



HAL
open science

Facteurs hydrodynamiques.

Anaïs Daburon, Caroline Maurin, Alain Trentesaux, André Gaël, Franck Baraer, Yvonne Battiau-Queney, Matthieu Caillaud, François Clerc, Stéphanie Desmarre, Vincent Donato, et al.

► **To cite this version:**

Anaïs Daburon, Caroline Maurin, Alain Trentesaux, André Gaël, Franck Baraer, et al.. Facteurs hydrodynamiques.. Dynamique et évolution du littoral – Fascicule 1, Synthèse des connaissances de la frontière belge à la pointe du Hourdel, 2018. <hal-03044455>

HAL Id: hal-03044455

<https://hal.science/hal-03044455v1>

Submitted on 7 Dec 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Chapitre 3

Facteurs hydrodynamiques

Coordinateurs

Anaïs DABURON, *Cerema Nord-Picardie*

Caroline MAURIN, *Cerema Nord-Picardie*

Alain TRENTESAUX, *Université de Lille*

Contributeurs

Gaël ANDRE, *Shom*

Franck BARAER, *Météo-France Ouest*

Yvonne BATTIAU-QUENEY, *Université de Lille – EUCC-France*

Matthieu CAILLAUD, *Ifremer*

François CLERC, *DREAL Hauts-de-France*

Anaïs DABURON, *Cerema Nord-Picardie*

Stéphanie DESMARRE, *Shom*

Vincent DONATO, *Shom*

Pascal GREGOIRE, *Grand port maritime de Dunkerque*

Xavier KERGADALLAN, *Cerema Eau, mer et fleuves*

Hervé LE CAM, *Météo-France Ouest*

Caroline MAURIN, *Cerema Nord-Picardie*

Nicolas POUVREAU, *Shom*

Ronan PRONOST, *Shom*

Manuelle RICHEUX, *DREAL Hauts-de-France*

Amélie ROCHE, *Cerema Eau, mer et fleuves*

Ronan SANQUER, *Cerema Eau, mer et fleuves*

Alain TRENTESAUX, *Université de Lille*

Vincent VANCRAENENBROECK, *Cerema Nord-Picardie*

Mickaël VASQUEZ, *Ifremer*

Emeric VEDIE, *Cerema Nord-Picardie*

Dynamiques et évolution du littoral

Synthèse des connaissances de la frontière belge à la pointe du Hourdel

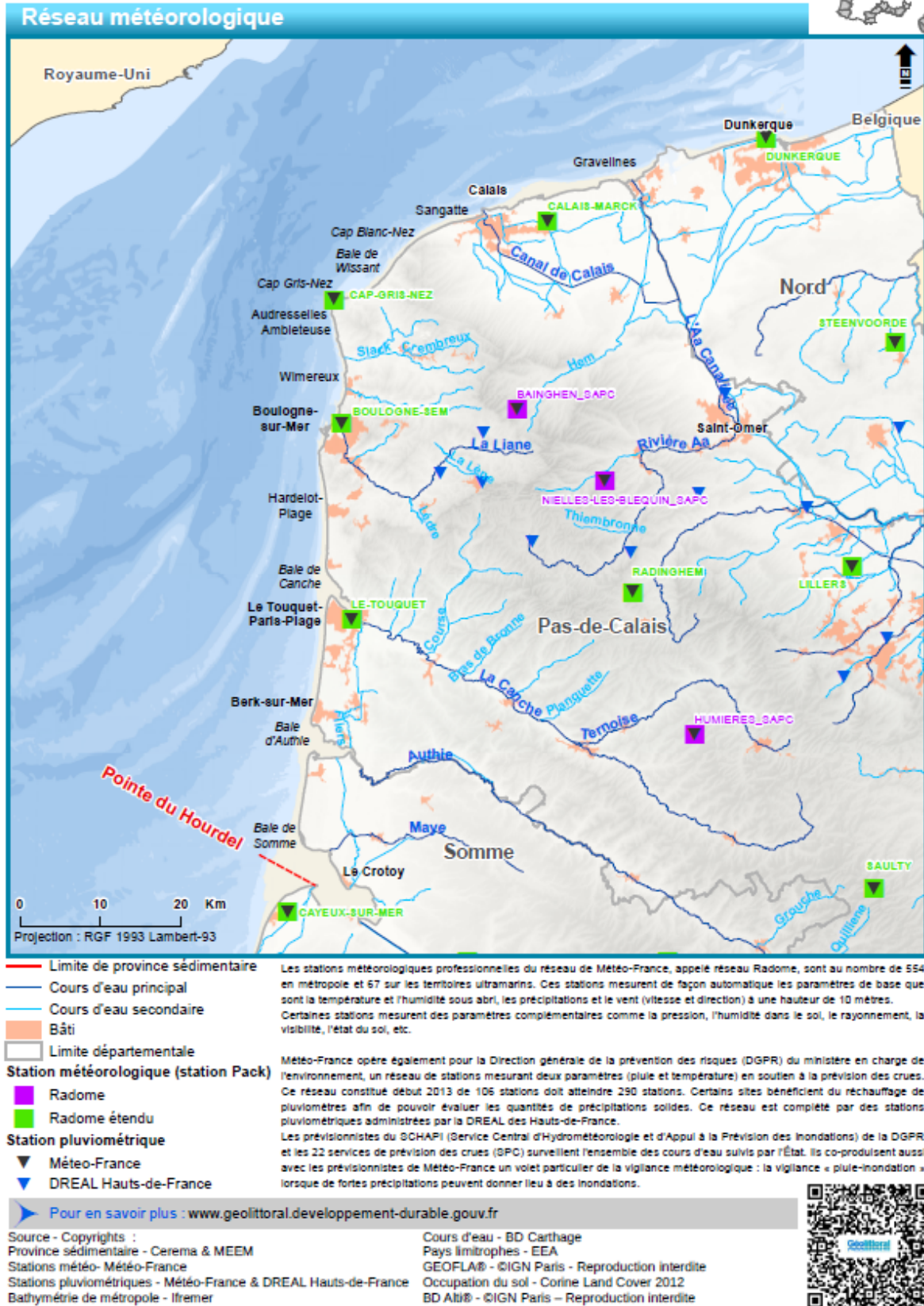


Figure 3.1 : Stations météorologiques appartenant au réseau de surveillance en Nord et en Pas-de-Calais © BRGM (sigesnpc.brgm.fr, 2015) et stations pluviométriques gérées par Météo-France et la DREAL Hauts-de-France sur le bassin Artois-Picardie

3. FACTEURS HYDRODYNAMIQUES

La dynamique du trait de côte est affectée par les facteurs climatiques, hydrologiques et hydrodynamiques : le vent, les vagues, le niveau marin et les courants associés sont prédominants dans cette dynamique. La connaissance de ces phénomènes permet de définir l'hydrodynamique littorale et les modalités de transport des sédiments qui rentreront dans les processus d'érosion et de sédimentation.

3.1 Climatologie

3.1.1 Climatologie atmosphérique

Sur la province de la pointe du Hourdel à la frontière belge, les données de climatologie atmosphérique sont issues des prévisions et des mesures faites par Météo-France. Trente-trois stations météorologiques sont recensées sur les départements du Nord et du Pas-de-Calais (chiffres de 2011 ; [Figure 3.1](#), [Tableau 3.1](#) et [9.4.1 Annexe 3.1](#)) ; neuf stations concernent la Somme.

Les stations pluviométriques du bassin Artois-Picardie sont gérées conjointement par la DREAL des Hauts-de-France et Météo-France ([9.4.2 Annexe 3.2](#) et [Figure 3.1](#)).

3.1.1.a. Climatologie atmosphérique générale

Du fait de sa position septentrionale (50-51°N) et de sa situation en bordure maritime ouest du continent, la côte d'Opale se caractérise par un climat de type tempéré océanique (d'après la classification de Köppen-Geiger, voir [Figure 3.2](#) et [9.4.3 Annexe 3.3](#)). Elle est au centre d'une dynamique météorologique très active marquée par une diversité des types de temps (Héquette, Rufin-Soler, 2007). Les amplitudes thermiques sont relativement faibles, l'ensoleillement réduit, les hivers assez froids et des pluies hivernales durables (Maspataud, 2011 ; Météo-France, 2015). Les influences littorales et l'orientation générale du relief dessinent des paysages climatiques régionaux particulièrement contrastés (Météo-France, 2015). Dans l'est de la province, l'éloignement des côtes renforce l'influence continentale. L'amplitude thermique y est un peu plus marquée ; le climat est dit océanique altéré (Météo-France, 2015). Les températures moyennes sur le littoral sont comprises entre 4,8 °C en février à Boulogne-sur-Mer et 18,4 °C en août à Dunkerque (voir Fiches climatologiques – [9.4.3 Annexe 3.3](#)). Il y a entre 20 et 40 jours de gel par an sur le littoral ([Tableau 3.2](#)).

Tableau 3.1 : Stations météorologiques du Nord et du Pas-de-Calais en mars 2011 (sigesnpc.brgm.fr, 2015)

Type de station	Nombre de stations recensées
Station synoptique avec observation à distance	1
Station synoptique non professionnelle ou observation à distance	3
Station automatique en temps réel	4
Station automatique en temps différé	1
Station manuelle	24

Tableau 3.2 : Nombre moyen annuel de jours de pluie et gel de 1981 à 2010 sur 5 villes de la province (en italique : les villes non-littorales) (d'après les données de Météo-France, 2015 ; lameteo.org, 2015 ; et fiches climatologiques aux sémaphores de Boulogne-sur-Mer et Dunkerque – [9.4.3 Annexe 3.3](#)). (*) Nombre de jours où la température maximale a été inférieure à 0 °C.

Ville	Abbeville	Boulogne-sur-Mer	Dunkerque	Le Touquet	Lille
Nombre de jours de pluie	128,0	125,3	121,6	nc	127,4
Nombre de jours de gel	nc	24,4	22,1	38,1	42,9
Nombre de jours Tmax < 0°C*	nc	3,4	3,3	4,3	6,7

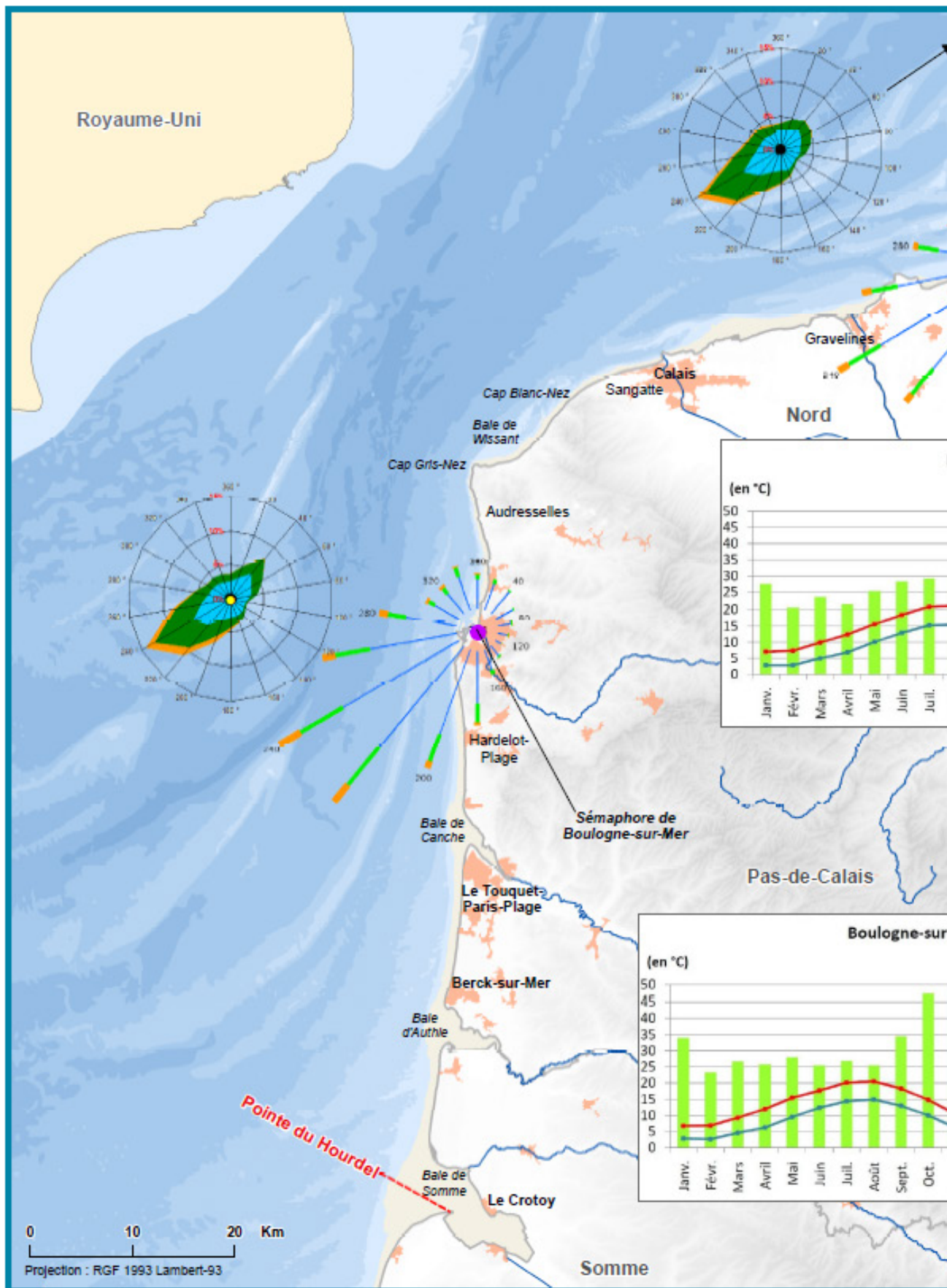


Figure 3.2 : Carte climatique de la province de la pointe du Hourdel à la frontière belge. Températures, pluviométrie

