de l'étude topographique par laser aéroporté qui sera menée par les DDE avec des financements de la DIREN dans le cadre de ce projet courant 2008 et par l'étude VSC des ouvrages de défense à la mer, en cours.

Le Conservatoire du Littoral a quant à lui tenté d'estimer l'évolution des aléas côtiers à l'horizon 2100. L'érosion devrait s'accroître sur la façade du Nord – Pas de Calais. La mer pourrait s'avancer de 363 ha dans le Pas de Calais d'ici la fin du siècle, avec une érosion importante en baie de Canche au sud de Camiers et une progradation en baie d'Authie proche des communes de Berck et Groffliers au sud du Pas de Calais. L'aléa de submersion marine a quant à lui été étudié grâce à une approche topographique, en tenant compte dans certains cas des protections naturelles. La dune d'Aval près de Wissant, la dune Dewulf non loin de Dunkerque et la rive Sud de la baie d'Authie pourraient être particulièrement vulnérables. De telles données demandent bien sûr à être complétées et vérifiées par des études supplémentaires non encore réalisées.

La prudence quant à l'interprétation des résultats est d'ailleurs valable pour l'ensemble des conclusions mentionnées précédemment. Certaines données manquent en effet de précision et les hypothèses de travail sont parfois simplistes. Les recherches se poursuivent donc pour affiner les résultats.

S'il est ainsi encore difficile de définir précisément les zones particulièrement exposées aux aléas naturels côtiers à l'horizon 2100, il est déjà possible de mettre en œuvre un certain nombre de mesures pour limiter les dommages éventuels en cas de tempêtes par exemple. Pour cela, la communication, entre spécialistes et avec le grand public, est essentielle pour accroître la prise de conscience du risque souvent sous-estimé, dynamiser les projets en cours et profiter de l'expérience d'autrui. Le chapitre 3 a exposé les stratégies de défense côtière intégrant ou non les effets du changement climatique, et les politiques de prévention mises en œuvre chez nos voisins européens de la mer du Nord, à savoir la Belgique, les Pays-Bas, le Danemark, le Royaume-Uni et l'Allemagne.

Il ressort de l'étude de ces pays une réelle préoccupation quant à la nécessité de développer des solutions plus écologiques. Les ouvrages de défense lourde type digues ne sont plus l'unique solution de protection côtière et de maintien du trait de côte. Des solutions et techniques alternatives existent. Nos voisins européens semblent également, à ce jour, plus en avance que la France sur ces questions de protection côtière au regard des études publiées sur les estimations de l'élévation du niveau marin moyen, voire de l'intégration des effets du changement climatique dans les systèmes de défense côtière comme aux Pays-Bas.

Quoiqu'il en soit, pour bien comprendre le choix de chaque pays, il convient d'appréhender ses traditions, les enjeux présents sur le territoire et l'importance donnée à la gestion côtière par les différents gouvernements afin de transposer éventuellement certaines solutions au cas français.

L'ambition de cette synthèse bibliographique aura été de tenter d'offrir une vision globale de l'état des connaissances actuelles des aléas naturels littoraux aux niveaux régional, national et international ainsi que des réflexions ou solutions développées notamment par nos voisins européens pour s'adapter aux effets du changement climatique sur le littoral. Nous espérons que le lecteur aura pu y puiser des connaissances nouvelles qui l'aideront à participer, dans les responsabilités qui sont les siennes ... à une gestion intégrée et durable des zones côtières !

Lexique

Bâche : Dépression de l'estran, allongée perpendiculairement à la plus grande pente en général et contenant encore de l'eau bien après le passage de la pleine mer.

Barre : Accumulation sédimentaire créée, au cours d'une pleine mer, par des houles constructives qui font monter le niveau du sable et des galets, créant une élévation longitudinale perpendiculaire à la plus grande pente. Une barre se situe entre deux bâches.

Brise-lame : Ouvrage de petits fonds permanent ou submersible, parallèle au rivage.

Dérive littorale : Résultat de la somme des transports littoraux côtiers, qui, à long terme, provoque un mouvement net de sédiments orienté dans une seule direction.

Epis : Ouvrage transversal au trait de côte qui bloque la dérive littorale et contribue ainsi au maintien du trait de côte.

Estran : Partie du littoral située entre les plus hautes et les plus basses mers connues. Les termes *zone de marnage* ou *zone intertidale* sont également employés.

Fascine : Fagot de branchage planté verticalement dans le sable pour en stopper l'érosion éolienne.

Ganivelle : Barrière constituée d'une série de lattes de bois tendues par des fils de fer entre des piquets solidement enfoncés dans le sable.

Gestion intégrée des zones côtières : Inscrite au chapitre 17 de l'Agenda 21, elle se définit comme « l'aménagement et l'utilisation durable des zones côtières prenant en considération le développement économique et social lié à la présence de la mer tout en sauvegardant, pour les générations présentes et futures, les équilibres biologiques et écologiques fragiles de la zone côtière et les paysages ».

