

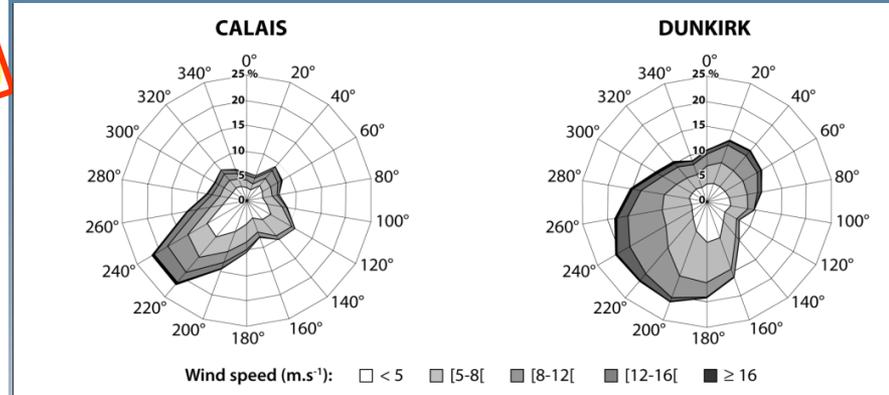
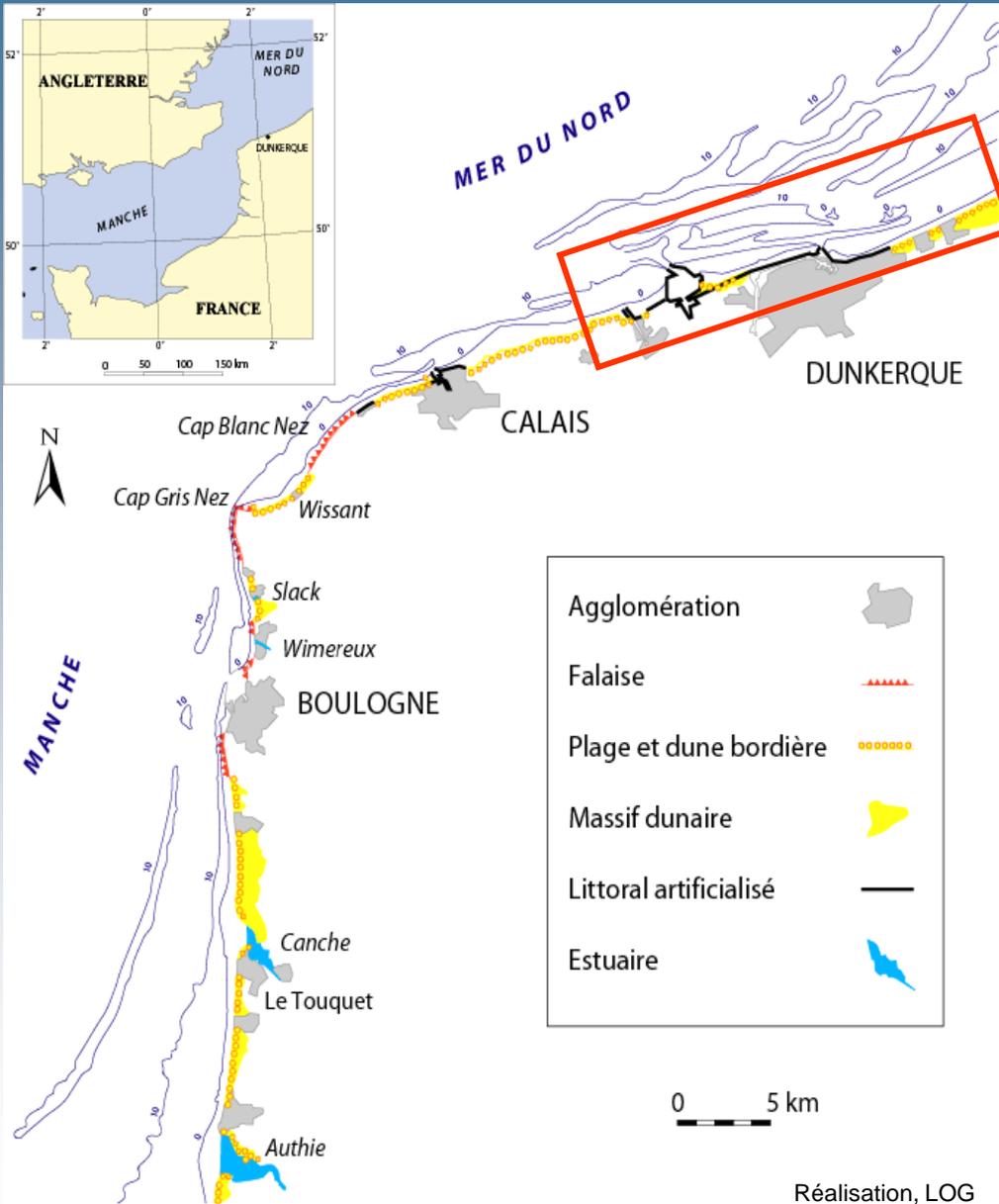


# ***« Risques de submersion marine et pistes d'adaptation dans le contexte du changement climatique »***

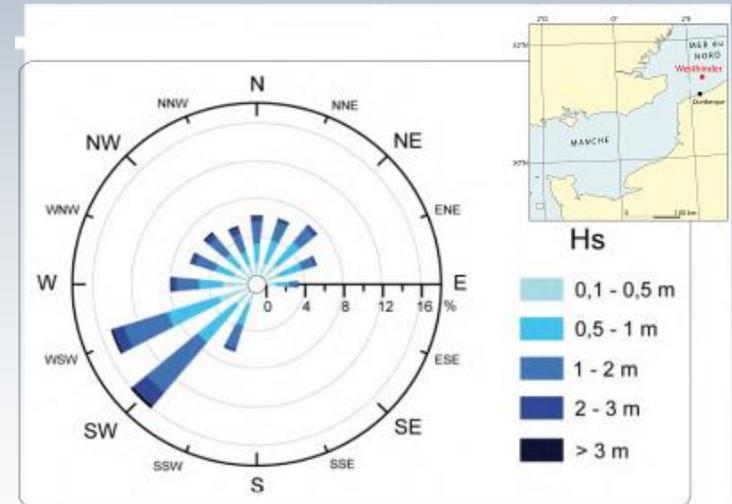
**Marie-Hélène Ruz, géomorphologue**

Professeur de géographie physique à l'Université du Littoral Côte d'Opale,

Membre du Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (UMR CNRS LOG 8187),