Dynamiques et évolution du littoral

Synthèse des connaissances de la frontière belge à la pointe du Hourdel

Climatologie atmosphérique

Températures, précipitations et fréquence des vents

- Position des roses de vent en mer
- Sémaphore
- Limite de province sédimentaire

Cours d'eau

- Cours d'eau principal
- Bâti
- Limite départementale



Légende

Données mesurées aux sémaphores

Fréquence des vents en fonction de leur provenance

Groupes de vitesses (m/s)

[1,5;4,5] [4,5;8,0] > 8,0

Pourcentage par direction

0% 5% 10%

Données modélisées en mer

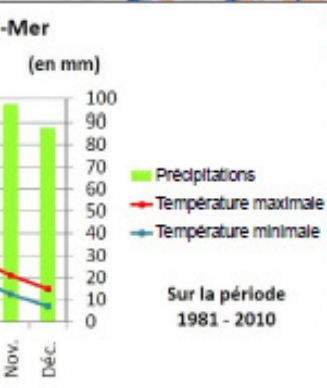
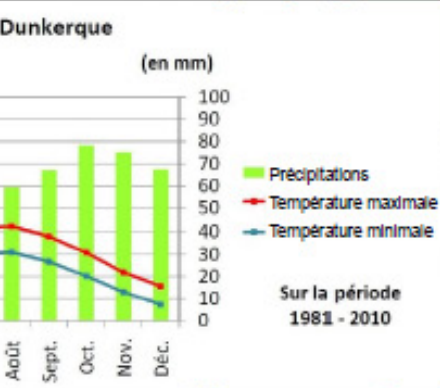
■ 7B et plus

■ 5 et 6B

■ 3 et 4B

■ 0 et 2B

Echelle Beaufort



	Dunkerque		Boulogne-sur-Mer	
	Valeur	Date	Valeur	Date
Température				
Température la plus élevée (°C)	38.3	19/07/2006	34.8	11/08/2003
Température la plus basse (°C)	-18	12/02/1929	-13.6	01/02/1956
Nombre moyen de jours avec une température >= 25°C	9.5		11.1	
Nombre moyen de jours avec une température <= 0°C	22.1		24.4	
Précipitations				
Hauteur quotidienne maximale de précipitations (en mm)	79.1	29/08/1996	67.6	18/08/1999
Nombre de jours avec précipitations >= 10mm	17.2		22.3	
Vent				
Rafale maximale de vent (m/s)	43	25/01/1990	46	16/10/1987
Nombre moyen de jours avec rafales >= 20m/s	3.2		7.7	
Nombre moyen de jours d'orage	Non disponible		16	
Nombre moyen de jours de neige	Non disponible		10.5	

➤ Pour en savoir plus : www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr

Source - Copyrights :
 Province sédimentaire - Cerema & MEEM
 Bathymétrie de métropole - Ifremer
 Pays limitrophes - EEA
 GEOLLA® - ©IGN Paris - Reproduction interdite
 Occupation du sol - Corine Land Cover 2012
 Cours d'eau - BD Carthage
 BD Alt® - ©IGN Paris - Reproduction interdite
 Rose de vent et fiches climatiques - Météo France



3.1.1.b. Typologie des perturbations

Les conditions de temps subies dans l'ouest de l'Europe varient régulièrement. Malgré la grande instabilité du climat océanique, les états successifs de l'atmosphère permettent de distinguer, en Europe occidentale, trois types de temps caractéristiques (Héquette, Rufin-Soler, 2007 ; Maspataud, 2011 ; d'après Sipka, 1998 ; données synthétisées par Vanhée, 2002 d'après les données du Shom 1999) :

- **temps perturbé de sud-ouest ou d'ouest (Figure 3.3-A)** : les centres d'action du temps perturbé de sud-ouest ou d'ouest sont constitués par une zone anticyclonique centrée au sud des Açores et s'étendant jusqu'au sud-ouest du continent européen et par une zone dépressionnaire située sur le nord-est de l'Atlantique, entre la pointe sud du Groenland, l'Islande et les îles britanniques ; il s'agit du type de temps le plus fréquent sur les côtes de la province.
- **temps perturbé de nord-ouest ou de nord (Figure 3.3-B)** : le temps perturbé de nord-ouest ou de nord fait généralement suite au précédent : l'anticyclone subtropical développe une dorsale vers l'Islande et la dépression se déplace vers la Scandinavie. Les perturbations qui circulent dans un flux de nord-ouest à nord n'ont en général pas de front chaud, mais sont constituées d'un front froid secondaire qui apporte une rotation du vent de l'ouest au nord-ouest ou du nord-ouest au nord. Les fronts froids sont actifs et, en raison du fort contraste (maximum en hiver et au début du printemps) entre la température superficielle de la mer et celle de l'air d'origine arctique, les traînes comportent de nombreuses averses de pluie, de neige ou de grêle ainsi que des orages. Les vents de secteur nord-ouest, très irréguliers, peuvent atteindre 10 à 15 m/s en Manche et souffler en rafales parfois très violentes sous les grains.
- **temps froid de nord-est à est (Figure 3.3-C)** : ce régime correspond à une circulation générale d'est non perturbée associée à un temps froid de nord à est. Il est caractérisé par la présence d'un centre d'action anticyclonique situé soit à l'ouest ou au nord-ouest des îles britanniques, soit en Scandinavie, mais prolongé par une dorsale en direction de l'ouest du golfe de Gascogne. Des pressions relativement basses et parfois même une dépression bien organisée sont observées au sud de

l'Espagne. Ce régime, qui succède souvent à un régime de nord à nord-ouest, n'est pas systématiquement perturbé. En hiver et en début de printemps, il peut être observé de l'instabilité en mer et sur les côtes avec des averses de pluie ou de neige. Cette instabilité, due au fort contraste thermique entre l'air originaire du continent et la mer, est d'autant plus forte que les masses d'air continentales ont eu un trajet suffisamment long sur la mer pour se charger en humidité. En hiver ou au printemps, des coups de vent de nord-est à est surviennent assez fréquemment en Manche dès que le gradient de pression se renforce sur la face sud-est de l'anticyclone, provoquant des mers fortes sur le littoral nord.

Les perturbations qui atteignent la province de la pointe du Hourdel à la frontière belge font suite à des dépressions qui se forment pour la plupart sur l'Atlantique, de l'archipel des Açores à l'Islande (voir *Fiches tempêtes – 9.4.4 Annexe 3.4*).

Parmi les perturbations récentes (*Tableau 3.3*), la tempête Tilo a touché les côtes de la Manche, de la baie de Somme au cap Gris-Nez, le 9 novembre 2007. Cette tempête s'est créée par les actions conjuguées d'une dépression venue du sud-ouest de l'Islande et d'un très fort vent de secteur nord-ouest soufflant sur un fetch très grand. Elle a touché les côtes du nord de la France avec un vent dont la plus forte valeur a été mesurée à Gravelines (61 km/h) à 5 h UTC¹³ (soit à 6 h heure française métropolitaine). Cette tempête ne s'est pas accompagnée de fortes précipitations ni d'un fort coefficient de marée (inférieur à 80 les 8 et 9/11/2007). Par contre, Tilo a permis d'observer une surcote record de 2,40 m à Dunkerque et de 1,60 m à Calais où les dégâts au littoral ont été importants dans ces deux ports. Cette importante surcote étant survenue à marée basse, les débordements ont été fortement limités (*Tableau 3.3, Fiches tempêtes – 9.4.4 Annexe 3.4* et voir également 3.2.1.d).

Les côtes de la province présentant deux orientations différentes, les perturbations qui touchent le littoral peuvent être différentes d'une façade à l'autre. Les tempêtes recensées ici pour comprendre les impacts des perturbations sur le littoral sont uniquement les événements ayant causé des pertes ou des accrétions sédimentaires depuis 1900, parfois accompagnées de ruptures de digues (*Tableau 3.3* et *Fiches tempêtes – 9.4.4 Annexe 3.4*). Des événements survenus avant 1900 sont recensés dans l'annexe 3.5 (9.4.5) sans être exhaustifs.

13 Temps universel coordonné (UTC = Universal Time Coordinated)

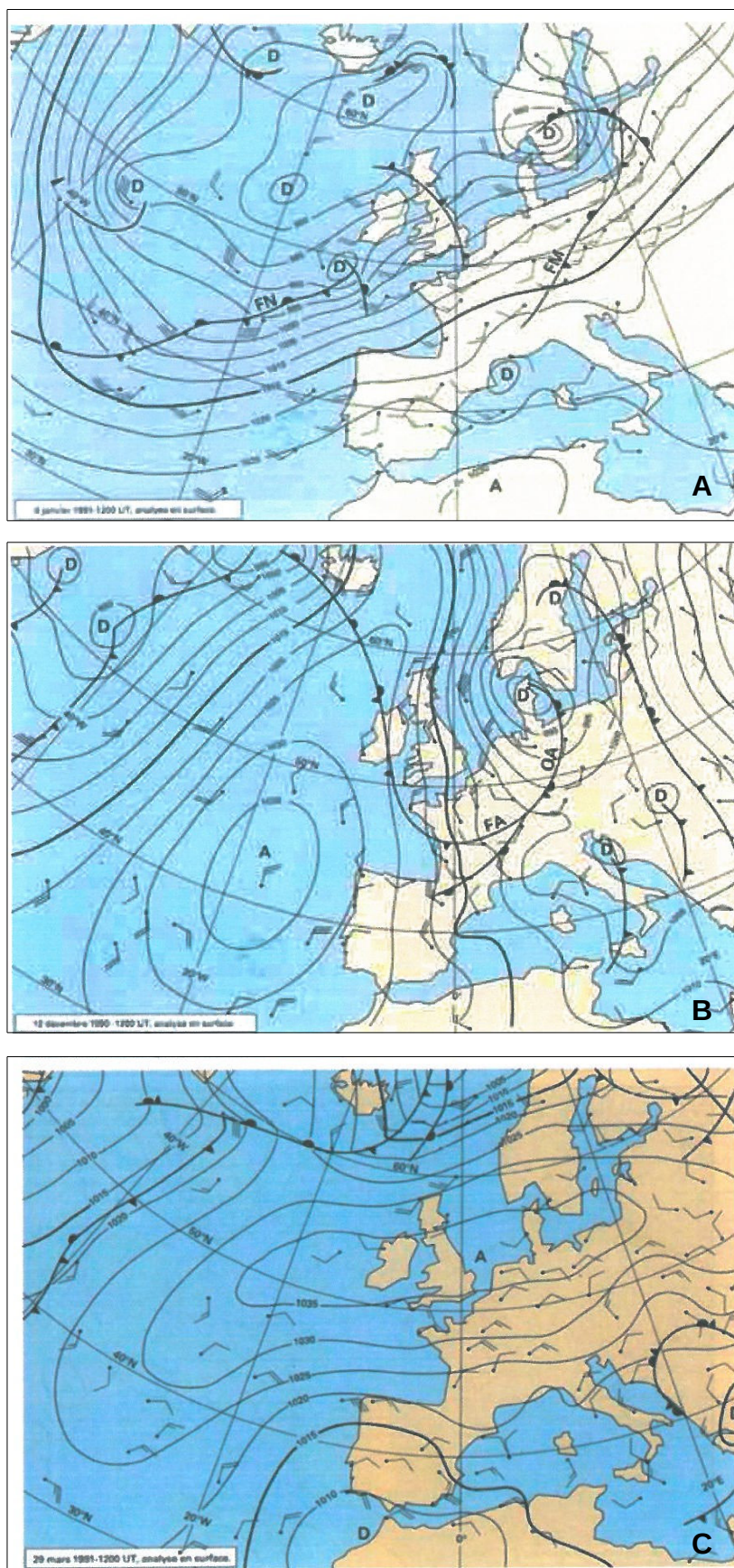


Figure 3.3 : Circulation générale associée à un (A) temps perturbé de sud-ouest, (B) temps perturbé de nord-ouest à nord et (C) temps froid de nord-est à est dans l'ouest de l'Europe (Héquette, Rufin-Soler, 2007 ; Maspataud, 2011 ; d'après Vanhée, 2002, Sipka, 1998 et données du Shom 1999)

Tableau 3.3 : Liste des tempêtes majeures ayant impacté le littoral de la pointe du Hourdel à la frontière belge en 2015 ; données marines issues de shom.fr, 2015). Les tempêtes survenues avant 1900 sont recensées dans l'annexe 3