Hauteur de la vague : Distance crête à creux, c'est-à-dire la différence entre la hauteur maximale et la hauteur minimale de la vague pendant une période T qui sépare deux passages successifs dans le même sens par le niveau moyen.

Houle : Onde de surface générée par le vent et se propageant à la surface de l'océan. La houle se forme à partir de vagues créées par le vent. Elle s'amplifie au voisinage de la côte et lorsque la profondeur diminue.

Marnage : Différence de hauteur entre une pleine et une basse mer successives, à ne pas confondre avec l'amplitude de la marée qui est la différence entre la hauteur d'une pleine ou d'une basse mer et le niveau moyen.

Période de retour : Temps statistique entre deux événements. Un niveau d'eau de période de retour 100 ans se produit statistiquement une fois tous les 100 ans. Il peut

toutefois y avoir deux événements de ce type dans une même année, même si cela est statistiquement très peu probable.

Perré : Revêtements de pierres sèches ou en maçonnerie, destinés à renforcer les parois d'un canal, un remblai ou les rives d'un fleuve.

Surcote : Il y a surcote lorsque la marée prédite est inférieure à la marée observée.

Trait de côte : Le trait de côte peut être défini comme la limite terre/mer, parfois difficile à repérer, ou le contact entre l'estran et la végétation dunaire.

Vives-eaux : Une marée de vives-eaux est une marée d'amplitude maximale correspondant aux périodes de pleines et de nouvelles lunes.

Zone de marée : Une zone de marée est définie par des limites géographiques et un port de référence où le zéro hydrographique est déterminé.

Liste des acronymes

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

CETE : Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement

CETMEF : Centre d'Etudes Techniques Maritimes Et Fluviales

CIADT : Comité Interministériel de l'Aménagement et du Développement du Territoire

CMS : Cote Majorée de Sécurité

CNPE : Centre Nucléaire de Production d'Electricité

DDAF : Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt

DDE : Direction Départementale de l'Equipement

DIREN : Direction Régionale de l'ENVironnement

GES : Gaz à Effet de Serre

GICC : Gestion et Impacts du Changement Climatique

GIEC / IPCC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat / Intergovernmental Panel on Climate Change

GIZC : Gestion Intégrée des Zones Côtières

IFREMER : Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER.

IGN : Institut Géographique National

IMFREX : Impact des changements anthropiques sur la FRéquence des phénomènes EXtrêmes de vent, de température et de précipitations

LNHE : Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (EDF)

MEDD : Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable

MIES : Mission Interministérielle de l'Effet de Serre

NSCMG : North Sea Countries Managers' Group

ONERC : Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique

PLAGE : Plan Littoral d'Actions pour la Gestion de l'Erosion

PPR : Plan de Prévention des Risques

SHOM : Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

SMBC : Service Maritime des ports de Boulogne-sur-Mer et Calais

SMCO : Syndicat Mixte de la Côte d'Opale

SPE : Systèmes de Production et Environnement (EDF)

VSC : Visites Simplifiées Comparées

Bibliographie

Sites Internet consultés

- <http://comrisk.hosted-by-kfki.baw.de/>
- <http://corepoint.ucc.ie/>
- <http://www.encora.org/>
- <http://kfki.baw.de/>
- <http://medias.dsi.cnrs.fr/imfrex/web/>
- <http://medias.obs-mip.fr/gicc/>
- <http://pamir.chez-alice.fr/>
- <http://perso.orange.fr/institutionwateringuesnpc/index.htm>
- <http://prudence.dmi.dk/>
- <http://www.anel.asso.fr/>
- <http://www.brs.dk/uk/dema.htm>
- <http://www.cite-sciences.fr/>
- <http://www.climatechange.be/>
- <http://www.clivar.org/>
- <http://www.cnrs.fr/>
- <http://www.coastalpractice.net/>
- <http://www.coastalwight.gov.uk/response.html>
- <http://www.coastnet.org.uk/>
- <http://www.comcoast.org/>
- <http://www.conservatoire-du-littoral.fr/front/process/Home.asp>
- <http://www.cphpost.dk/>
- <http://www.defra.gov.uk/>
- <http://www.diact.gouv.fr/>
- <http://www.ecoshore.com/>
- <http://www.effet-de-serre.gouv.fr/>
- <http://www.enseeiht.fr/>
- <http://www.eucc-d.de/>
- <http://www.euroSION.org/>
- <http://www.frameproject.org/>
- <http://www.gkss.de/>
- <http://www.globalsurfers.com/maps/region/Hollandnorth.gif>
- <http://www.gnb.ca/0263/coaststructure-f.asp>
- <http://www.greenpeace.org/international/>
- <http://www.ifen.fr>
- <http://www.ifremer.fr/>
- <http://www.ipsl.jussieu.fr/>
- <http://www.klimu.uni-bremen.de/>
- <http://www.knmi.nl/>
- <http://www.meteofrance.com/>
- <http://www.metoffice.com>
- <http://www.nord-pas-de-calais.ecologie.gouv.fr/>
- <http://www.onerc.gouv.fr/>
- <http://www.routard.com/>
- <http://www.safecoast.org/>