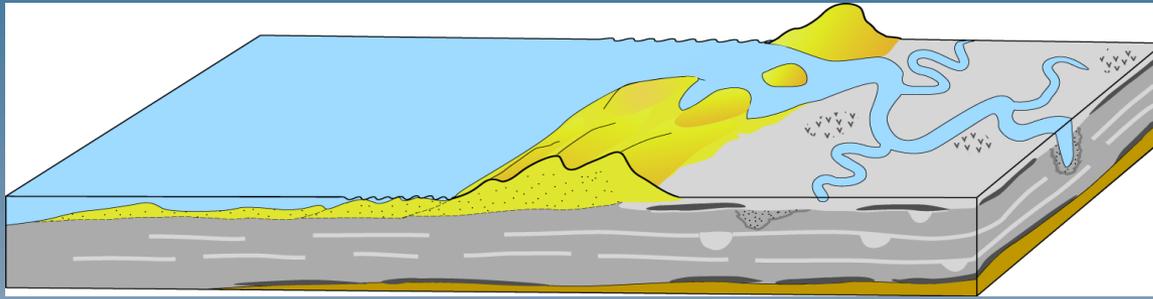
Source: LOG



Source: Maspataud, 2011

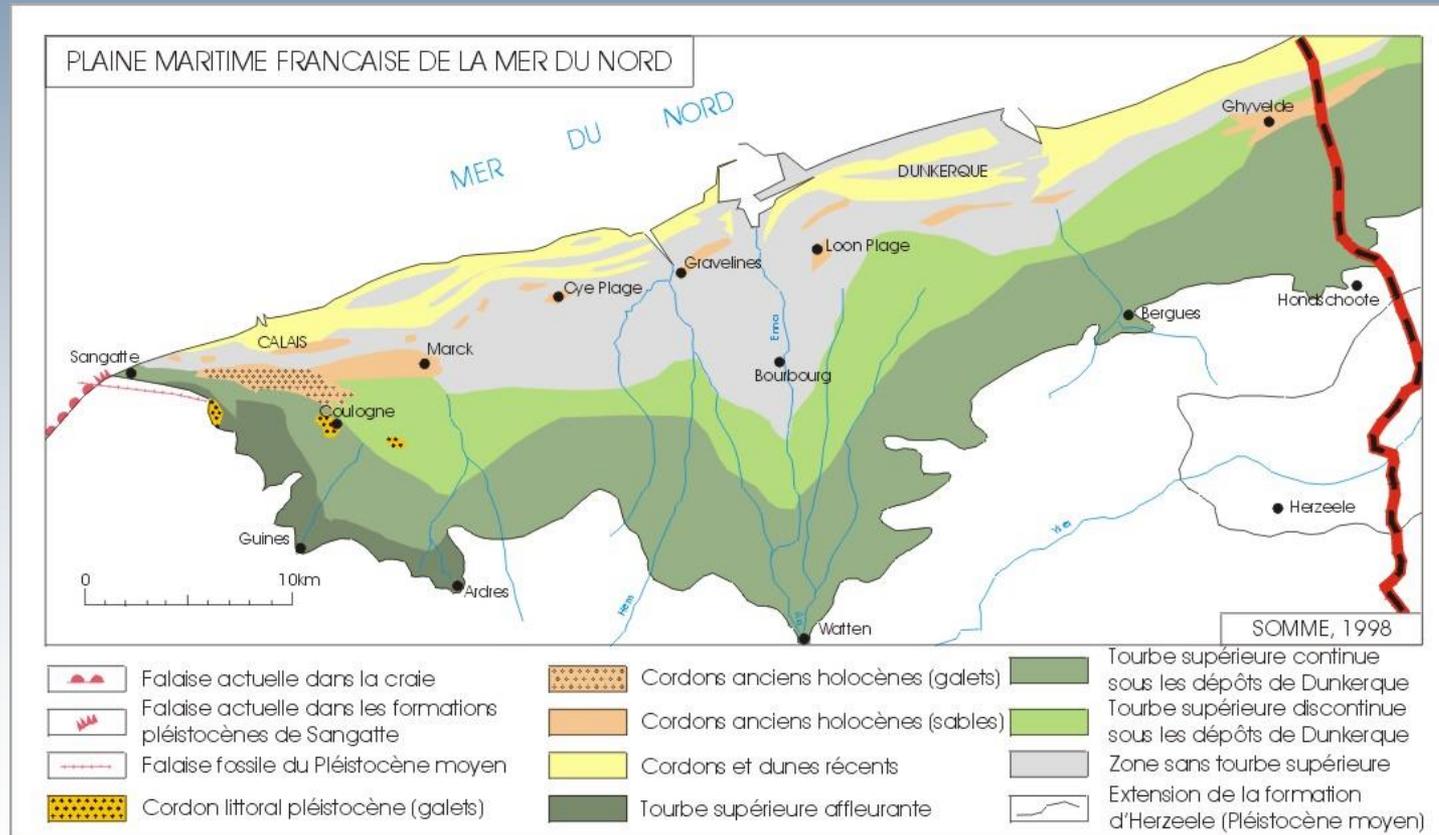
Réalisation, LOG

# Un territoire né de la mer.....



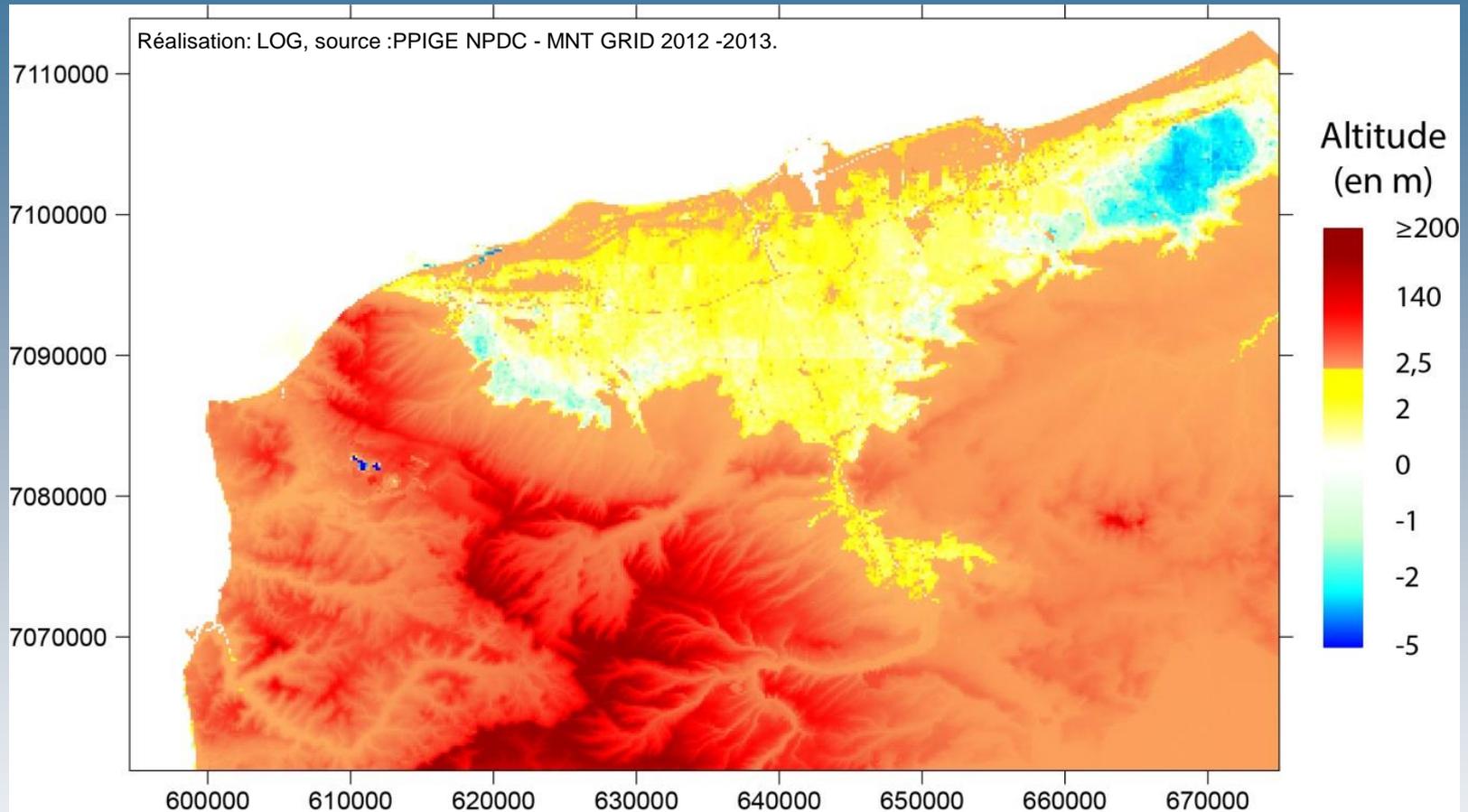
Comblement progressif de la plaine maritime flamande par des sédiments marins

Formation de marais maritimes ensuite transformés par l'Homme (dès le Moyen-Age)



**EXTENSION DES DEPOTS DE COMPLEMENTS HOLOCENES DANS LA PLAINE MARITIME FLAMANDE**

# Le contexte local: un polder chaque jour sous le niveau des hautes mers



Altitude moyenne dans le polder: **2 m IGN69**

Hautes mers de vive-eau (coeff 95) à Dunkerque: **3,35 m IGN69**

Hautes mers de morte-eau (coeff 45) : **2,3 m IGN69**

**85 000 ha de terres sous le niveau des hautes mers**

# Des polders qui sont drainés grâce à des systèmes complexes de canaux pour évacuer l'eau jusqu'à la mer

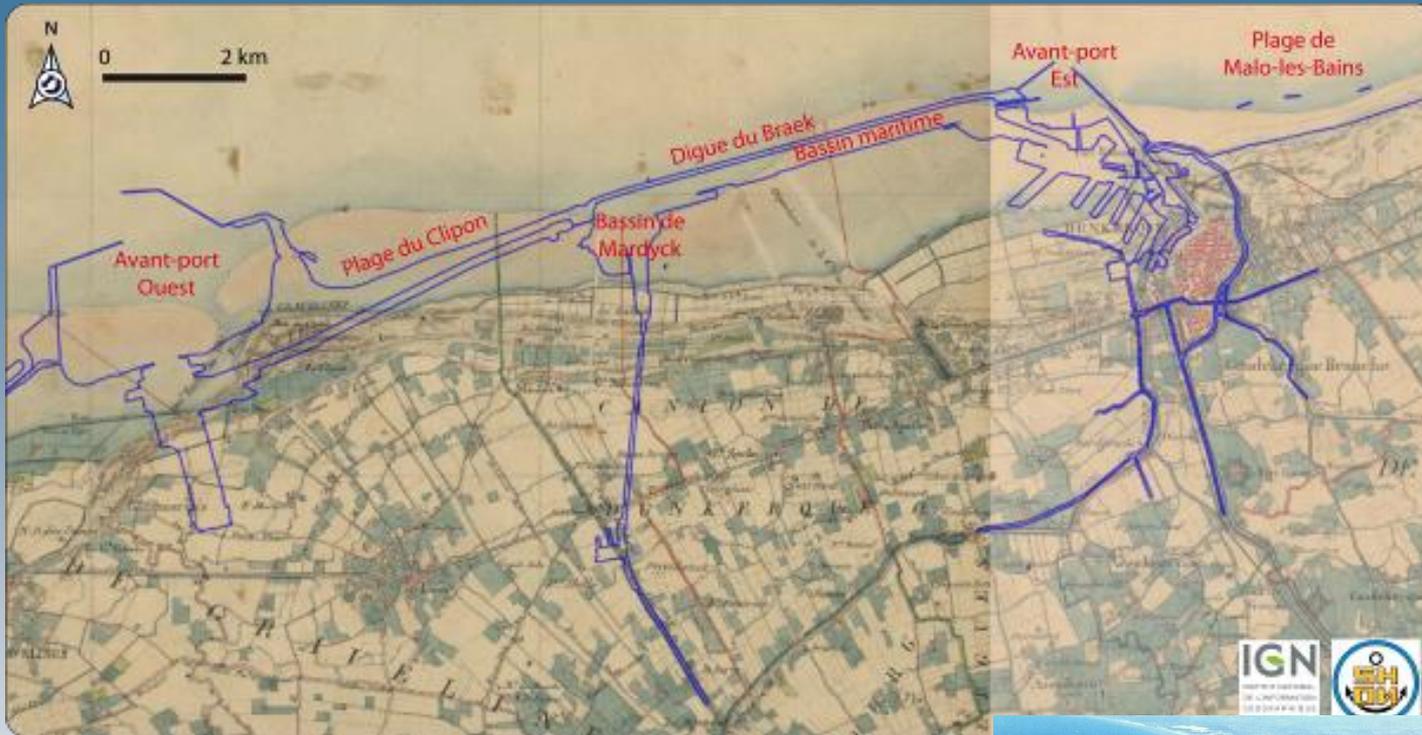


La Plaine maritime, [communaute-urbaine-dunkerque.fr](http://communaute-urbaine-dunkerque.fr)



Station Tixier (Dunkerque)