Date	Localisation	Dégâts au littoral de la province
7 janvier 1905	Sangatte (59)	Brèches dans la digue ; érosion de la dune de 5 à 6 m de profondeur
2 et 3 décembre 1909	Dunkerque (59)	Destruction de la digue Tixier sur 380 m
10-19 mars 1914	Berck (62)	Recul de la dune au sud de Berck
1 ^{er} novembre 1921	Sangatte (59)	Érosion de la dune et recul du front dunaire jusqu'à 12 m sur 600 m ; contact digue-dune ; abaissement de l'estran de 1,5 m
15 au 30 novembre 1921	Sangatte (59)	Engraissement du pied de dune et exhaussement de l'estran
17 et 18 décembre 1921	Sangatte (59)	Érosion de la dune : transport sédimentaire longitudinal d'ouest en est
31 décembre 1921 et 1 ^{er} janvier 1922	Sangatte (59)	Brèches dans la digue ; érosion de la dune bordière de 10 m sur 550 m ; baisse niveau de l'estran de 1 m
10 et 11 décembre 1925	Sangatte (59)	Cinq brèches ouvertes dans la digue (surface d'environ 1 200 m ²) et érosion l'estran
10-12 novembre 1931	Nord (59)	À Dunkerque, destruction de la plage de Malo Terminus sur 200 m
1 ^{er} et 2 mars 1949	Nord (59) et Pas-de-Calais (62)	À Dunkerque, 2 ruptures de la digue Tixier du canal exutoire
15 au 17 mars 1949	Nord (59)	À Dunkerque, franchissement de la digue Tixier par les brèches ouvertes suite tempête des 1-2/03/1949 ; rupture des digues sur les côtes
31 janvier, 1 ^{er} et 2 février 1953	nord de la France	Abaissement de l'estran (- 1 m à Sangatte), attaque en pied de dune, front dunaire entaillé en falaises d'érosion ; destruction de nombreuses digues de la mer du Nord (digues de Sangatte, de Malo-les-Bains, digue Taaf à Marck...) et de la Manche (digue Sainte Beuve à Boulogne-sur-Mer)
13-16 octobre 1958	Ambleteuse (62)	Ouverture d'une brèche d'environ 400 m ² dans le perré
25 octobre 1961	Wimereux (62)	Affouillement partiel des palplanches formant la fondation du perré de la digue
3-5 octobre 1963	Pas-de-Calais (62)	Abaissement de la plage de 2 m à Wimereux et rupture de digues à St-Josse-s/-
03 novembre 1963	Nord (59)	Érosion sur la côte dunkerquoise
7 octobre 1967	Wimereux (62)	Abaissement de la plage de 2 m
25 janvier 1977	Côtes du Nord (59)	À Dunkerque, érosion de la digue Nicolas II
07 et 19 février 1977	Côtes du Nord (59)	Érosion générale à Malo-les-Bains
11 et 12 janvier 1978	Côtes du Nord (59), Calais (62)	Dégâts sur le front de mer ; recul de 5 m du front dunaire dans le secteur de la digue Marchand à Dunkerque
1 ^{er} et 2 février 1983	Mer du Nord, Nord (59)	Recul des dunes bordières de 5 à 8 m sur le littoral est-dunkerquois
26 et 27 février 1990*	Manche, Pas-de-Calais (62) Mer du Nord, Nord (59)	Tempête Vivian ; démaigrissement des plages à Bray-Dunes, Cucq, Dunkerque, Malo, Le Touquet, Wissant, Zuydcoote) ; recul du front dunaire à Bray-Dunes (Leffrinckoucke (env. 20 m), Le Portel, Le Touquet, Tardinghen (jusqu'à 50 m), Sangatte (5-10 m), Zuydcoote ; dégâts importants sur les côtes de la Manche et de la mer du Nord (brèche de 15 m dans la digue-promenade de Wimereux...)
28 février et 1 ^{er} mars 1990*	Mer du Nord, Nord (59)	Tempête Wiebke ; dégâts importants sur cordons dunaires autour de la mer du Nord ; démaigrissement des plages
11 novembre 1992	Nord (59)	Érosion des dunes est-dunkerquoises
12 janvier 1993	Nord (59)	Érosion des dunes est-dunkerquoises
25 janvier 1994	Nord (59)	Dégâts aux digues et dunes de Dunkerque
1 ^{er} et 2 janvier 1995	Côtes du Nord Dunkerque (59)	Abaissement de l'estran, attaque des dunes, net recul du front dunaire, importants dégâts sur les falaises dunaires et blockhaus sapés, déstabilisés ou saillants le long des dunes de Dewulf et Marchand
23 février 1999	Côtes du Nord (59)	Ensablement fort de la digue de Malo à Dunkerque
18-21 mars 2007	Côtes ouest et nord de la France	Rupture de la digue de Wissant sous les vagues ; érosion du cordon dunaire dans différents secteurs
9 novembre 2007	Mer du Nord, Nord (59)	Tempête Tilo ; érosion des plages et du cordon dunaire sur les côtes ; submersion de digues ; impacts similaires à ceux de 1953
9 et 10 février 2009	Nord (59), Bretagne et Pays de la Loire	Tempête Quinten ; sur le secteur dunkerquois : submersion de digues, érosion des plages et de cordon dunaire
28 février et 1 ^{er} mars 2010	Côtes ouest de la France	Tempête Xynthia ; dans le nord de la France, microfalaises d'érosion dunaire
5 et 6 décembre 2013	Mer du Nord, Nord (59)	Tempête Xaver ; digue de Dunkerque endommagée ; recul de la dune de Malo (Zuydcoote) d'environ 6-7 m et basculement du blockhaus ; érosion de la dune de Perroquet (Bray-Dunes) d'environ 5 m et formation d'une falaise dunaire de la digue de Bray-Dunes jusqu'au Camping du Perroquet

entre 1900 et 2016 (recensées par (1) Héquette, Rufin-Soler, 2007 ; (2) DHI, 2009 ; (3) Maspataud, 2011 ; (4) Cartier, 2011). Les 7 tempêtes de février-mars 1990 (marquées * dans le tableau) ont fait l'objet d'un bilan dans Maspataud (2011).

	Vent	Niveau marin observé (CM) / coef.	Source	Référence
	nord-ouest	7,70 m (surcote de 0,9 m) / coef. 90	(1) et (2)	Archives départementales du Pas-de-Calais
		5,59 m (le 02/12 à Dunkerque) / coef. 65 et 59	(3)	Deboudt (1997) et Bessemoulin (2002)
		10,34 m / coef. 115 (bouée de Fort-Mahon le 14/03)	(2)	Macquet-Michedez (2007)
que-	ouest-nord-ouest	7,58 m / coef. 102 (Calais)	(1) et (2)	Archives départementales du Pas-de-Calais Deboudt (1997)
	nord-est	7,46 m / coef. 93 (Calais)	(1)	
	ouest-nord-ouest	7,55 m / coef. 98 (le 17/12 à Calais)	(1)	
e du	ouest-nord-ouest	7,97 m (surcote de 1 m à Calais) / coef. 95	(1) et (2)	Archives départementales du Pas-de-Calais Deboudt (1997)
n de	nord-ouest	5,95 m / coef. 41 (le 10/12 à Calais) 6,09 m / coef. 45 (le 11/12 à Calais)	(1) et (2)	Archives départementales du Pas-de-Calais Deboudt (1997)
		6,26 m / coef. 105 (le 11/11 à Dunkerque)	(3)	Deboudt (1997)
	nord-ouest	7,55 m (surcote de 1,45 m) / Coef. 85 à 87	(2) et (3)	Deboudt (1997) Le Nouveau Nord (3 au 6 et 16/03/1949)
à la		6,27 m / coef. 117 (le 16/03 à Dunkerque)	(2) et (3)	Le Nouveau Nord (16, 17 et 18/03/1949)
aire ord che	nord puis nord-ouest	8 m à Dunkerque (surcote de 2,40 m) et 8,20 m à Sangatte (surcote de 1,5 m) / coef. 83 (4 fois)	(1), (2) et (3)	Archives municipales de Dunkerque Archives départementales du Pas-de-Calais Le Nouveau Nord (3/02/1953)
	nord-ouest	9,46 m / coef. 115 (le 14/10 à Boulogne-sur-Mer)	(2)	Archives départementales du Pas-de-Calais
	nord-ouest	9,22 m / coef. 108 (Boulogne-sur-Mer)	(2)	Archives départementales du Pas-de-Calais
Mer		9,29 m / coef. 112 (le 05/10 à Boulogne-sur-Mer)	(2)	Syndicat des Bas-Champs de St-Josse-s/Mer
		6,42 m / coef. 113 (Dunkerque)	(3)	Corbau (1995)
		9,13 m / coef. 108 (Boulogne-sur-Mer)	(2)	Archives départementales du Pas-de-Calais
		5,71 m / coef. 75 (Dunkerque)	(3)	
		6,07 et 6,08 m / coef. 98 et 99 (Dunkerque)	(3)	Corbau (1995)
lune	nord-nord-est ouest-sud-ouest	Surcote de 1,13 m (Dunkerque), 1,10 m (Calais) et 0,88 m (Boulogne-sur-Mer) / coef. 108 et 107	(1), (2) et (3)	Bessemoulin (2002), Chaverot (2006), La Voix du Nord (13/01/1978) et Steers <i>et al.</i> (1979)
		Surcote de 2,01 m à Dunkerque / coef. 102 et 97	(3)	Pirazzoli, Costa (2007)
que- rck, (m), t de	ouest-sud-ouest	Surcote de 1,60 m à Etaples-sur-Mer / coef. 102 et 105	(1), (2) et (3)	Archives municipales de Dunkerque, Caspar (2007), Chaverot (2006), Fink <i>et al.</i> (2009)
du		6,11 m et 6,13 m / coef. 106 et 103 (Dunkerque)	(3)	Archives municipales de Dunkerque Caspar (2007) et Fink <i>et al.</i> (2009)
		5,96 m / coef. 86 (Dunkerque)	(3)	Corbau (1995) et Denecker (2001)
		6,08 m / coef. 102 (Dunkerque)	(3)	Corbau (1995) et Denecker (2001)
		5,44 m / coef. 67 (Dunkerque)	(3)	Denecker (2001)
ntes nes		Surcote de 1,15 m à Dunkerque / coef. 95 à 102	(3)	Denecker (2001) SILE, Clabaut (1995)
		5,60 m / coef. 67 (Dunkerque)	(3)	La Voix du Nord (24/2/1999) Deboudt (1997)
sur		9,62 m à Boulogne-sur-Mer (surcote de 0,82 m) et 8,06 m à Calais (surcote de 0,85 m) / coef. 102 à 115	(2) et (3)	La Voix du Nord (20-21/03/2007) Ruz <i>et al.</i> (2009)
sion		Surcote record de 2,40 m à Dunkerque, le 9/11 à BM / coef. 77	(3)	La Voix du Nord (9 au 12/11/2007) Pool (2009)
n de		6,16 m / coef. 104 (le 10/02 à Dunkerque)	(3)	La Voix du Nord (10-11/02/2009)
		6,11 m et 6,25 m / coef. 102 et 112 (Dunkerque)	(3)	La Voix du Nord (1 au 4/03/2010)
wulf e du gue		Surcote de 2,24 m à Dunkerque / coef. 102 et 100	(4)	Observations visuelles directes

Les 7 tempêtes de février-mars 1990 ([Tableau 3.3](#)) ont particulièrement marqué le littoral de la province avec notamment un abaissement/démaigrissement de la partie supérieure de l'estran, une attaque importante des dunes entaillées en falaise sableuse le long des dunes de Dewulf et Marchand, un recul du front dunaire localement jusqu'à 16-20 m au maximum, des dégâts aux perrés de Dunkerque à Leffrinckoucke et Bray-Dunes et une incursion marine observée dans la brèche des dunes du Perroquet à l'est de Bray-Dunes (Maspataud, 2011).

3.1.1.c. Caractérisation des vents

Les types de temps affectant les côtes du nord-ouest européen engendrent, pour la côte d'Opale, deux composantes de vents ([Figure 3.2](#) et [9.4.3 Annexe 3.3](#)) : à Dunkerque, la direction dominante balaie une large ouverture de sud-sud-ouest à ouest-sud-ouest, avec des vents dominants de secteur sud-ouest, en réponse aux dépressions nord-atlantiques qui remontent vers la Manche en relation avec la circulation dominante d'ouest. Une fenêtre secondaire est représentée par le secteur nord à nord-est (Héquette, Rufin-Soler, 2007). Ces vents du nord-nord-est sont moins fréquents, mais représentent une proportion non négligeable des vents forts. Ils sont issus du passage des masses d'air provenant de la mer du Nord.

Au long de l'année, trois périodes se succèdent (Maspataud, 2011) :

- une période dite « printanière » marquée par une dominance des vents provenant du secteur sud-ouest, ainsi qu'une proportion relativement importante de vents du quart nord-est, en provenance de la mer du Nord. Les vents forts (> 16 m/s) sont exclusivement de secteur sud-ouest ;
- une période estivale de mai/juin à octobre de calme relatif, qui se caractérise par une prédominance des vents faibles (< 8 m/s) à moyens (8 à 12 m/s) du secteur sud-ouest. Les vents forts (12 à 16 m/s) représentent une faible proportion, avec une quasi-absence des vents supérieurs à 16 m/s ;

- une période dite « hivernale » de novembre à avril/mai, avec un étalement directionnel plus fort, et l'apparition de composantes nord-ouest et sud-est. Les vents faibles sont observés dans toutes les directions. Cette période est caractérisée par une prédominance des vents modérés et forts (> 8 m/s) de secteur sud-ouest. Plus de la moitié de ces vents forts sont supérieurs à 12 m/s. Quant aux vents supérieurs à 16 m/s, ils proviennent du large quart sud-ouest.

3.1.1.d. Précipitations

Les précipitations sur le littoral sont assez régulières ([Tableau 3.4](#)), avec plus de 120 jours de pluie par an (voir [Tableau 3.2](#) et [Figure 3.2](#)), mais les moyennes mensuelles sont comprises entre 37,5 mm en février à Boulogne-sur-Mer et 111,7 mm en novembre au Touquet ([9.4.3 Annexe 3.3](#)). La façade bénéficie d'un climat tempéré océanique avec des précipitations qui ne sont négligeables en aucune saison.