- <http://www.shom.fr/>
- <http://www.shore.dk/>
- <http://www.sigmaplan.be/>
- <http://www.sm-cote-opale.com>
- <http://www.socc.ca/>
- <http://www.stabiplage.com/>
- <http://www.sterr.geographie.uni-kiel.de>
- <http://www.sussex.ac.uk/BAR/>
- <http://www.tawinfo.nl/asp/home.asp>
- <http://www.techniques-ingenieur.fr/>
- <http://www.uni-hamburg.de/>
- <http://www.vie-publique.fr/>

- http://bcs.dep.state.fl.us/news/innovative/report/appendix_c/15-PEM_System.pdf
- http://www.belspo.be/belspo/home/publ/pub_ostc/MA/GaufreZVR_fr.pdf
- http://ec.europa.eu/maritimeaffairs/pdf/com_2006_0275_fr_part2.pdf
- http://hq.unep.org/themes/climatechange/PDF/Bruun_rule_exercise_fr.pdf
- http://letg.univ-nantes.fr/COLLOQUE/pdf/C3_0505_MEUR-FERREC.pdf
- <http://www.onserfdeel.be/pdf/eau.pdf>
- http://www.rivagesdefrance.org/synthese_bibliio_gizc.pdf
- <http://www.survas.mdx.ac.uk/pdfs/arles.pdf>
- http://www.survas.mdx.ac.uk/pdfs/delft_pa.pdf
- http://www.touteleurope.fr/uploads/tx_oxcsstructable/OP_1473_NordPCalais.pdf
- <http://www.waddensea-secretariat.org/news/documents/cpsl2/CPSL-II-2005.pdf>

Etudes et rapports

- **BATEL L – 2005** : Le risque de submersion marine dans la zone des polders ou Wateringues,
- **CHAVEROT S – 2006** : Impact des variations récentes des conditions météo-marines sur les littoraux meubles du Nord – Pas de Calais,
- **Centre Régional de la Propriété Forestière – 2006** : Note de synthèse sur le changement climatique et ses conséquences en forêt,
- **DDE 59 et 62 – 2006** : Cartographies des zones inondées constatées du Nord et du Pas de Calais,
- **DEFRA – 2005** : Brochure intitulée « Making space for water »,
- **GIEC – 2001** : Troisième rapport d'évaluation sur les conséquences du changement climatique,
- **LNHE – EDF – 2003, 2005** : Etude de danger relative à la centrale nucléaire de Gravelines,
- **ONERC – 2005** : Impact du changement climatique sur le patrimoine du Conservatoire du Littoral, scénarios d'érosion et de submersion à l'horizon 2100,
- **SMCO – 2003** : Etude PLAGE,
- **SMBC – 2006** : Etude PPR Côtes basses meubles du Pas de Calais,
- **SURET B – 2006** : Constitution de la base de données des zones inondables dans le cadre des Plans Communaux de Sauvegarde,

- **Université de Caen, Université de Rouen, Université du Littoral Côte d'Opale - 2005** : Document de présentation du projet de Contrôle par Laser Aéroporté des Risques Environnementaux Côtiers (CLAREC) en Manche et en Mer du Nord.

Ouvrages et revues

- **Direction Régionale des Voies Navigables – 1985** : Historique des Wateringues,
- **Géosciences – 2006** : Le changement climatique,
- **Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement – 1997** : Guide méthodologique, Plans de prévention des risques littoraux (PPR), édition La documentation française,
- **ONERC – 2003** : Conséquences du réchauffement climatique sur les risques liés aux événements météorologiques extrêmes : sur la base des dernières connaissances scientifiques, quelle action locale ?,
- **ONERC – 2004** : Collectivités locales et changements climatiques : quelles stratégies d'adaptation ?
- **ONERC – 2005** : Un climat à la dérive : comment s'adapter ?, édition La documentation française,
- **ONERC – 2006** : Stratégie d'adaptation au changement climatique, document de travail.

Documents annexes

- **CD – ROM Géosynth**, synthèse géologique du Pas de Calais, Natural Environment Research Council (NERC), BRGM, 2002,
- **Conférence du 29 mai 2006** à Douai intitulée « Changement Climatique : comprendre et agir »,
- **Conférence du 13 au 15 juin 2006** du groupe NSCMG à Elsinore au Danemark.