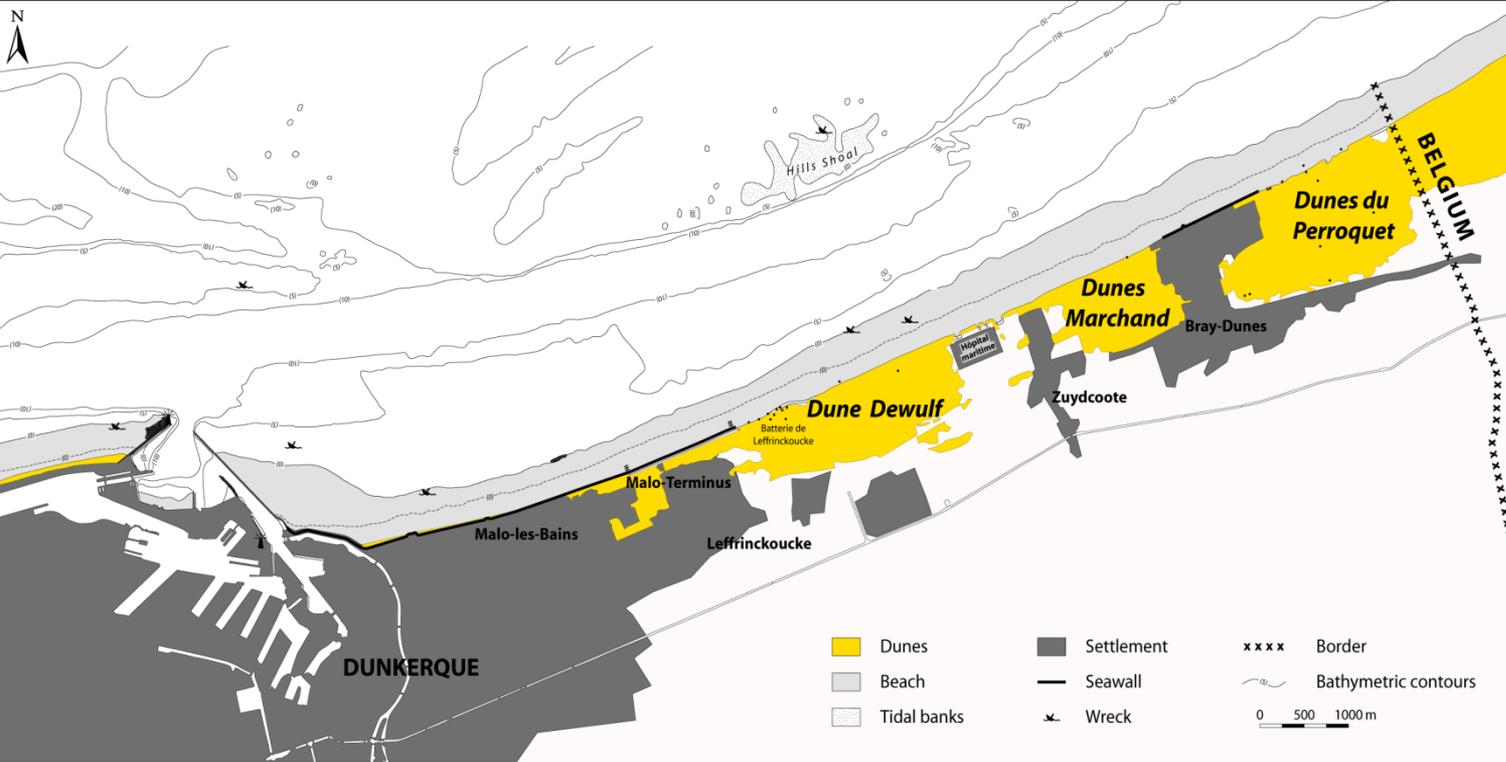




A Dunkerque, l'Homme a fortement modifié le littoral (urbanisation, ports, digues,...)

Superposition du trait de côte actuel (en bleu) sur la Carte d'Etat Major au 1/40 000 de 1835. Source : Geoportail, Serveur de visualisation de données géographiques et géolocalisées, © IGN 2012. In: Tresca, 2013

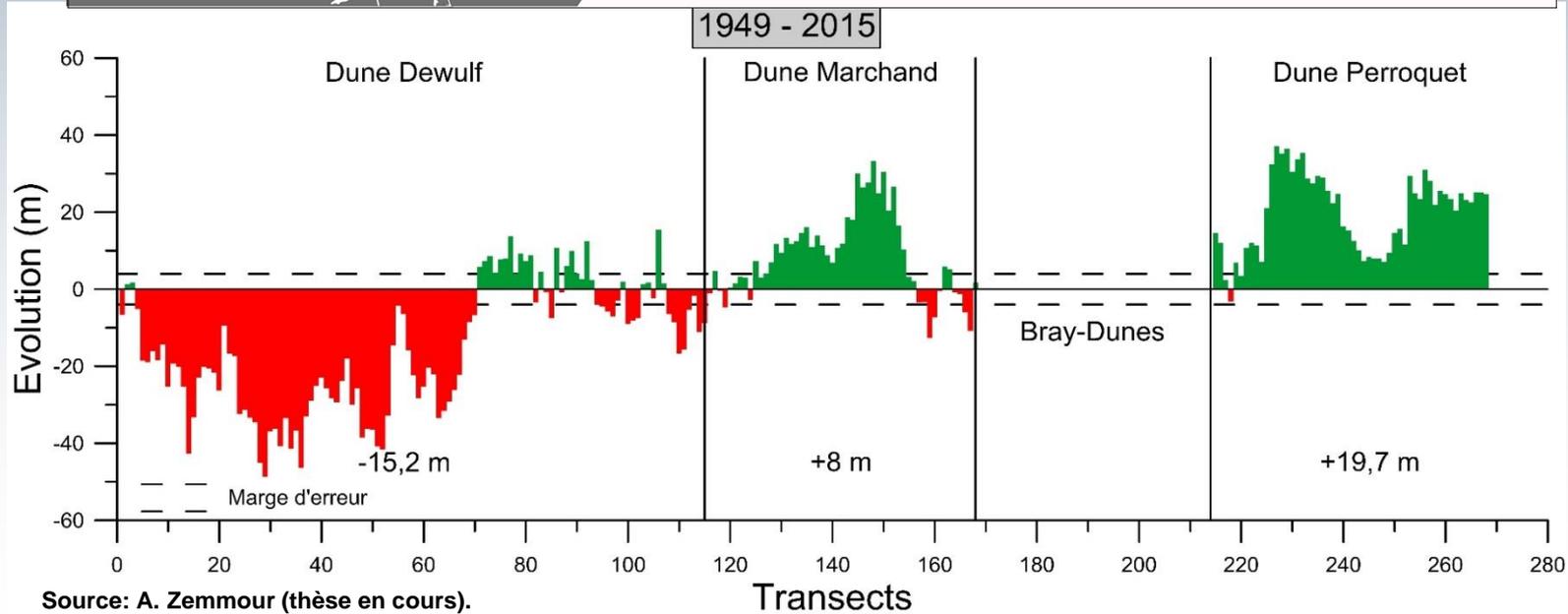
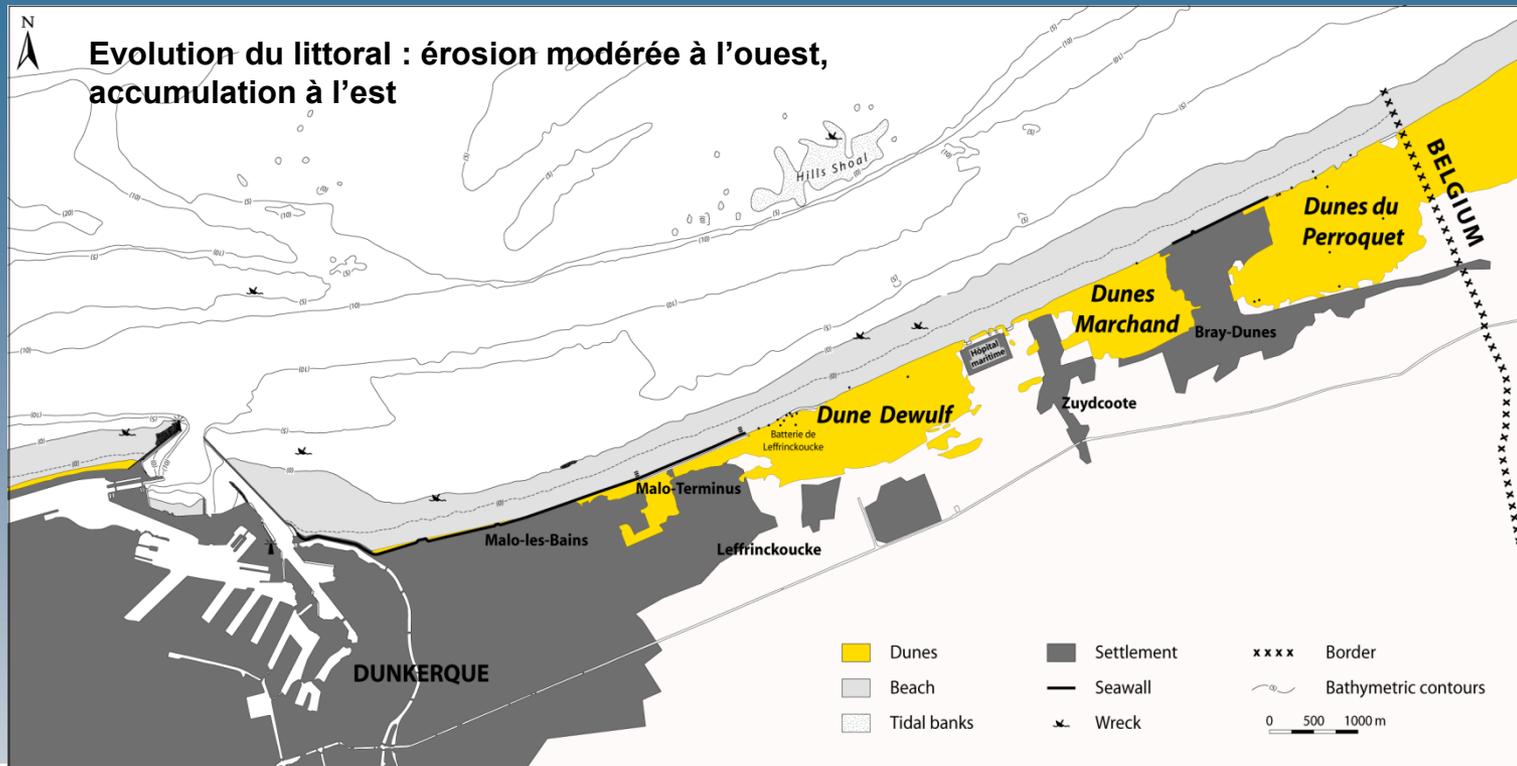




A l'est de Dunkerque, il subsiste  
7 km de milieux dunaires



IGN, 2000



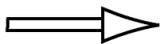
Source: A. Zemmour (thèse en cours).