Les précipitations extrêmes (disponibles à l'adresse pluiesextremes.meteo.fr, Météo-France, 2017) ont dépassé les 200 mm en 3 jours sur la Somme en juillet 2001 ([Tableau 3.6](#)).

Les douze principaux événements de la province recensés entre 1766 et 2015 ([Tableau 3.5](#)) se concentrent principalement en période estivale (les détails de ces événements sont disponibles à l'adresse pluiesextremes.meteo.fr, Météo-France, 2017).

Tableau 3.4 : Précipitations moyennes annuelles de 1981 à 2010 sur 4 villes de la province (en italique : ville non-littorale) (meteofrance.com, 2015)

Ville	Boulogne-sur-Mer	Dunkerque	Le Touquet	Lille
Précipitations (en mm/an)	702,6	679,7	901,3	741,4

Tableau 3.5 : Événements pluviométriques majeurs sur les 3 départements de la province de 1766 à 2015 (données issues de pluiesextremes.meteo.fr)

Date	Type d'événement	Description
13 juillet 1788	Orages sur le nord de la France	Cet épisode a provoqué des ravages spectaculaires sur bon nombre de départements du nord-ouest de la France.
3 septembre 1958	Orages en vallée de Somme	Le 3 septembre 1958 de violents orages touchent la vallée de la Somme.
28 octobre 1998	Inondations dans le nord de la France	De fortes précipitations touchent le nord de la France au mois d'octobre 1998, essentiellement du 23 au 31.
Hiver 2000-2001	Inondations catastrophiques dans la Somme	D'importantes inondations ont eu cours au printemps 2001, principalement suite à des remontées de nappes phréatiques, dans le département de la Somme.
3 juillet 2005	Orages dans le nord de la France	Sévères lignes successives d'orages dans la nuit du 3 au 4 juillet 2005, de la Somme au Nord-Pas-de-Calais.
12 au 14 août 2006	Inondations sur le nord de la France	Elles touchent plus particulièrement le Pas-de-Calais.
5 juillet 2012	Orages dans le nord de la France	De violents orages éclatent sur la France le 5 juillet. Les départements de l'Oise et du Pas-de-Calais sont particulièrement touchés.
27 juillet 2012	De très forts orages traversent la France	L'événement orageux traverse la France du sud-ouest au nord produisant de très fortes pluies sur les Pyrénées-Atlantiques, les Hautes-Pyrénées, le Gers, l'Oise et le Nord.
19 juin 2013	Violents orages sur le quart nord-est de la France	Le 19 juin 2013 plusieurs vagues orageuses remontent et touchent le quart nord-est de la France, particulièrement les régions Picardie et Champagne-Ardenne.
27 juillet 2014	Pluies diluviennes sur le Nord	Dans l'après-midi du 27 juillet 2014, un orage stationnaire a entraîné des pluies diluviennes près d'Hazebrouck.
Du 5 au 15 juin 2015	Orages sur la France	Après un début de mois de juin particulièrement chaud sur la France des orages parfois violents éclatent entre le 5 et le 15 juin 2015 apportant localement d'importantes quantités de précipitations, et parfois de fortes rafales de vent et de la grêle.
13 août 2015	Fortes pluies orageuses sur la Seine-Maritime et le Nord	Plusieurs vagues orageuses successives et plus ou moins intenses traversent l'Hexagone dans un flux de sud. Les plus virulentes touchent la Normandie puis le nord de la Picardie et le Nord-Pas-de-Calais.

Tableau 3.6 : Records mensuels de précipitations sur 1, 2 et 3 jours pour les 3 départements de la province (données issues de pluiesextremes.meteo.fr)

Somme	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Annuel
1 jour	31/01/1982 67 mm	02/02/1961 42 mm	10/03/2008 47 mm	30/04/1989 95 mm	30/05/2016 76 mm	23/06/1974 97 mm	06/07/2001 101 mm	18/08/2002 82 mm	03/09/1958 104 mm	15/10/1976 64 mm	20/11/1963 65 mm	31/12/1980 78 mm	03/09/1958 104 mm
2 jours	29/01/1961 65 mm	13/02/1990 57 mm	04/03/2012 66 mm	30/04/1983 105 mm	29/05/2016 87 mm	23/06/1974 100 mm	06/07/2001 194 mm	24/08/1987 118 mm	03/09/1958 113 mm	13/10/2013 83 mm	03/11/2009 81 mm	24/12/1999 75 mm	06/07/2001 194 mm
3 jours	28/01/1961 79 mm	12/02/1990 64 mm	03/03/2012 67 mm	30/04/1983 111 mm	30/05/2016 92 mm	23/06/1974 119 mm	05/07/2001 205 mm	24/08/1987 123 mm	03/09/1958 114 mm	25/10/1994 98 mm	03/11/2009 103 mm	24/12/1999 91 mm	05/07/2001 205 mm

Pas-de-Calais	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Annuel
1 jour	13/01/2015 49 mm	28/02/2002 55 mm	05/03/2012 53 mm	07/04/1961 40 mm	30/05/2016 81 mm	07/06/2016 93 mm	03/07/2005 123 mm	12/08/2006 112 mm	02/09/1998 85 mm	13/10/2013 88 mm	26/11/2009 76 mm	14/12/2011 59 mm	03/07/2005 123 mm
2 jours	24/01/1971 62 mm	27/02/2002 78 mm	04/03/2012 89 mm	29/04/2011 59 mm	29/05/2016 85 mm	07/06/2016 93 mm	03/07/2005 132 mm	12/08/2006 176 mm	02/09/1998 123 mm	13/10/2013 126 mm	26/11/2009 119 mm	13/12/2011 88 mm	12/08/2006 176 mm
3 jours	24/01/1971 74 mm	27/02/2002 86 mm	03/03/2012 93 mm	28/04/2011 64 mm	30/05/2016 95 mm	26/06/1981 100 mm	03/07/2005 135 mm	11/08/2006 191 mm	02/09/1998 132 mm	09/10/1964 128 mm	25/11/2009 159 mm	13/12/2011 110 mm	11/08/2006 191 mm

Nord	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Annuel
1 jour	30/01/1961 50 mm	28/02/1989 64 mm	28/03/1988 54 mm	24/04/1963 72 mm	16/05/1982 79 mm	23/06/1983 88 mm	29/07/2000 84 mm	01/08/1998 103 mm	02/09/1998 62 mm	12/10/1964 69 mm	06/11/1979 62 mm	17/12/1999 50 mm	01/08/1998 103 mm
2 jours	26/01/2002 71 mm	28/02/1989 71 mm	04/03/2012 77 mm	30/04/1978 58 mm	16/05/1982 98 mm	25/06/1981 89 mm	31/07/1998 103 mm	28/08/1996 113 mm	02/09/1998 79 mm	18/10/1961 90 mm	26/11/2009 85 mm	19/12/1993 72 mm	28/08/1996 113 mm
3 jours	25/01/2002 72 mm	28/02/1989 78 mm	04/03/2012 77 mm	30/04/1978 80 mm	16/05/1982 98 mm	25/06/1981 97 mm	18/07/1980 114 mm	27/08/1996 116 mm	02/09/1998 90 mm	17/10/1961 108 mm	25/11/2009 97 mm	18/12/1993 93 mm	27/08/1996 116 mm

3.1.2 Climatologie océanique

Sur la province de la pointe du Hourdel à la frontière belge, les données de climatologie océanique proviennent des travaux et expertises de l'Ifremer, dont l'institut est implanté sur la province à Boulogne-sur-Mer, et du laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (UMR 8187 LOG), sous tutelle de l'Université du Littoral Côte d'Opale (ULCO) et de l'Université de Lille.

3.1.2.a. Température de l'eau

La température de l'eau de mer diminue régulièrement du sud au nord de la province et du large vers les côtes (Figure 3.4). En surface, la température moyenne annuelle est de l'ordre de 12,4 °C au sud et au large tandis qu'elle est de 11,9 °C à la frontière belge à la côte (Figure 3.4). Au fond, les températures moyennes sont plus basses. Le gradient principal est un gradient côte – large avec des valeurs proches de 12,2 °C au large de la baie de Somme descendant à 11,4 °C sur la côte à Dunkerque. Les températures moyennes sur la colonne d'eau sont très proches des valeurs de surface en raison de l'important brassage des eaux.

Les écarts types (Figure 3.5) sont faibles au large : 3,4 °C dans les zones les plus profondes de la Manche et augmentent vers la côte pour atteindre 4,8 °C. Il n'y a pas de différence fondamentale entre les écarts types en surface, au fond ou sur la colonne d'eau (Figure 3.5).

3.1.2.b. Salinité

La salinité de l'eau diminue des côtes anglaises vers la province (Figure 3.6). Elle est proche de 35,25 psu le long des côtes anglaises et de 33,5 psu le long des côtes françaises. Cette plus faible valeur de salinité est liée à l'existence d'une masse d'eau en provenance de la Seine et alimentée par les fleuves de la province : le fleuve marin côtier (Brylinski *et al.*, 1991 ; Dupont *et al.*, 1991). L'alimentation par les petits fleuves côtiers picards se marque par une augmentation légère de la désalure au large de la Somme (voir également paragraphe 3.1.1.b). La salinité au fond est supérieure à celle de surface, mais dans des proportions négligeables (moins de 0,25 psu d'écart).

Les valeurs de salinité montrent peu de variabilité sur la période 2010-2015 (Figure 3.7). L'écart type n'augmente qu'à l'approche des fleuves principaux tels que la Somme et vers le nord, au-delà de la frontière de la province, où l'influence du panache de l'Escaut se fait sentir.

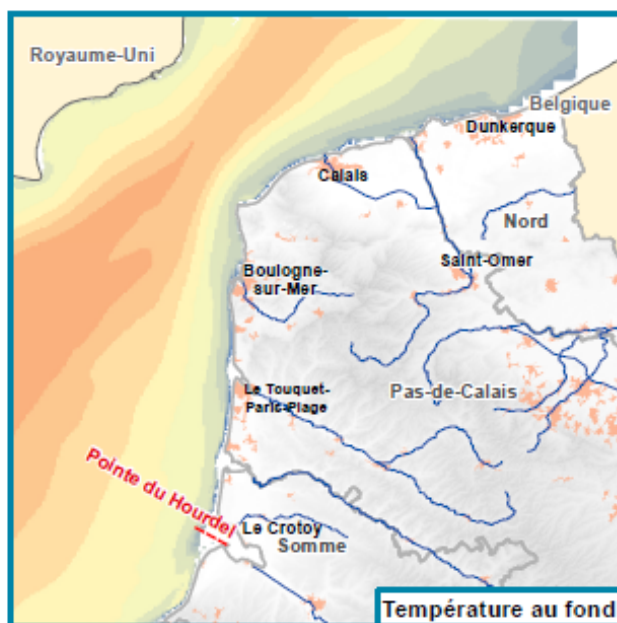
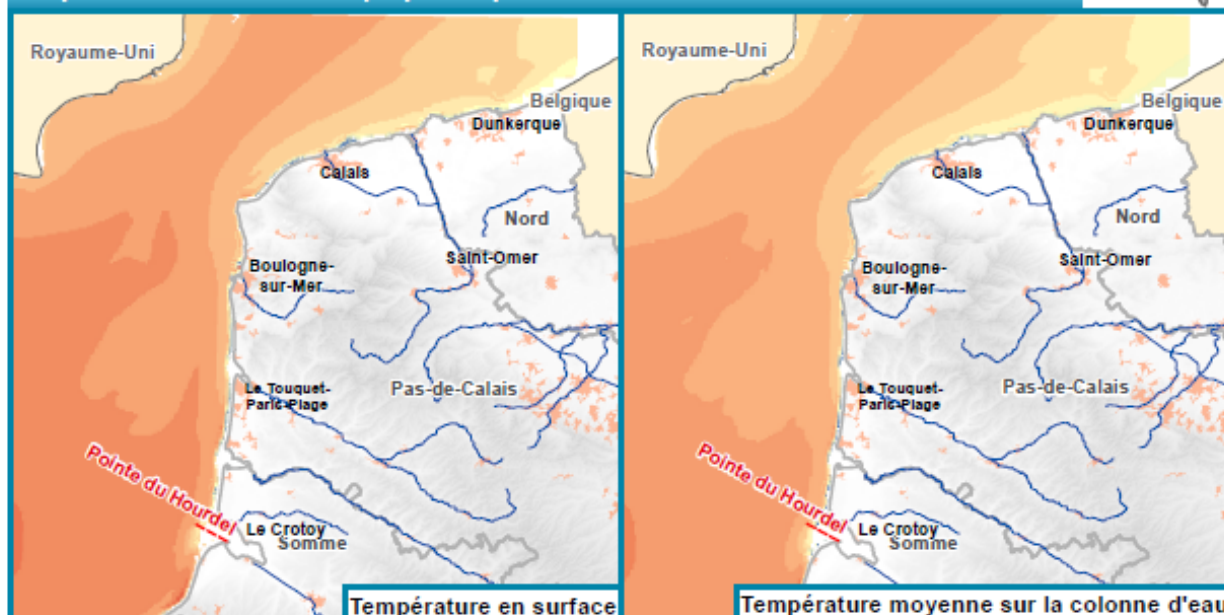
Des mesures effectuées dans la baie de la Canche en 2008 et 2009 ont démontré que la température et la salinité des eaux sont corrélables (9.4.6 Annexe 3.6).