L'érosion des côtes et les submersions marines se produisent essentiellement pendant les tempêtes lorsque des vents forts soufflant vers la côte et la baisse de la pression atmosphérique engendrent des "surcotes" à haute mer.

Le terme « *surcote* » désigne la différence entre le niveau marin observé et le niveau marin qui existerait en présence de la marée astronomique seule (SHOM). Une baisse de la pression atmosphérique de 25 hPa, correspond à une élévation temporaire du niveau de la mer de 25 cm.



**vent d'afflux**  
(force, direction, durée)



**pression atmosphérique**



*dune bordière*

*estran*

----- Niveau marin observé

———— Niveau marin prédit

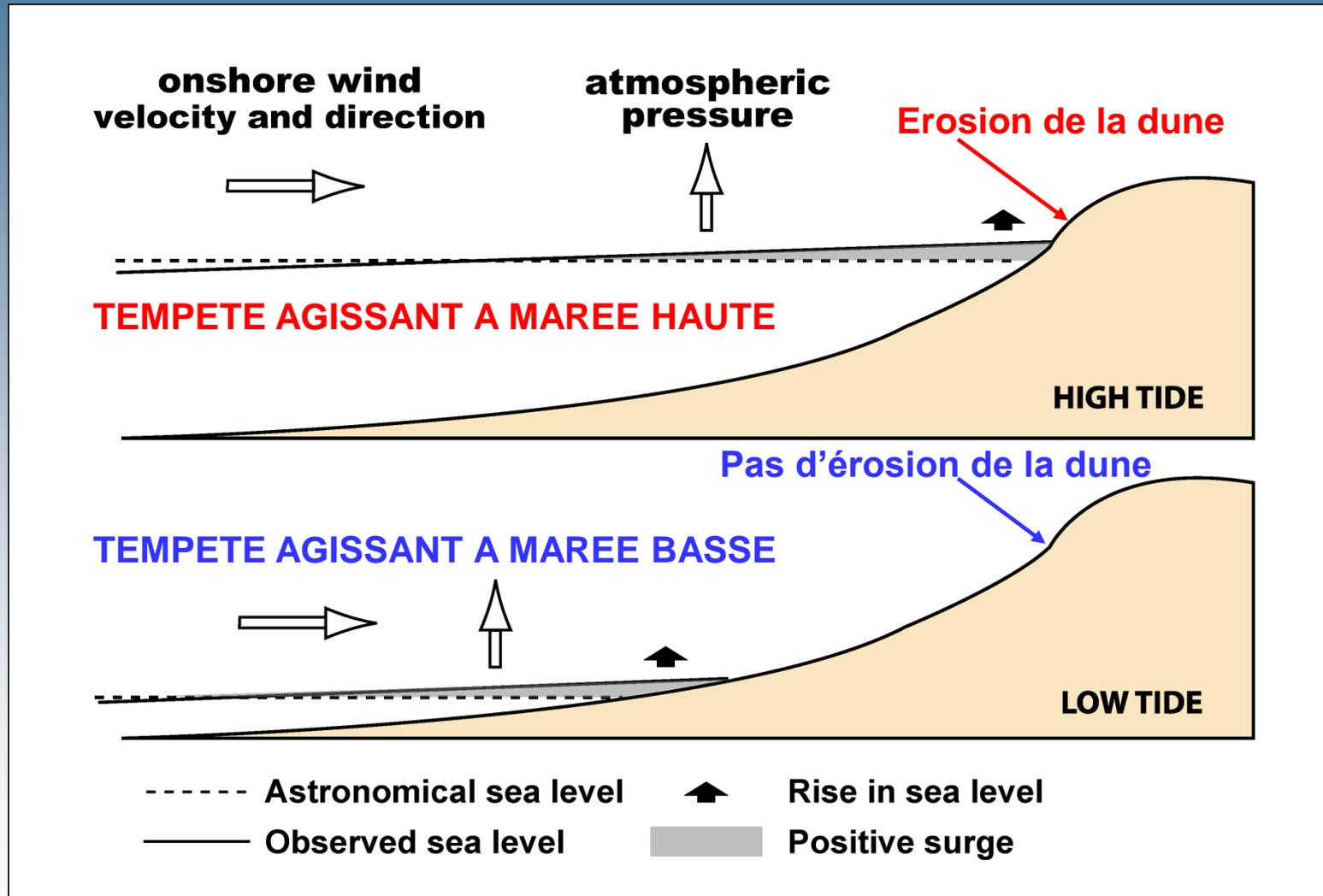


▲ Élévation du niveau marin



■ Surcote

Le littoral du Nord-Pas-de-Calais étant caractérisé par des marées de forte amplitude (>5 m), l'effet des tempêtes est variable en fonction des coefficients de marée et du moment pendant lequel se produit une tempête



(d'après Chaverot, 2006)

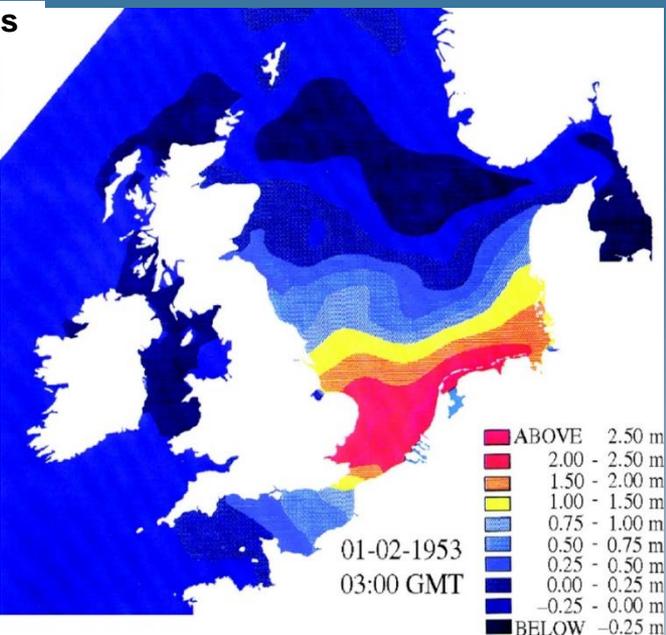
## Quelques tempêtes mémorables.....

Date	Zone géographique	Description événement et impacts
<b>03/12/1909</b>	Nord de la France	Tempête à Dunkerque, destruction digue de l'Est sur 380 m
<b>25-26/11/1925</b>	Nord (59)	Tempête. Petit coefficient de marée (56-65). Fortes vagues, Kiosques de plage emportés à Dunkerque
<b>Nov. 1931</b>	Nord (59)	Tempête. A Dunkerque, destruction de la plage de Malo Terminus sur 200 m
<b>Nov. 1932</b>	Nord (59)	Grosse marée (pas de réelle tempête). «Valse des kiosques».
<b>1-2/03/1949</b>	Sud Mer du Nord, Nord (59)	Tempête de NW. Surcote. Coeff. de marée 85-87. A Dunkerque : 2 ruptures de la digue de l'Est, plusieurs quartiers inondés. Franchissement du perré par les vagues
<b>15, 16, 17/03/1949</b>	Sud Mer du Nord, Nord (59)	Coeff. de marée 117-111. Suite à la tempête du 1-2/03/1949 : franchissement digue de l'Est par les brèches ouvertes. Ruptures de digue sur les côtes
<b>31/01 – 1er/02/1953</b>	Mer du Nord, Belgique, Pays-Bas, Angleterre, France, Allemagne	"North Sea Flood of 1953", "The Great surge" Tempête d'une très violente dépression de NW. Surcote et vents du NNW exceptionnellement forts (55-65 noeuds), coeff. de marée 82-83. Destruction et submersion de nombreuses digues le long de la Mer du Nord. Forte surcote, jusqu'à 2,50 m en Angleterre et >3 m aux Pays-Bas. Inondations importantes (200 000 ha) et nombreuses pertes humaines aux Pays-Bas (1800), Angleterre (307), Belgique (25). Plus grand désastre du XXème siècle aux Pays-Bas et Angleterre.
<b>Hiver 63-64</b>	Nord (59)	Tempête, vents de W à SW > 100 km/h. Erosion sur la côte dunkerquoise
<b>15-16/09/1966</b>	Sud Mer du Nord, Nord (59)	Surcote favorisée par un vent d'W très violent. Marée d'équinoxe, coeff. 114. A Dunkerque, submersion du perré et kiosques de plage emportés.
<b>12/01/1978</b>	Vendée, Bretagne, Sud Ouest, côtes du Nord (59), Calais (62)	Vents violents de secteur WSW virant N le 12/01. Rafales de 137 km/h au sémaphore de Dunkerque. Coeff. de marée 109 à 107. Surcote de 1.13 m à Dunkerque, 1.10 m à Calais, et 0.88 m à Boulogne s/ Mer. Perré de Dunkerque/Malo submergé à PM. Dégâts sur front de mer. Tempête avec submersion de jetées et digue à Calais. Chalets de plage emportés.

# Février 1953: rupture des digues et submersion marine aux Pays Bas, 1835 morts



Source photos: Gerritsen, 2005



D'après des archives du Port de Dunkerque le plus haut niveau d'eau atteint à Dunkerque au cours de cet évènement serait de près de 7,90 m CM, soit une surcote de 2,35 à 2,40 m le 01 février 1953 vers 1h (Bernier *et al.*, 1979). La période de retour de cette tempête aurait été estimée à 250-300 ans par les hollandais (Rapport Deltacommissie).