Dynamiques et évolution du littoral

Synthèse des connaissances de la frontière belge à la pointe du Hourdel



Température de l'eau - Chronique pour la période 2010 - 2015



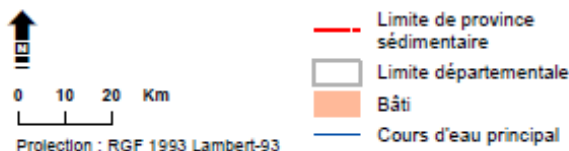
Cette chronique a été établie en 2015, dans le cadre du projet EMODnet Seabed Habitats, à partir de la base de données hydrodynamique réalisée avec le modèle MARS3D et la librairie AGRIF (V10.10 - <http://www-ik.imag.fr/MOISE/AGRIF/>) le long des façades Atlantique, Manche et mer du Nord. Cette base de données est maintenue et mise à jour par l'unité de recherche DYNECO de l'Ifremer.

Une simulation de six années allant de 2010 à 2015 a été réalisée pour l'ensemble des emprises couvrant ces façades françaises. Les caractéristiques de simulation sont les suivantes :

- Résolution spatiale horizontale : 500 m
- Résolution spatiale verticale : 40 niveaux (Sigma généralisés)
- Résolution temporelle : 1 heure

La chronique représentée ici a été calculée à partir des résultats de cette simulation. La variable prise en compte est la température ; les valeurs sont exprimées en °C. La moyenne a été calculée à partir de chaque valeur de la période 2010-2015 pour la surface, la moyenne verticale et le fond.

Moyenne 2010 - 2015 - En °C	11.8 - 11.9
11 - 11.1	11.9 - 12
11.1 - 11.2	12 - 12.1
11.2 - 11.3	12.1 - 12.2
11.3 - 11.4	12.2 - 12.3
11.4 - 11.5	12.3 - 12.4
11.5 - 11.6	12.4 - 12.5
11.6 - 11.7	12.5 - 12.6
11.7 - 11.8	12.6 - 12.7
	12.7 - 12.8



Pour en savoir plus : www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr

Source - Copyrights :
 Rejeu hydrodynamique - IFREMER-DYNECO
 Province sédimentaire - Cerema & MEEM
 Pays limitrophes - EEA

GEOFLA® - ©IGN Paris Reproduction interdite
 Occupation du sol - Corine Land Cover 2012
 Cours d'eau - BD Carthage
 BD Alti® - ©IGN Paris Reproduction interdite



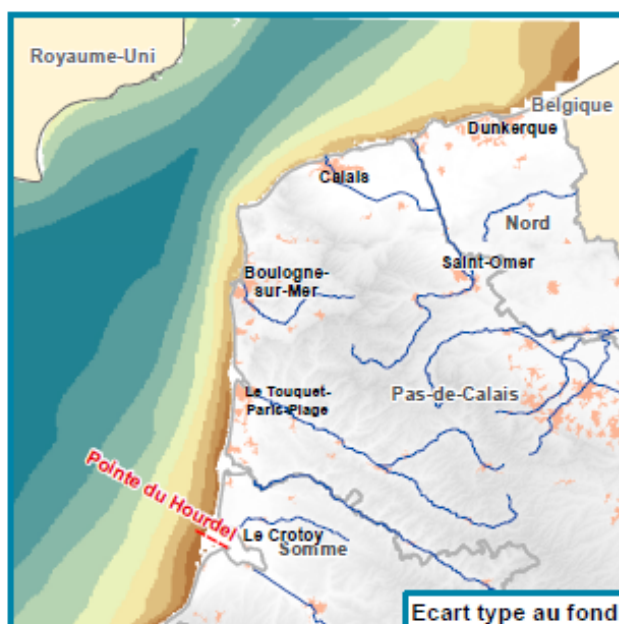
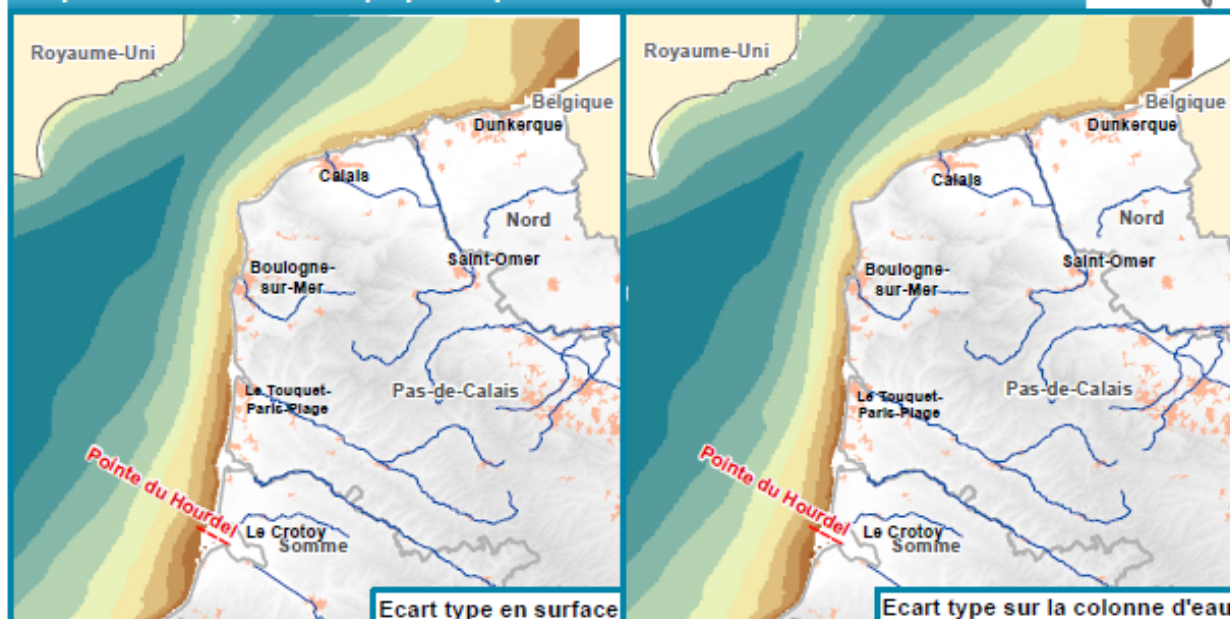
Figure 3.4 : Température moyenne de l'eau de la province sur la période 2010-2015

Dynamiques et évolution du littoral

Synthèse des connaissances de la frontière belge à la pointe du Hourdel



Température de l'eau - Chronique pour la période 2010 - 2015

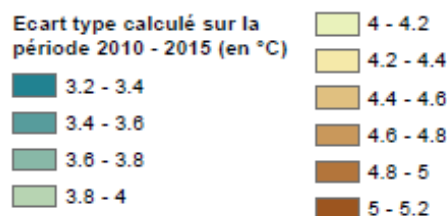


Cette chronique a été établie en 2015, dans le cadre du projet EMODnet Seabed Habitats, à partir de la base de données hydrodynamique réalisée avec le modèle MARS3D et la librairie AGRIF (V10.10 - <http://www.jk.imag.fr/MOISE/AGRIF/>) le long des façades Atlantique, Manche et mer du Nord. Cette base de données est maintenue et mise à jour par l'unité de recherche DYNECO de l'Ifremer.

Une simulation de six années allant de 2010 à 2015 a été réalisée pour l'ensemble des emprises couvrant ces façades françaises. Les caractéristiques de simulation sont les suivantes :

- Résolution spatiale horizontale : 500 m
- Résolution spatiale verticale : 40 niveaux (Sigma généralisés)
- Résolution temporelle : 1 heure

La chronique représentée ici a été calculée à partir des résultats de cette simulation. La variable prise en compte est la température ; les valeurs sont exprimées en °C. La moyenne a été calculée à partir de chaque valeur de la période 2010-2015 pour la surface, la moyenne verticale et le fond.



Pour en savoir plus : www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr

Source - Copyrights :
 Rejeu hydrodynamique - IFREMER-DYNECO
 Province sédimentaire - Cerema & MEEM
 Pays limitrophes - EEA

GEOFLAB® - ©IGN Paris Reproduction interdite
 Occupation du sol - Corine Land Cover 2012
 Cours d'eau - BD Carthage
 BD Alti® - ©IGN Paris Reproduction interdite



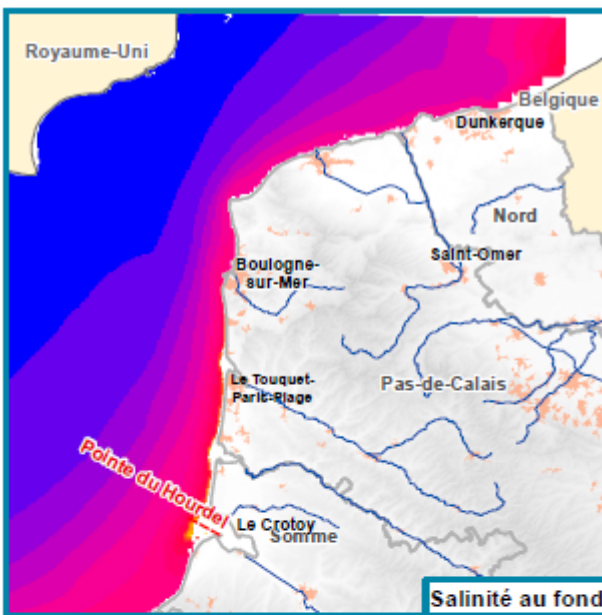
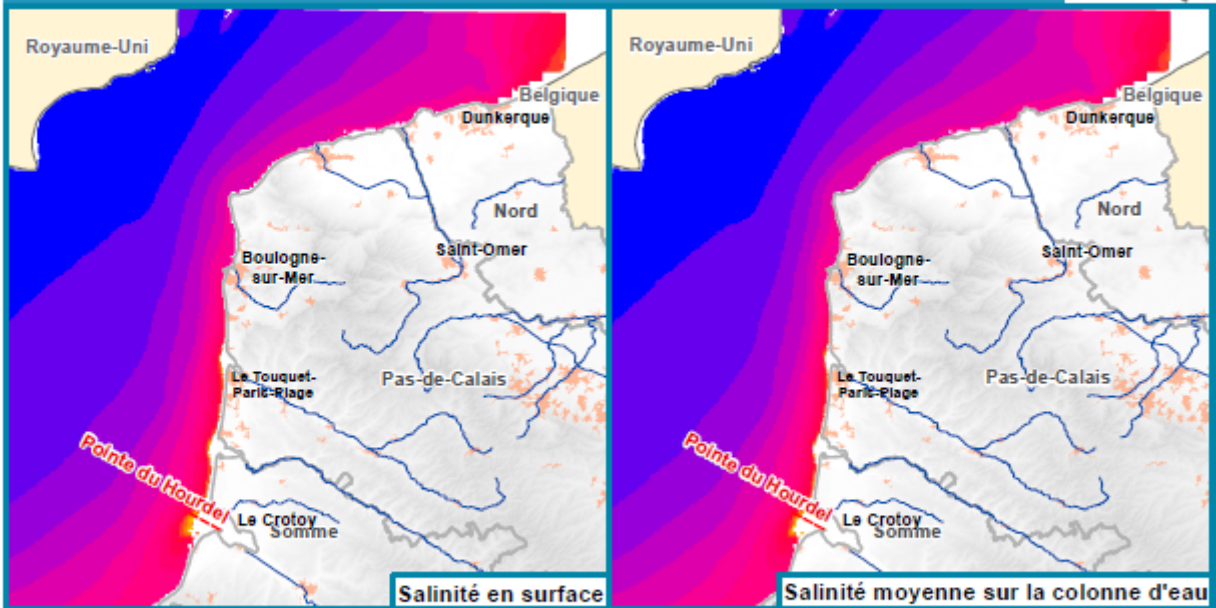
Figure 3.5 : Écart type de la température de l'eau de la province sur la période 2010-2015

Dynamiques et évolution du littoral

Synthèse des connaissances de la frontière belge à la pointe du Hourdel



Salinité de l'eau - Chronique pour la période 2010 - 2015

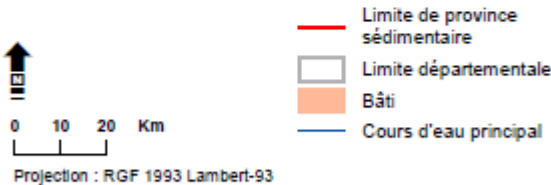
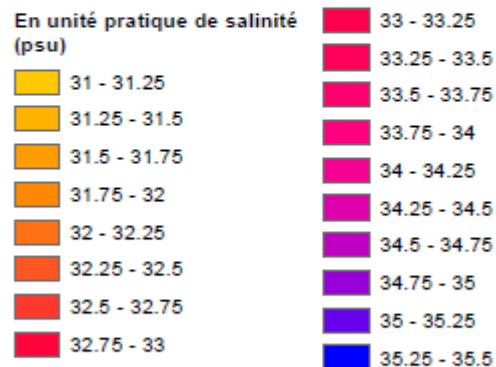


Cette chronique a été établie en 2015, dans le cadre du projet EMODnet Seabed Habitats, à partir de la base de données hydrodynamique réalisée avec le modèle MARS3D et la librairie AGRIF (V10.10 - <http://www.jk.imag.fr/MOISE/AGRIF/>) le long des façades Atlantique, Manche et mer du Nord. Cette base de données est maintenue et mise à jour par l'unité de recherche DYNECO de Ifremer.