Répartition de la surcote au moment de la marée haute lors de la tempêtes du 31 janvier- 1er février 1953 en mer du Nord (De Ronde & Gerritsen, 1989)



Brèche à la digue de l'Est

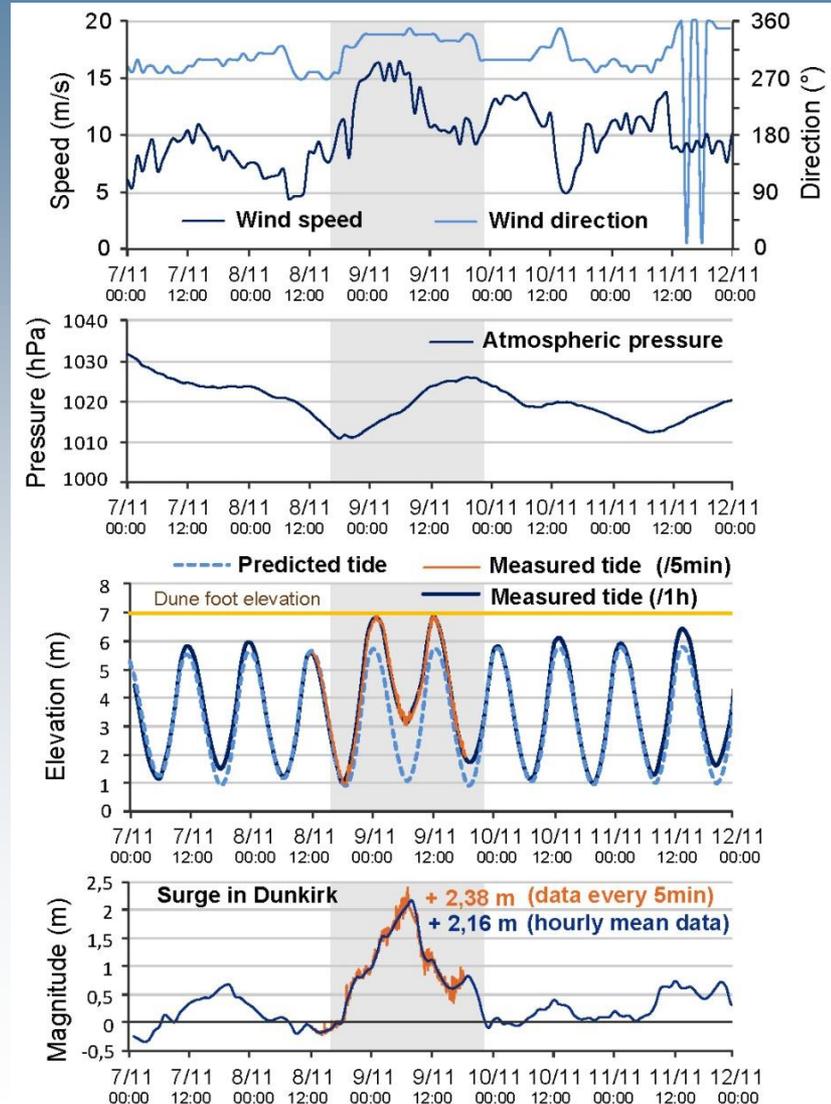


Effondrement du pont de Rosendaël

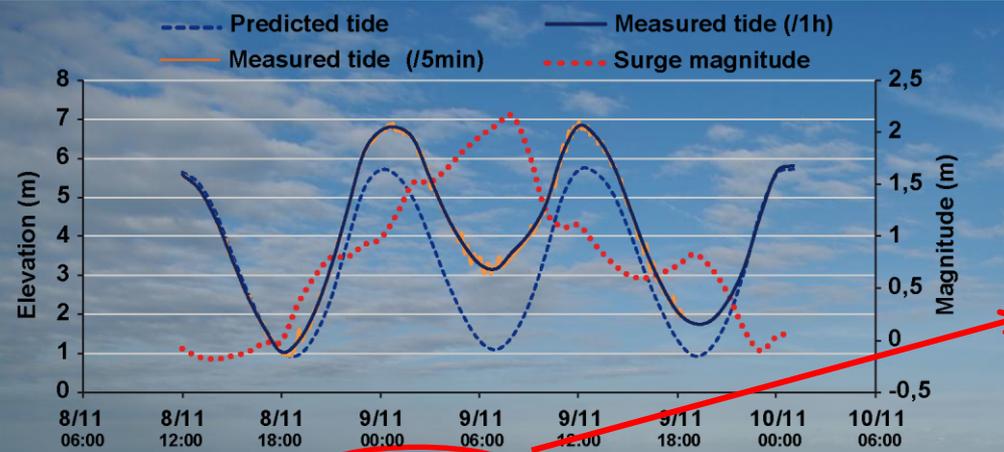
# L'impact des tempêtes

## La tempête de novembre 2007

- Vents forts du N-NW (> 10 m/s) pendant 48 h
- Baisse de la pression atmosphérique de 23 hPa
- Marnage de 4,67 m (coeff 76)
- surcote exceptionnelle:
  - Pic à 2,38 m à basse mer
  - 1,2 m à haute mer

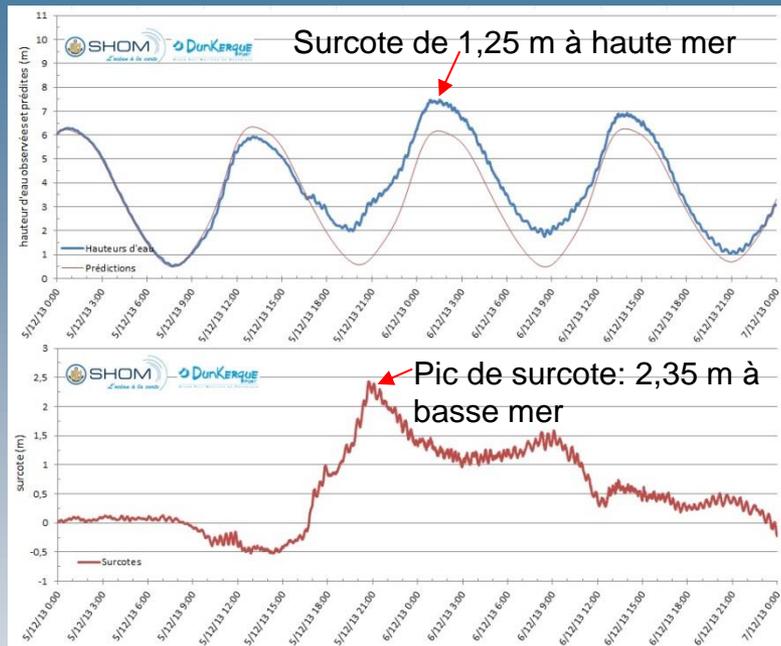


# Les impacts:



# Impacts de la tempête Xaver (2013) sur la digue et la plage de Malo-les-Bains

## Haut niveau d'eau exceptionnel de 7,43 m CM, soit 4,73 m IGN69



Source: REFMAR



« Les hauteurs maximales atteintes à Dunkerque sont exceptionnelles, supérieures aux niveaux statistiques de période de retour 100 ans correspondants. Il s'agit des **plus fortes hauteurs mesurées depuis la mise en place des observatoires**. Elles sont supérieures de 0,12m aux maxima relevés jusqu'alors à Dunkerque (12 janvier 1978) ; Les maxima de surcote instantanée sont arrivés à mi-marée, mais les pics étant étalés sur plusieurs marnages, les surcotes coincidentes avec la PM sont restées élevées (1.25m à Dunkerque).

Cet évènement peut être **considéré comme un nouvel évènement de référence pour le littoral Manche orientale** et notamment pour les observatoires de Dunkerque et Calais, pour lesquels surcotes instantanées et hauteurs maximales atteintes n'ont jamais été observées jusqu'alors. Il n'a pas pu être comparé à l'évènement historique du 31 janvier au 2 février 1953 (évènement très ancré dans les mémoires, ayant produit de gros dégâts aux Pays-Bas) car aucune mesure marégraphique en Manche n'est disponible sur cette période. » Source: rapport SHOM, 2014, Daubord

# En cas d'événement extrême type 1953 ou type Xynthia?

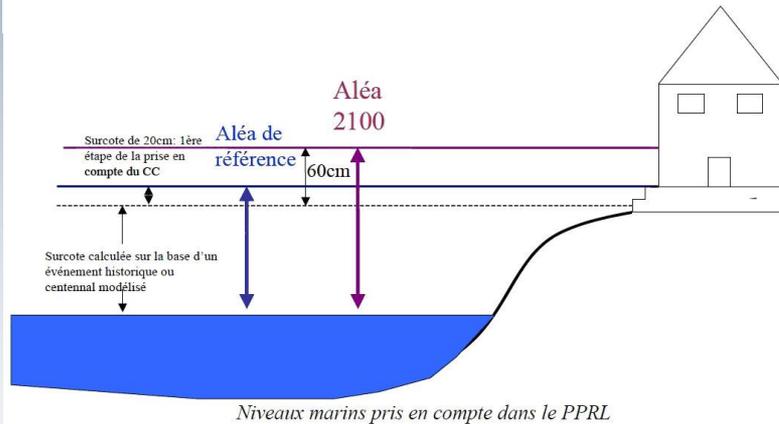
Conjonction d'une surcote exceptionnelle et d'une haute mer

## En conditions de marnage modéré (4,67 m (CM) : coeff 76)

- Niveau prédit de la haute mer: 5,76 m (CM) + pic de surcote de 2 m à haute mer
- = niveau d'eau (sans les vagues) de 7,76 m (CM) = 5,06 m (IGN69)

## En conditions de fort marnage (5,67 m (CM) : coeff 110)

- Niveau prédit de la haute mer: 6,34 m (CM) + surcote de 2 m à marée haute
- = niveau d'eau de 8,34 m (CM) = 5,64 m (IGN69) 5,20 m en 1953



Xaver: 7,43 m CM, soit 4,73 m IGN69  
+ 0,6 m = 8,03 CM soit 5,33 m IGN69

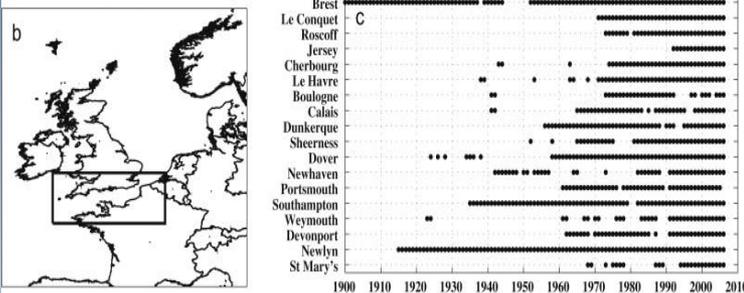
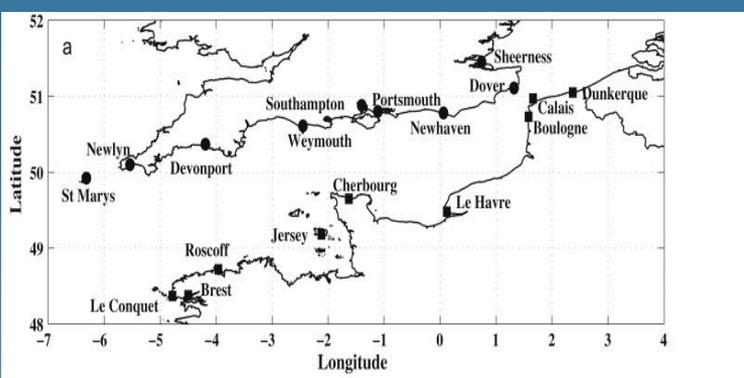
### Circulaire du 27 juillet 2011

relative à la prise en compte du risque de submersion marine dans les plans de prévention des risques naturels littoraux, MEDDTL