Une simulation de six années allant de 2010 à 2015 a été réalisée pour l'ensemble des emprises couvrant ces façades françaises. Les caractéristiques de simulation sont les suivantes :

- Résolution spatiale horizontale : 500 m
- Résolution spatiale verticale : 40 niveaux (Sigma généralisés)
- Résolution temporelle : 1 heure

La chronique représentée ici a été calculée à partir des résultats de cette simulation. La variable prise en compte est la salinité. Les valeurs sont exprimées en unités pratiques de salinité (psu). La moyenne a été calculée à partir de chaque valeur de la période 2010-2015 pour la surface, la moyenne verticale et le fond.



Pour en savoir plus : www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr

Source - Copyrights :
Rejeu hydrodynamique - IFREMER-DYNECO
Province sédimentaire - Cerema & MEEM
Pays limitrophes - EEA

GEOFLA® - ©IGN Paris Reproduction interdite
Occupation du sol - Corine Land Cover 2012
Cours d'eau - BD Carthage
BD Alti® - ©IGN Paris Reproduction interdite



Figure 3.6 : Salinité moyenne de l'eau de la province sur la période 2010-2015

Dynamiques et évolution du littoral

Synthèse des connaissances de la frontière belge à la pointe du Hourdel



Salinité de l'eau - Chronique pour la période 2010 - 2015

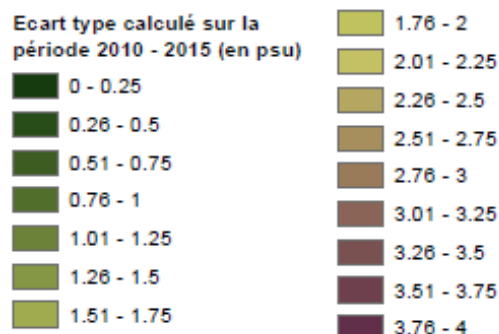


Cette chronique a été établie en 2015, dans le cadre du projet EMOcNet Seabed Habitats, à partir de la base de données hydrodynamique réalisée avec le modèle MARS3D et la librairie AGRIF (V10.10 - <http://www-ijik.imag.fr/MOISE/AGRIF/>) le long des façades Atlantique, Manche et mer du Nord. Cette base de données est maintenue et mise à jour par l'unité de recherche DYNECO de l'Ifremer.

Une simulation de six années allant de 2010 à 2015 a été réalisée pour l'ensemble des emprises couvrant ces façades françaises. Les caractéristiques de simulation sont les suivantes :

- Résolution spatiale horizontale : 500 m
- Résolution spatiale verticale : 40 niveaux (Sigma généralisés)
- Résolution temporelle : 1 heure

La chronique représentée ici a été calculée à partir des résultats de cette simulation. La variable prise en compte est la salinité. Les valeurs sont exprimées en unités pratiques de salinité (psu). La moyenne a été calculée à partir de chaque valeur de la période 2010-2015 pour la surface, la moyenne verticale et le fond.



Pour en savoir plus : www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr

Source - Copyrights :
 Rejeu hydrodynamique - IFREMER-DYNECO
 Province sédimentaire - Cerema & MEEM
 Pays limitrophes - EEA

GEOFLAB® - ©IGN Paris Reproduction interdite
 Occupation du sol - Corine Land Cover 2012
 Cours d'eau - BD Carthage
 BD Alti® - ©IGN Paris Reproduction interdite



Figure 3.7 : Écart type de la salinité de l'eau de la province sur la période 2010-2015

3.2 Facteurs océanographiques

3.2.1 Niveau marin

Le niveau marin est composé du niveau moyen, de la marée astronomique et d'une résultante appelée surcote ou décote qui prend en compte les effets atmosphériques et la combinaison d'autres ondes (vagues, seiches, tsunamis, etc.). Ces différentes composantes sont présentées dans la Gestion du trait de côte (MEEDDM, 2010) et la fiche technique nationale consacrée au niveau marin.

La province entre la baie de Somme et la frontière belge est couverte par trois marégraphes permanents du réseau RONIM (Réseau d'observation du niveau de la mer) du Shom installés dans les ports dits « de référence » de Boulogne-sur-Mer, Calais et Dunkerque (Figure 3.8, Tableau 3.7 et 9.4.7 Annexe 3.7). Ces données sont diffusées par le Shom dans le cadre de REFMAR (Réseaux de référence des observations marégraphiques) au titre de son rôle de référent national d'observation du niveau marin in situ. Des informations complémentaires sur ces observations marégraphiques sont disponibles sur le site refmar.shom.fr ; les observations sont accessibles en visualisation et téléchargement sur le site data.shom.fr.

En complément de ces données numériques, des données historiques (non numérisées à ce jour) sont disponibles pour ces trois ports ainsi qu'à Merville et au Touquet. Un inventaire non exhaustif de ces données historiques est disponible sur refmar.shom.fr (Tableau 3.8 et 9.4.8 Annexe 3.8). L'exhaustivité de cet inventaire ne peut être garantie car des données peuvent être dispersées dans des archives locales et doivent faire l'objet de recherches spécifiques. En mars 2017, une thèse initiée par le Shom en collaboration avec l'ULCO vise à rendre disponibles l'ensemble des données marégraphiques historiques dans la région de Dunkerque.

Le suivi à long terme des évolutions du niveau moyen à la côte est assuré en France par SONEP (Système d'observation du niveau des eaux littorales – www.sonep.org), regroupant le CNRS, l'IGN, l'Université de La Rochelle et le Shom. SONEP exploite l'ensemble des niveaux moyens observés par les marégraphes du réseau REFMAR, permettant notamment l'étude de l'évolution à long terme du niveau de la mer. À ce titre, SONEP est amené à corriger, lorsque possible, les observations marégraphiques des mouvements verticaux qui seraient liés par exemple à l'enfoncement d'un quai.

Tableau 3.7 : Observations pérennes du niveau marin disponibles sur la province (Source : Shom)

Port d'implantation	Producteur et/ou gestionnaire	Réseau	Date de mise en service
Boulogne-sur-Mer	Shom, Région Nord-Pas-de-Calais et Port de Boulogne-sur-Mer	RONIM	12/2000
Calais	Shom, Région Nord-Pas-de-Calais et Port de Calais	RONIM	10/1998
Dunkerque	Shom et Grand port maritime de Dunkerque	RONIM	09/1996

Tableau 3.8 : Inventaire non exhaustif des données marégraphiques historiques sur la province (Source : Refmar).

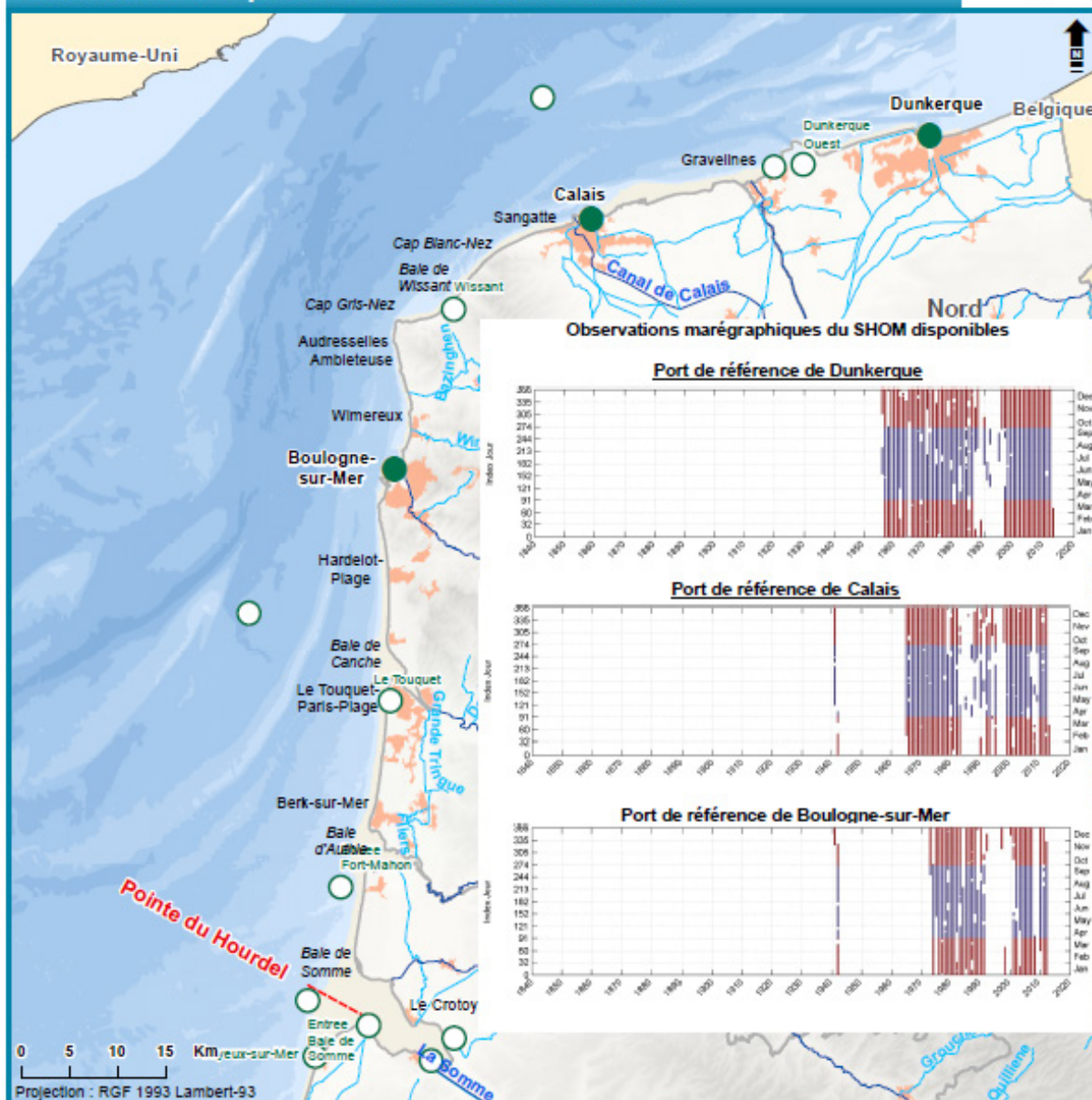
Site d'observation	Année initiale	Année finale	Durée totale (ans)	Nombre d'années effectives	Nombre de jeux de mesure
Le Touquet	1878	1878	1	1	1
Boulogne-sur-Mer	1835	1936	102	9	11
Calais	1836	1940	105	22	4
Merville	1834	1834	1	1	1
Dunkerque	1701	1985	285	52	13

Dynamiques et évolution du littoral

Synthèse des connaissances de la frontière belge à la pointe du Hourdel



Localisation des ports de référence et secondaires



- Limite de province sédimentaire
- Cours d'eau principal
- Cours d'eau secondaire
- Bâti
- Limite départementale
- Port de référence
- Port secondaire

Pour en savoir plus : www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr

Source - Copyrights :
 Province sédimentaire - Cerema & MEEM
 Ports de référence et secondaires - SHOM
 Bathymétrie de métropole - Ifremer
 Cours d'eau - BD Carthage

Pays limitrophes - EEA
 GEOFLA® - ©IGN Paris - Reproduction interdite
 Occupation du sol - Corine Land Cover 2012
 BD Alti® - ©IGN Paris - Reproduction interdite



Figure 3.8 : Ports de référence et points d'observation secondaires sur la province

3.2.1.a. Niveau moyen

Le « niveau moyen instantané » (ou surcote instantanée) s'obtient en retranchant à la hauteur observée à un instant donné la contribution astronomique de la marée calculée au même instant. La valeur moyenne de cette quantité constitue le niveau moyen. Elle peut se faire sur 24 heures (niveau moyen journalier), sur un mois (niveau moyen mensuel) ou sur toute autre période. Le niveau moyen annuel est généralement calculé si 11 mois d'observation sont disponibles.

Le niveau moyen de la mer est connu aux ports ayant fait l'objet d'observations marégraphiques suffisamment longues (Tableau 3.9). Ces ports, et les valeurs de niveaux moyens associées, sont décrits dans l'ouvrage « Références altimétriques maritimes » (RAM) édité par le Shom et disponible sur le site <http://diffusion.shom.fr>. Sur certains sites REFMAR, SONEL indique une vitesse d'évolution moyenne du niveau de la mer en mm/an. Cette information nécessite de disposer d'observations suffisamment longues et d'avoir pu déterminer les mouvements verticaux susceptibles d'influer sur la tendance observée (par exemple un marégraphe situé sur un sol en subsidence). Ce dernier

paramètre se mesure par des GPS installés de façon permanente auprès des marégraphes. Seul l'observatoire de Dunkerque est équipé depuis 2013 d'une station GPS permanente, ce qui ne permet pas en 2017 de calculer une vitesse fiable d'évolution du niveau moyen (exemple à Dunkerque, Figure 3.9).

Au-delà de cette connaissance ponctuelle du niveau moyen, le projet BATHYELLI a modélisé cette information sous forme de surface de référence verticale. Cette modélisation inclut notamment les observations marégraphiques et celles issues de l'altimétrie spatiale, ainsi que des campagnes hydrographiques spécifiques ayant permis la réalisation des surfaces. BATHYELLI met à disposition des surfaces de compensation référencées à l'ellipsoïde de plusieurs niveaux de référence (Figure 3.10) : zéro hydrographique, niveau moyen, plus basses mers astronomiques (PBMA) et plus hautes mers astronomiques (PHMA). En 2017, les surfaces BATHYELLI s'arrêtent à l'ouest de Dunkerque, du fait de l'absence de données d'altimétrie spatiale au moment de la conception. Cette limitation sera probablement corrigée dans les prochaines éditions.