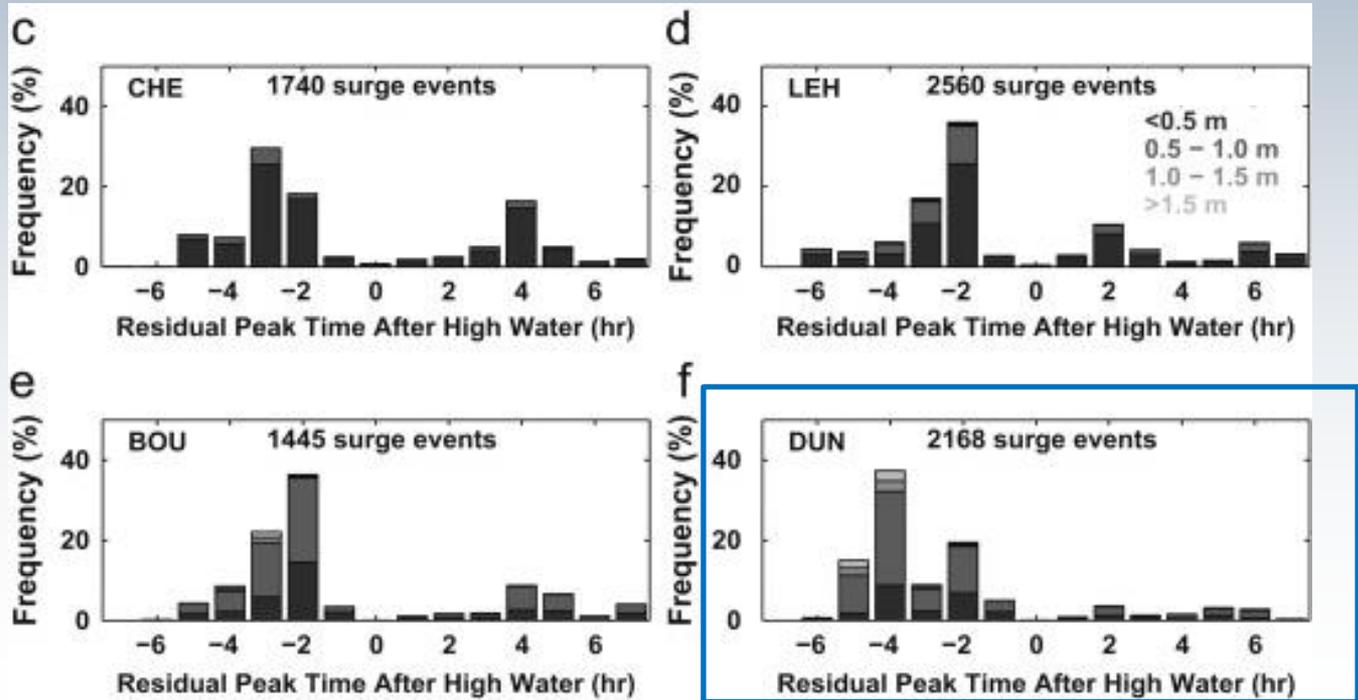
Source: Maspataud et al., STORM SURGES CONGRESS 2010

# Analyse des surcotes en Manche et en mer du Nord

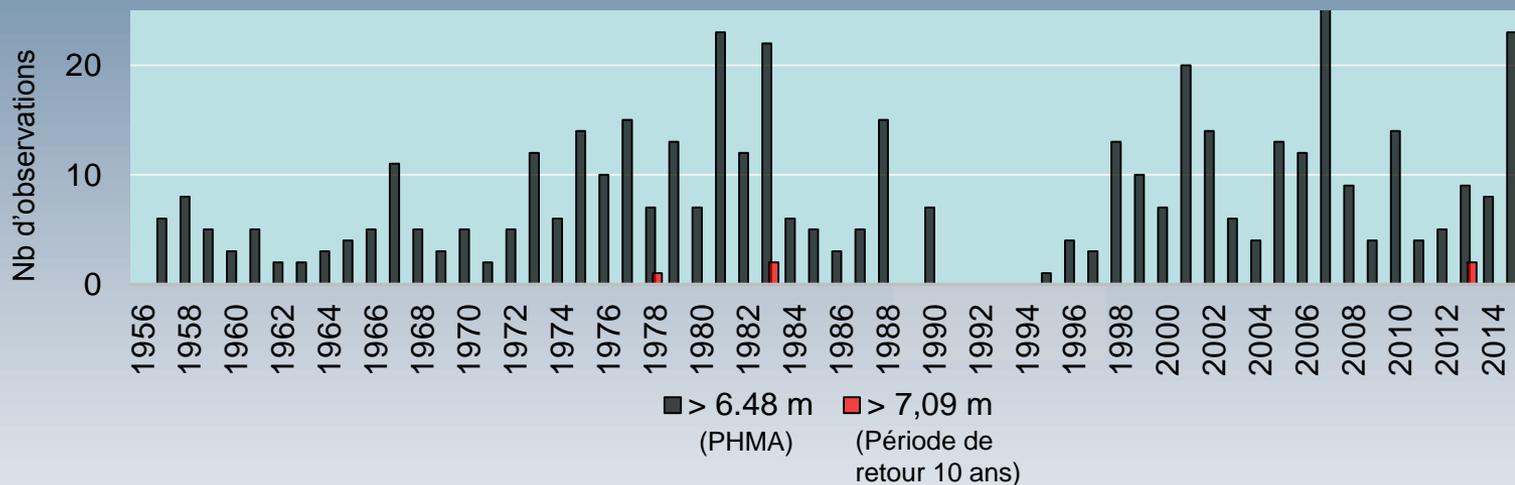


**Fréquence des pics de surcotes par rapport au moment de la pleine mer (de 1900 à 2010)**

(Haigh *et al.*, 2010)

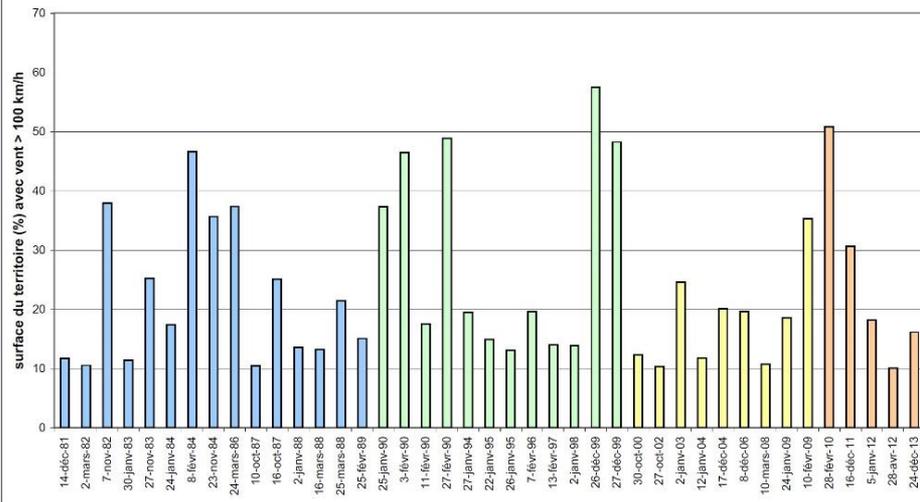


## Plus hauts niveaux d'eau enregistrés à Dunkerque de 1956 à 2015



Nombreuses lacunes entre 1987 and 1996...Difficile de dégager une tendance

Recensement des tempêtes majeures en France depuis 1980



## Pas de tendance climatique clairement établie sur les dernières décennies

En France, des mesures fiables de vent fort sont disponibles depuis le début des années 1980. Elles sont utilisées par les climatologues pour recenser les tempêtes.

Depuis 1980, 41 tempêtes majeures ont été observées en France. Si le nombre d'événements a été plus important dans les décennies 1980-1989 et 1990-1999 que depuis les années 2000, aucune tendance climatique ne peut être établie sur l'évolution de l'intensité des tempêtes.

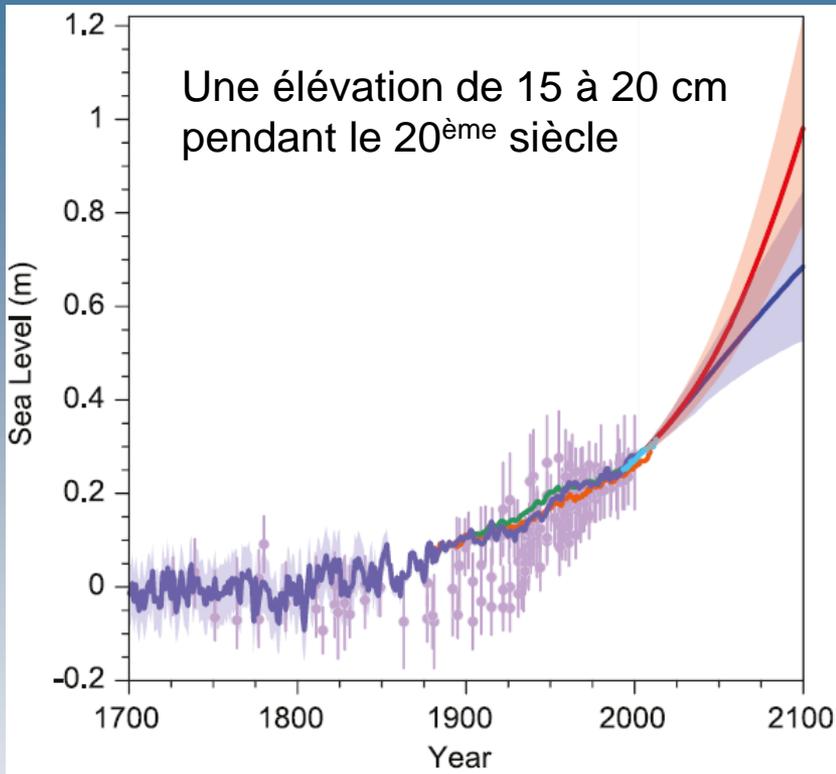
**Pas d'évolution attendue du nombre et de la violence des tempêtes au cours du XXI<sup>e</sup> siècle**

**L'état actuel des connaissances ne permet pas d'affirmer que les tempêtes seront sensiblement plus nombreuses ou plus violentes en France métropolitaine au cours du XXI<sup>e</sup> siècle.**

Les simulations ont été réalisées par trois modèles climatiques selon trois scénarios de changement climatique retenus par le GIEC pour la publication de son rapport 2007. Les résultats sur les vents forts sont très variables. Seul le modèle ALADIN-Climat prévoit une faible augmentation des vents forts au Nord et une faible diminution au Sud pour tous les scénarios, sur l'ensemble du XXI<sup>e</sup> siècle.

Source: MétéoFrance

# L'élévation du niveau de la mer

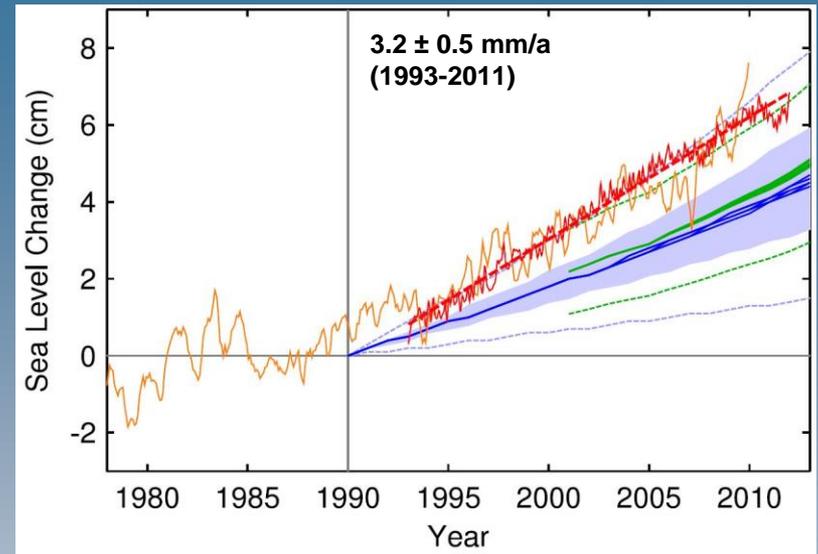


Variations du niveau marin depuis 1700 et projections pour la fin du 21<sup>ème</sup> siècle selon le scénario RCP2.6 (courbe bleue) et le scénario RCP8.5 (courbe rouge) (IPCC/GIEC, 2013)

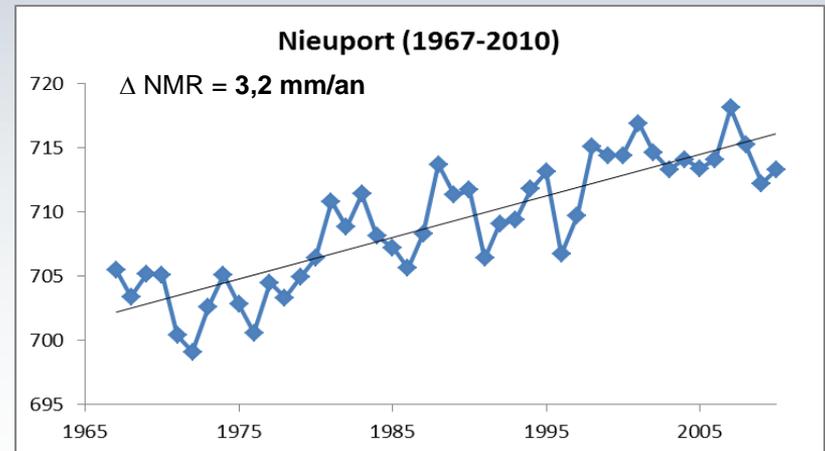
Un futur incertain.....

**GIEC 2007: de 18 à 59 cm d'ici 2100**

**GIEC 2013: de 28 à 98 cm d'ici 2100**



Variations du niveau marin « global » mesurées par altimétrie satellitaire (ligne rouge) et à l'aide de marégraphes (ligne orange) et prévisions du GIEC/IPCC de 2001 (lignes bleu) et de 2007 (lignes vertes) (Rahmstorf *et al.*, 2012)



Source: PSMSL



Malo-les-Bains, 10 février 2009

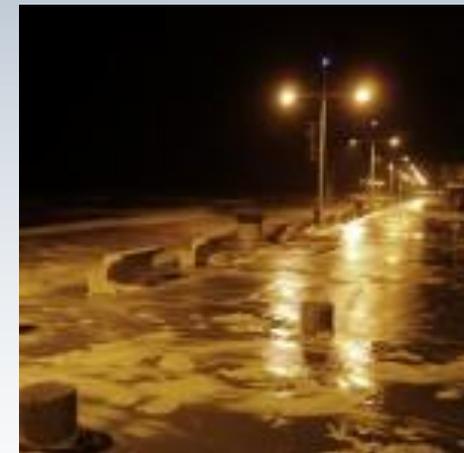


Tempête du 8 et 9 nov. 2007

- Avec une hausse du niveau de la mer, les hauts niveaux d'eau susceptibles d'engendrer des phénomènes de submersion et d'érosion risquent de se produire plus souvent.
- Les hauteurs des niveaux d'eau extrêmes seront plus élevées ce qui risque de causer des dommages plus importants.



Malo-les-Bains, 29/08/96



Décembre 2013





## Quelles stratégies en Belgique?

Adoption du « Master Plan » dans lequel les mesures de protection doivent pouvoir faire face à des tempêtes ayant des période de retour de 1000 et de 4000 ans

Des mesures différentes s'il s'agit de front de mer urbanisé, de milieux naturels (dunes côtières), de ports:

- Renforcement d'ouvrages de défense: digues, brise-lames,...
- Solutions « douces »: alimentation artificielle des plages, plantation d'oyats, brise-vents,....

# Belgique: rechargements de plage et renforcement des digues et des dunes

## Digues adaptées à un événement d'une période de retour de 1 000 ans

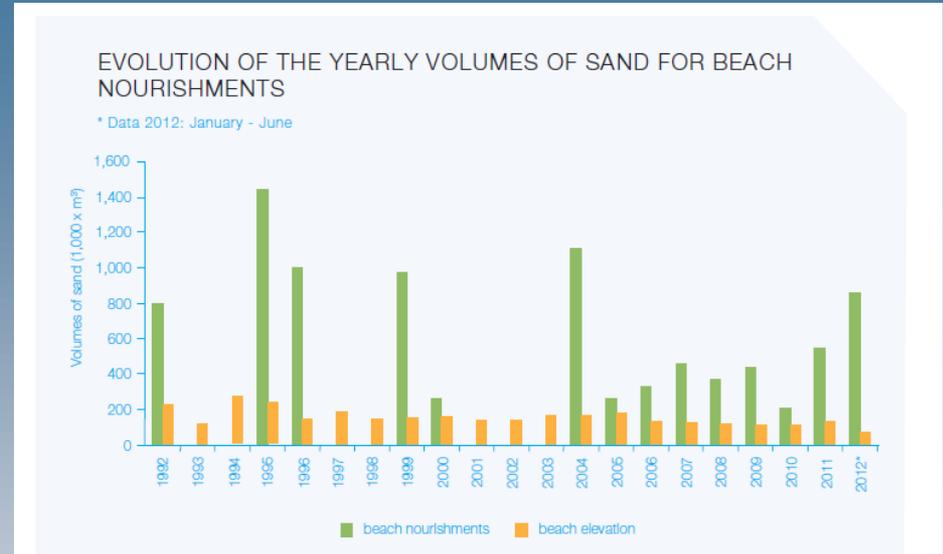
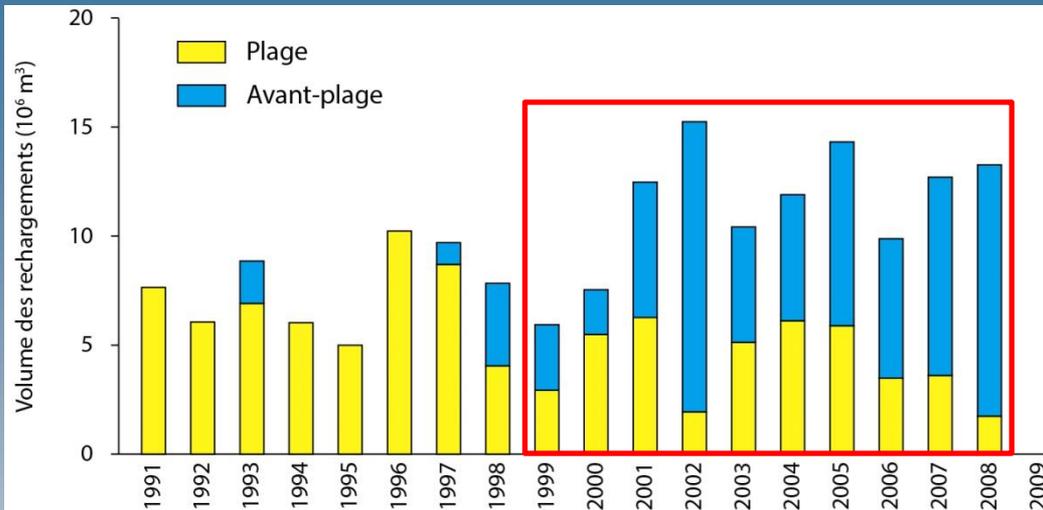


Figure 4. Evolution of the yearly volumes of sand for beach nourishments (Van Quickelborne 2012<sup>221538</sup>; MD&K, Coastal Division).