Tableau 3.9 : Altitude du niveau moyen et du zéro hydrographique en mètre au niveau des ports de référence de la province (Source : Shom)

Port	Zéro hydrographique en NGF (IGN 69)	Niveau moyen	
		En cote marine	En NGF (IGN 69)
Boulogne-sur-Mer	-4,384	4,91	0,53
Calais	-3,455	4,03	0,58
Dunkerque	-2,693	3,24	0,55

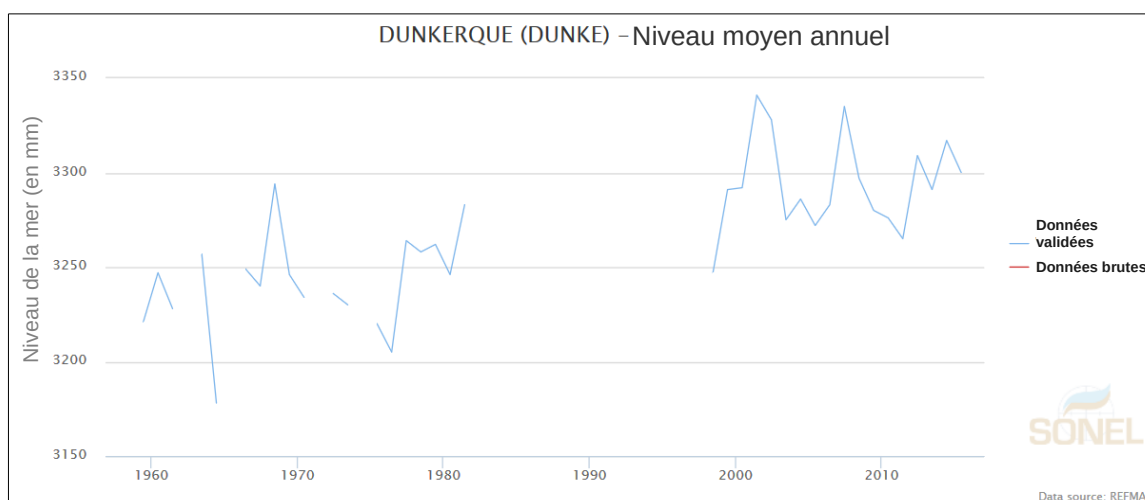


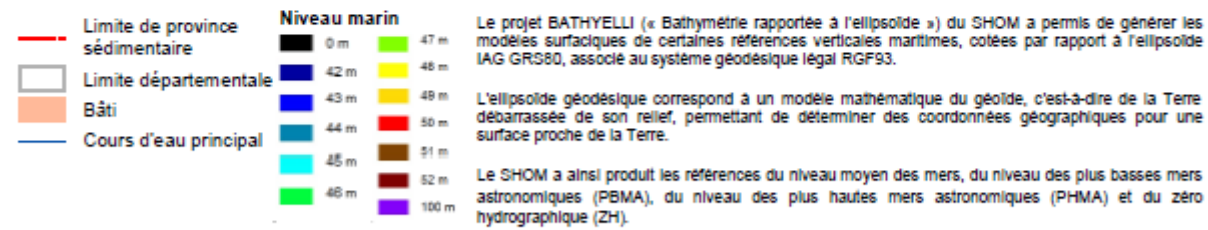
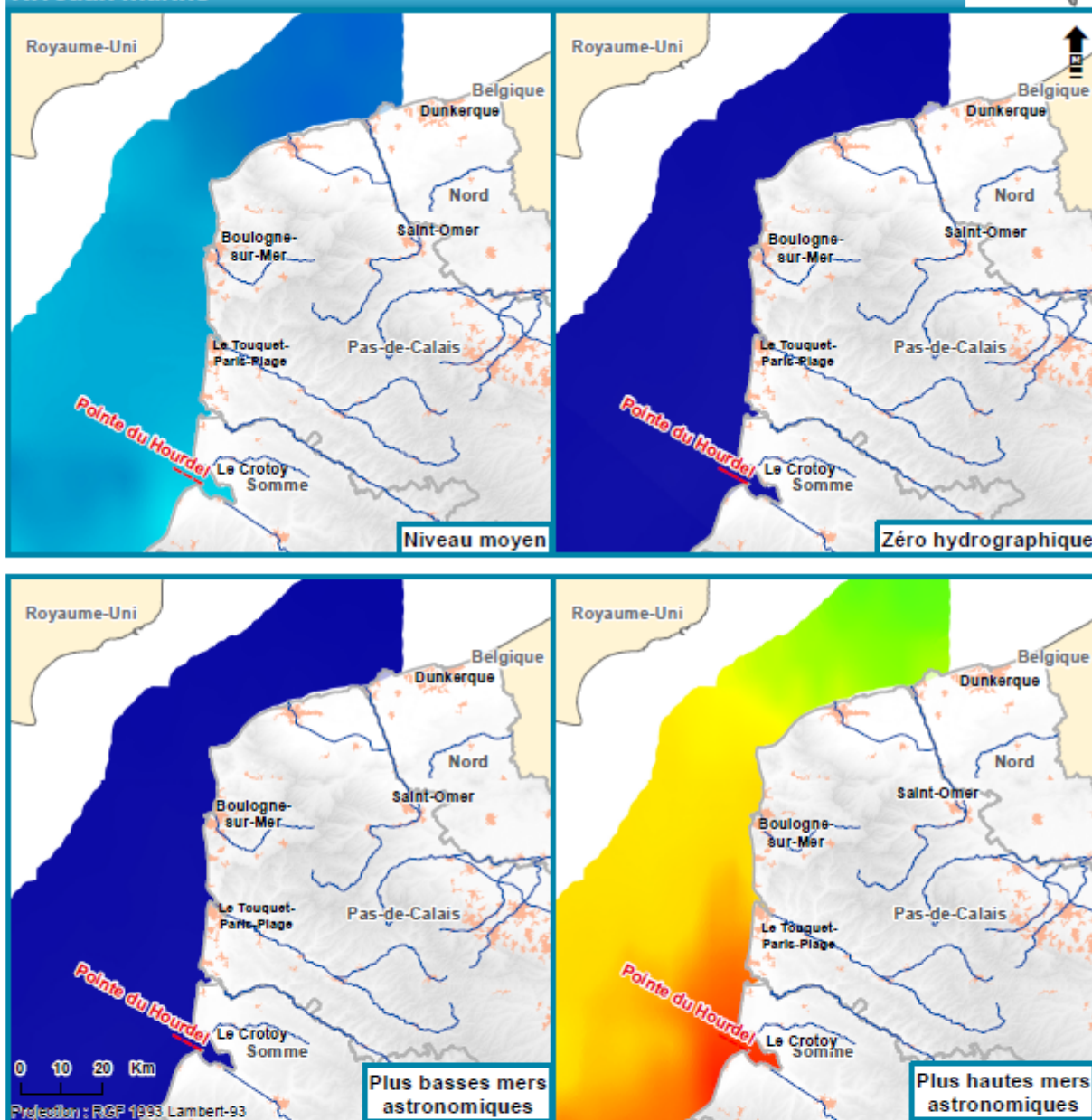
Figure 3.9 : Exemple d'évolution du niveau moyen annuel à Dunkerque (Source : SONEL, REFMAR)

Dynamiques et évolution du littoral

Synthèse des connaissances de la frontière belge à la pointe du Hourdel



Niveaux marins



Pour en savoir plus : www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr

Source - Copyrights :
 Province sédimentaire - Cerema & MEEM
 Niveau marin moyen, zéro hydrographique, plus basses mers astronomiques, plus hautes mers astronomiques - SHOM

Pays limitrophes - EEA
 GEOFLA® - ©IGN Paris - Reproduction interdite
 Occupation du sol - Corine Land Cover 2012
 Cours d'eau - BD Carthage
 BD Alti® - ©IGN Paris - Reproduction interdite



Figure 3.10 : Altimétrie des niveaux de référence : niveau moyen, zéro hydrographique et plus basses et plus hautes mers astronomiques sur la province (Source : Shom / projet BATHYELLI).

3.2.1.b. Marée astronomique

Marnage et évolution de l'onde de marée

La marée de la zone Manche – mer du Nord est de type essentiellement semi-diurne, avec deux pleines mers et deux basses mers se succédant avec un intervalle moyen de 6 heures 13 minutes (Figure 3.11). Néanmoins, l'onde de la marée présente souvent de petites inégalités diurnes qui se manifestent par des différences de hauteur (0,1 à 0,2 m), aux pleines mers ou aux basses mers d'une même journée et une dissymétrie se traduisant par un montant plus court que le perdant surtout en fort

coefficient. Des prédictions de marée sont diffusées par le Shom pour certains ports de la province (9.4.9 Annexe 3.9).

La caractéristique essentielle du littoral de la province est l'amplitude des marées : le marnage diminue du sud vers le nord mais reste partout élevé (Figures 3.12 et 3.13). En vive-eau exceptionnelle, il atteint 10 m dans l'estuaire de l'Authie contre seulement 6 m près de la frontière belge. Cela crée un espace intertidal de plusieurs centaines de mètres, par exemple de 800 m au droit de Merlimont et de 1 500 m à l'est de Calais.

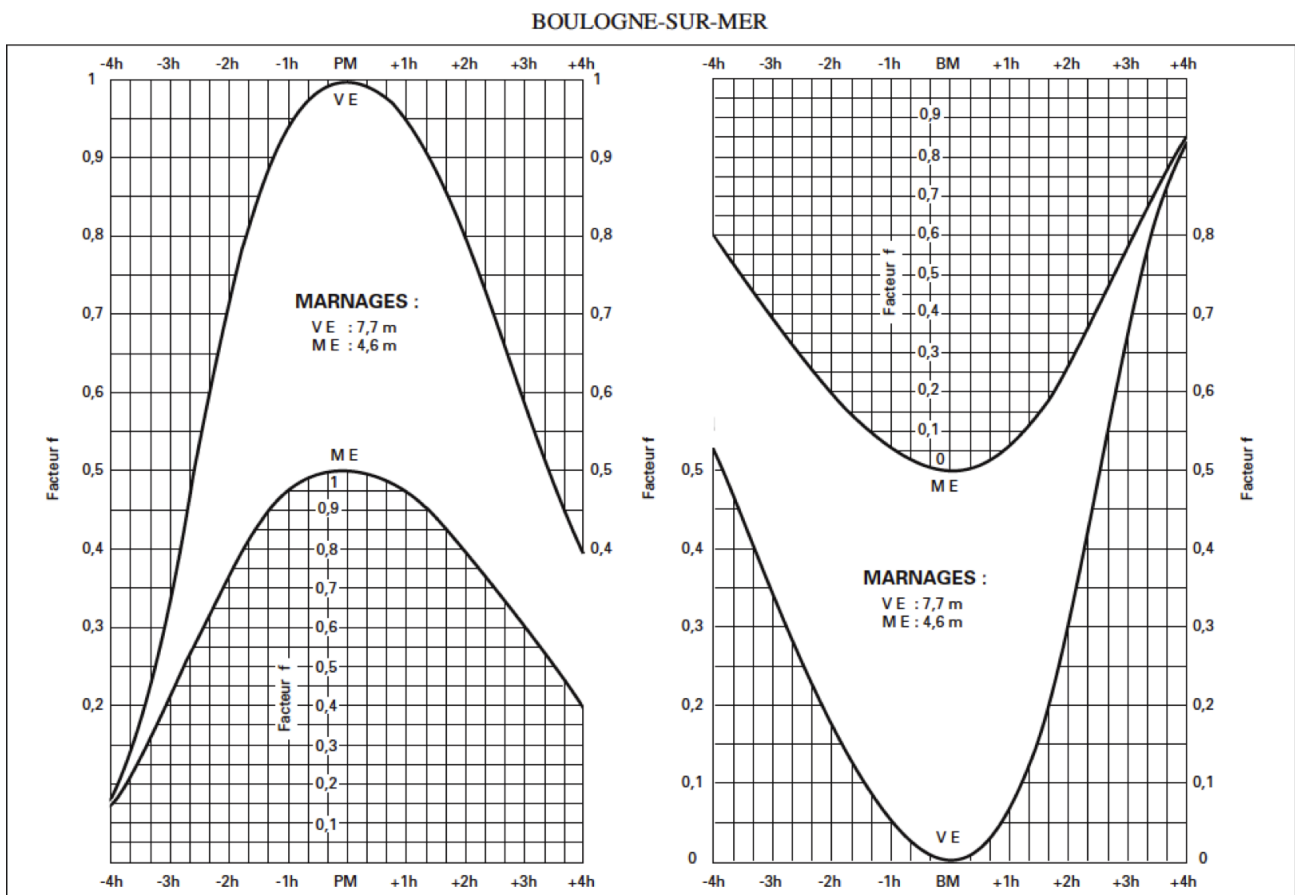


Figure 3.11 : Courbe type de marnage pour une marée semi-diurne, exemple de Boulogne-sur-Mer (Annuaire des marées, tome 1, Shom, 2016)