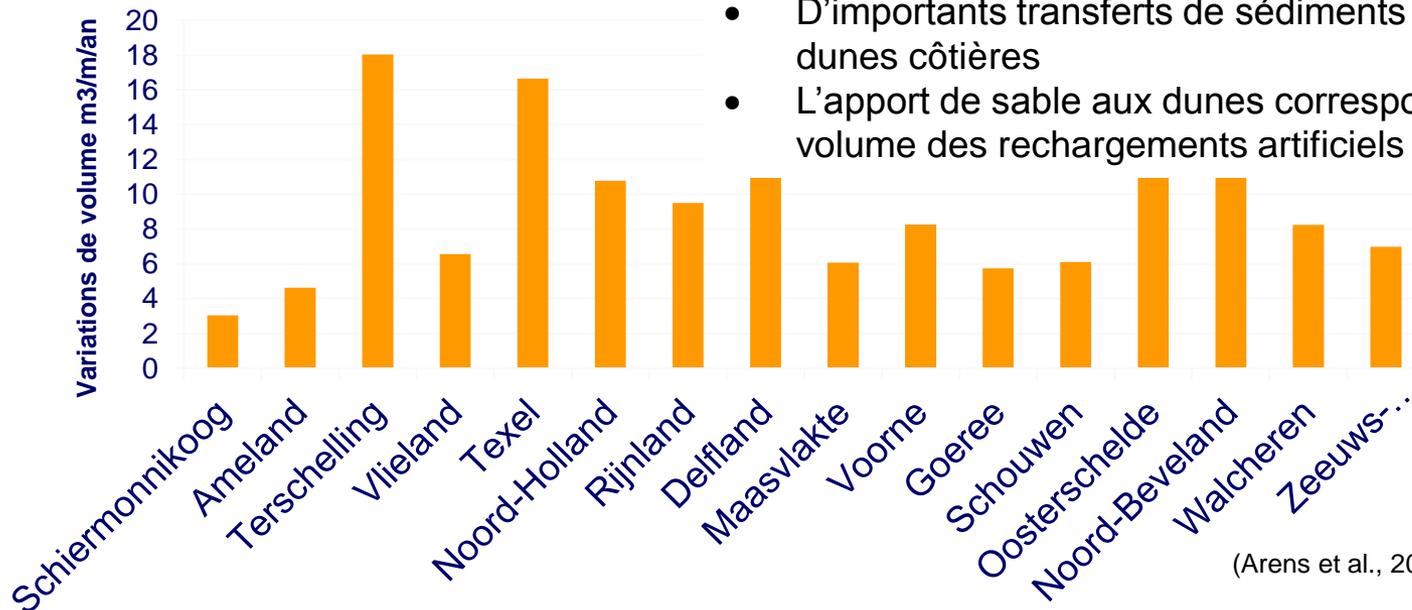
# Volume annuel des rechargement de plage sur le littoral des Pays-Bas (en millions de m<sup>3</sup>/an)



Alimentation artificielle : **12 millions de m<sup>3</sup>/an** pour l'ensemble du littoral des Pays-Bas (depuis 2000)

(d'après Van der Meulen et Van Zetten, 2014)

## Bilan sédimentaire des dunes côtières aux Pays-Bas (1999-2008)



(Arens et al., 2010)

**Le rechargement sédimentaire** occupe une large place dans les recommandations des chercheurs et de la commission Delta. Afin que ces côtes ne reculent pas, une alimentation en sable de 7 millions de m<sup>3</sup> sera nécessaire pour compenser une élévation du niveau de la mer d'un millimètre. **La commission recommande donc un rechargement annuel de 85 millions de m<sup>3</sup> de sable d'ici 2050.**

Le rechargement est également envisagé pour créer des bancs de sable artificiels face aux côtes de la Zélande. Cette solution permettrait de diminuer la force des vagues lors de surcotes coïncidant avec de fortes marées. Par ailleurs, les experts projettent aussi une intensification de ce rechargement pour élargir d'un kilomètre vers la mer le littoral hollandais et zélandais. Cette progression vers la mer créerait de nouveaux espaces naturels et permettrait de mieux protéger les polders situés à l'arrière des cordons dunaires, mais elle nécessite d'approfondir les études d'impact des extractions de sable.

L'élévation du niveau marin ne se présente pas tant comme un problème technique pour les Pays-Bas – en dépit de leur forte vulnérabilité au changement climatique – que comme une « opportunité » à saisir pour façonner sur le long terme un littoral sûr et attractif, sur les plans socio-économique et environnemental.

les Néerlandais ont cherché à améliorer leur technique de protection des dunes en utilisant le courant de dérive littorale comme moteur naturel de transport des sédiments. C'est ainsi qu'est née en 2008 l'idée d'un projet tout à fait innovant, baptisé **Zandmotor**. Le « Moteur à sable » consiste en un rechargement massif de **22 millions de m<sup>3</sup> de sable**, élargissant ainsi le littoral d'un kilomètre vers le large sur 4 km de long. Ce projet répond simultanément à plusieurs enjeux : défensifs, environnementaux, économiques mais aussi récréatifs, puisque les Hollandais se sont emparés de ce nouveau terrain de jeu particulièrement propice à la pratique du kite-surf : la plus-value récréative de ce projet est aujourd'hui définitivement admise et participe largement de sa réussite !



# Réensablement à Dunkerque : mobilisation de l'Etat pour la sécurité des zones exposées au risque de submersion marine

## Rechargement en 2 étapes



Photo: Voix du Nord



Etape I : Décembre 2011  
Rechargement d'urgence : 300 000 m<sup>3</sup>



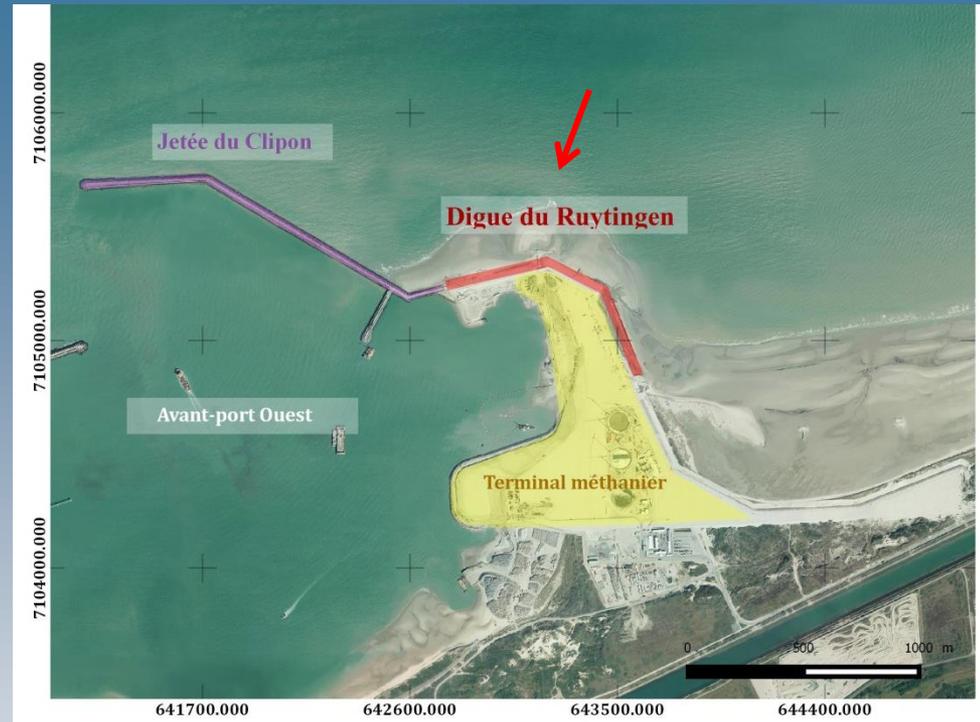
Etape II : Mars 2014  
Rechargement de 1,2 millions de m<sup>3</sup>



# RUYTINGEN

Rechargement de l'avant-port

Objectifs : protection de l'avant port Ouest et protection du terminal méthanier



Source: Spodar, 2018

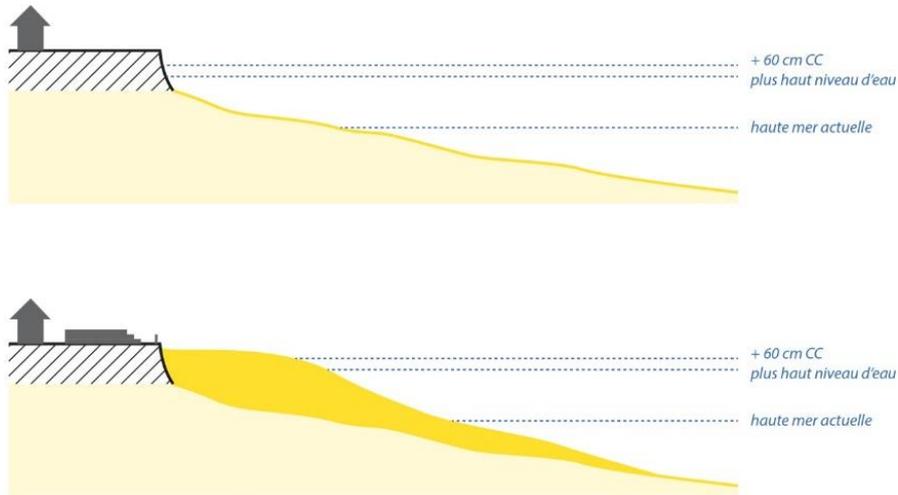


De janvier 2012 à mars 2013  
plus de 3 millions de m<sup>3</sup> de sable refoulés

# Techniques complémentaires permettant de « travailler » avec la nature



Plage du Clipon. Source: A. Tresca, 2013



### Avantages

- Méthode souple
- Extension immédiate de la plage
- Dissipation de l'énergie des vagues
- Protection des digues, ouvrages portuaires
- Protection contre les submersions marines
- Valorisation des sédiments de dragage**
- Attractivité de la plage accrue
- Permet « d'accompagner » la hausse du niveau de la mer

### Inconvénients

- Solution non permanente
- Coûts
- Efficacité incertaine
- Entretien fréquent
- Travaux annexes
- Impacts faune/flore

Merci de votre attention



[ruz@univ-littoral.fr](mailto:ruz@univ-littoral.fr)