Dynamiques et évolution du littoral

Synthèse des connaissances de la frontière belge à la pointe du Hourdel

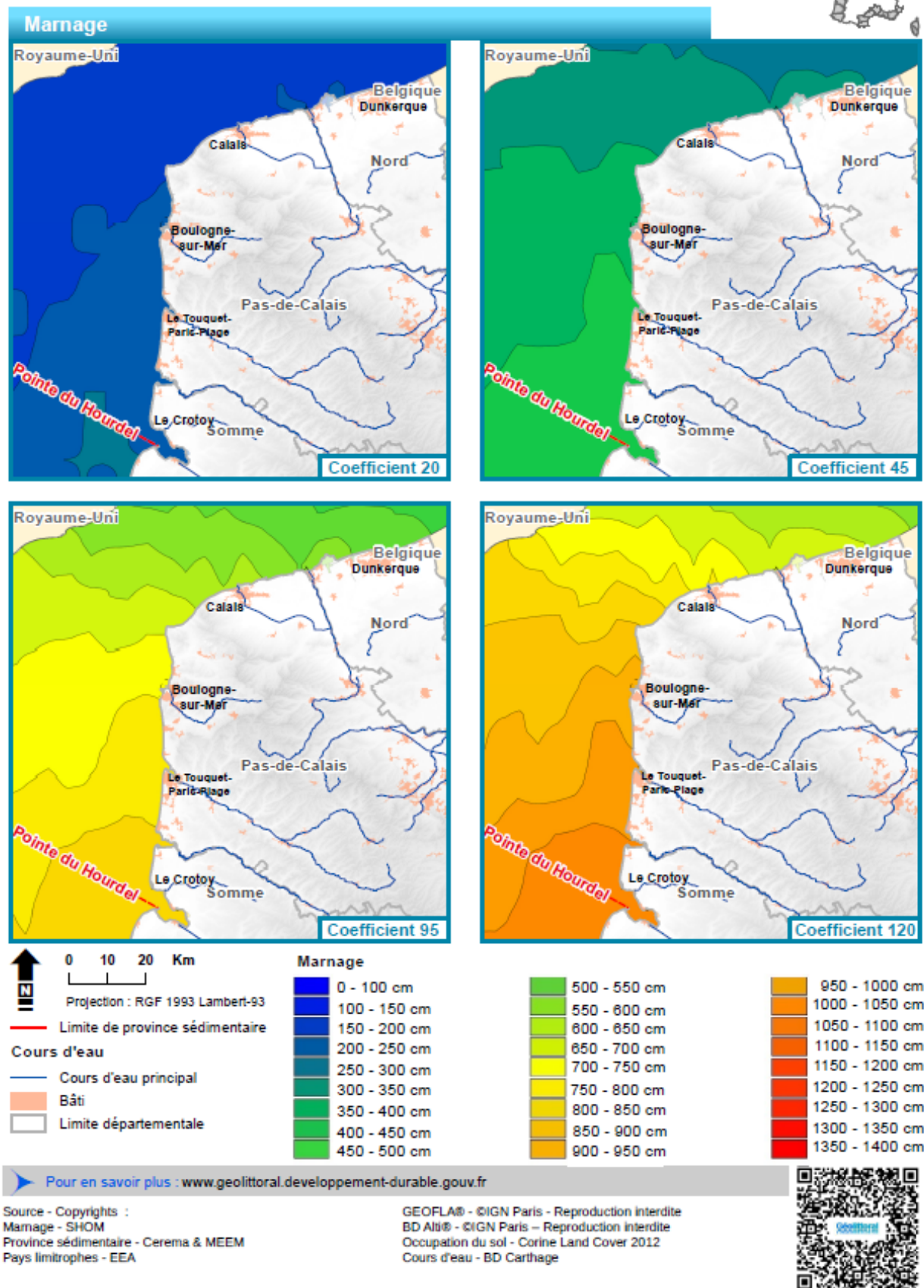


Figure 3.12 : Marnage pour les coefficients 20, 45, 95 et 120 sur la province

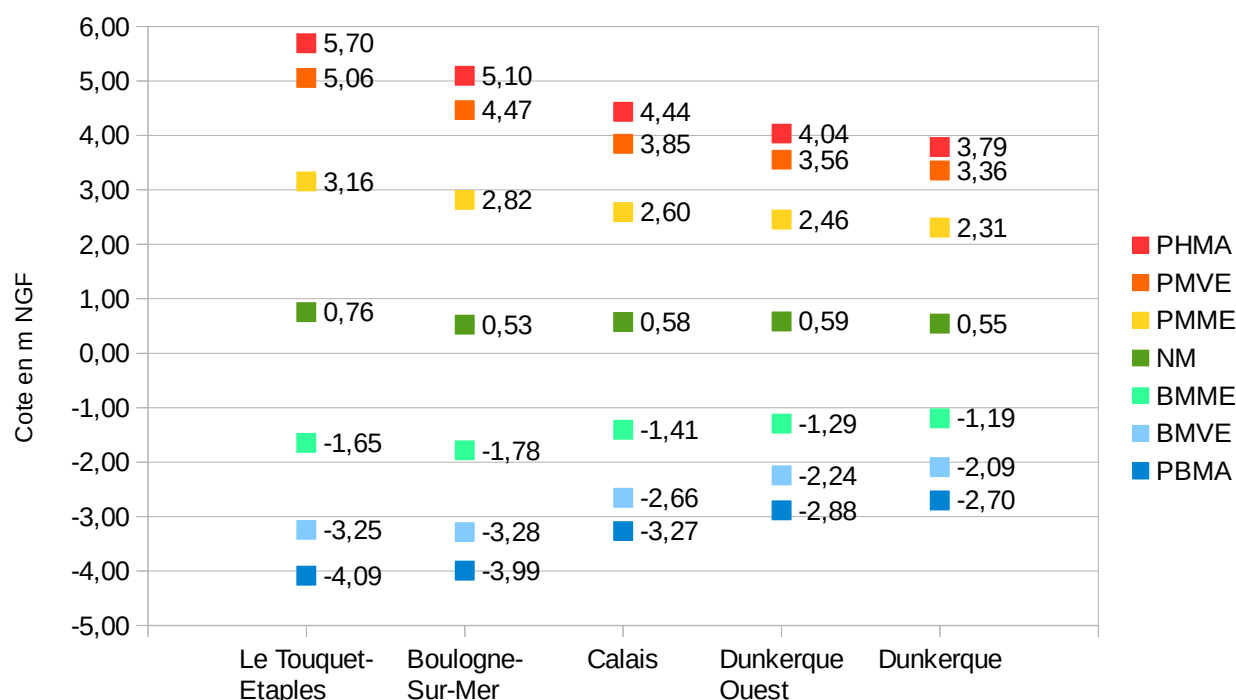


Figure 3.13 : Altitude de différents niveaux marins en mètre NGF (IGN 69) au niveau des ports de référence et secondaires de la province ; plus basses mers astronomiques (PBMA), de vives-eaux (BMVE) et de mortes-eaux (BMME), niveau moyen (NM) et plus hautes mers de mortes-eaux (PMME), de vives-eaux (PMVE) et astronomiques (PHMA) (Source : Shom)

Les marées de la Manche

L'onde de marée venue de l'Atlantique arrive en mer Celtique et se propage en direction du nord-est (Figure 3.14). Elle pénètre dans la Manche sous forme d'une onde progressive dérivée. Elle s'y combine avec une onde stationnaire de moindre importance liée au fait que la Manche forme un bassin de résonance, orienté sensiblement ouest-est, dont la paroi orientale se confond avec la côte française située au sud du Pas-de-Calais. La combinaison des ondes stationnaire et progressive, leur renforcement sous l'effet de la surélévation des fonds et de la configuration des côtes et les phénomènes de remplissage et de vidage des baies particularisent les marées de la Manche.

Le marnage est mégatidal (supérieur à 8 m) sur la façade Manche de la province. En baie de Somme, le marnage maximum est de près de 11 m : il a atteint 10,54 m en 2015, pour un coefficient de marée de 119 (Annuaire des marées, Shom, 2016).

Les marées de la mer du Nord

Aux abords du Pas de Calais, la marée résulte de la combinaison de l'ondulation issue de la Manche avec celle de la mer du Nord qui a pour origine la marée de l'Atlantique ayant contourné l'Écosse. Le régime des marées dans la partie sud de la mer du Nord est caractérisé par la présence d'un point amphidromique¹⁴ situé entre Lowerstoft (Grande-Bretagne) et Haarlem (Pays-Bas) à environ 60 miles nautiques au large de la Hollande, autour duquel l'onde de marée tourne dans le sens inverse des aiguilles d'une montre (Figure 3.14).

Le marnage macrotidal décroît d'ouest en est, de 6,2 m à Calais à 4,5 m à Oostende (Belgique) (Figure 3.12).

14 Point autour duquel se propagent les crêtes des ondes de marée et où l'amplitude est nulle.

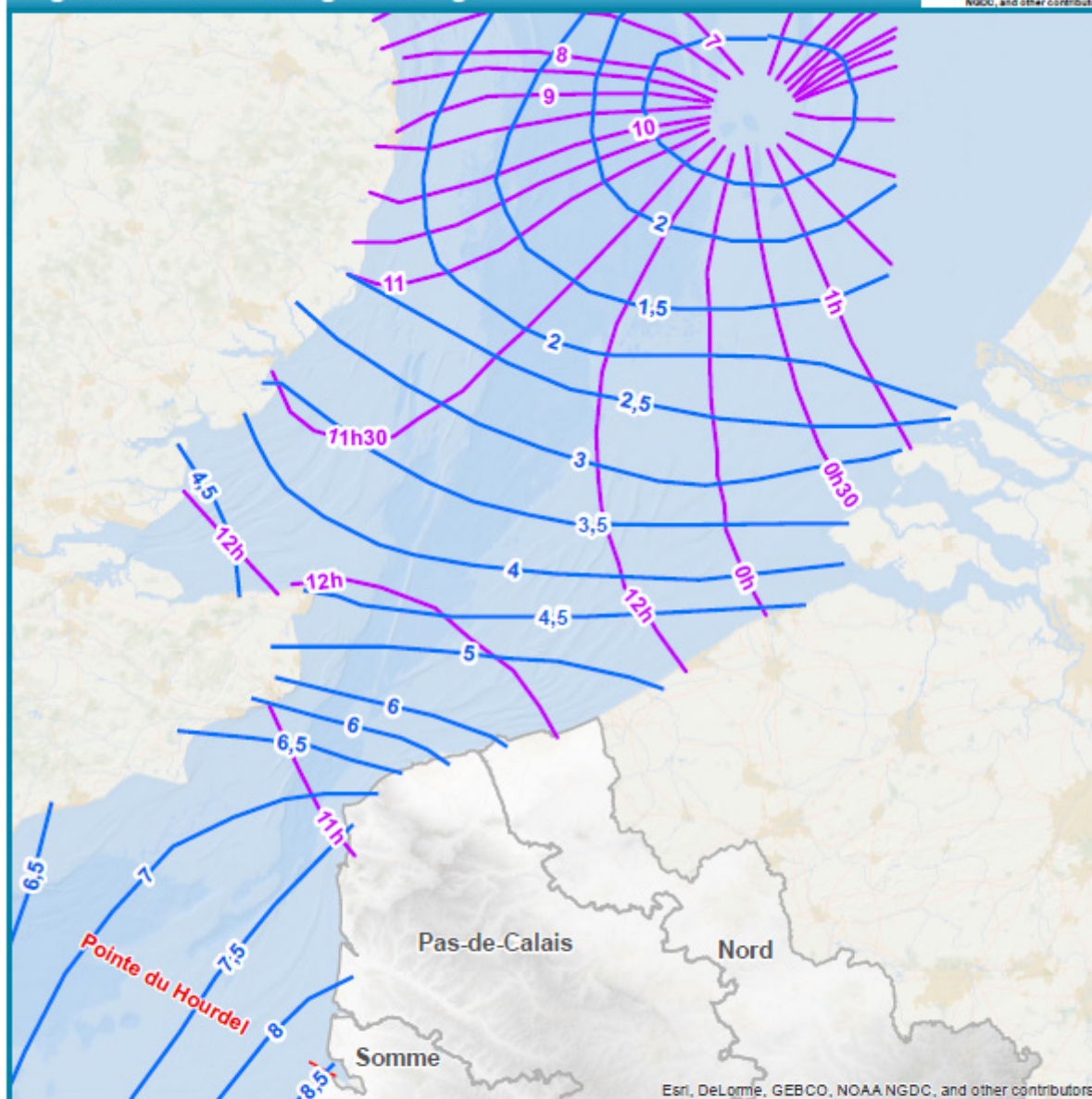
Dynamiques et évolution du littoral

Synthèse des connaissances de la frontière belge à la pointe du Hourdel



Esri, DeLorme, GEBCO, NOAA, NGDC, and other contributors

Lignes cotidiales et d'égal marnage



- Limite de province sédimentaire
- Limite départementale
- Ligne d'égal marnage
- Ligne cotidiale

Le long des **lignes cotidiales** est inscrit l'intervalle lunaire moyen de la pleine mer correspondant à la valeur moyenne de l'intervalle de temps qui s'écoule entre le passage de la lune au méridien de Greenwich et la pleine mer qui suit immédiatement ce passage.

Le long des **lignes d'égal marnage** est inscrit le marnage en vive-eau moyenne.

Pour en savoir plus : www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr

Source - Copyrights :
Province sédimentaire - Cerema & MEEM
Lignes cotidiales - SHOM
Lignes d'égal marnage - SHOM

GEOFLA® - ©IGN Paris - Reproduction interdite
BD ALti® - ©IGN Paris - Reproduction interdite



Figure 3.14 : Onde de marée, ligne cotidiales et d'égal marnage

3.2.1.c. Surcote / décote

La notion de « surcote/décote » désigne la différence entre le niveau marin observé et le niveau marin qui existerait en présence de la marée astronomique seule. Lorsque cette différence est positive, c'est une surcote ; lorsqu'elle est négative, une décote. Une surcote/décote a principalement une origine météorologique : elle est générée lors du passage d'une dépression ou d'un anticyclone. Elle peut également avoir d'autres origines : vagues, seiches, tsunamis... Le Shom met à disposition du public sur le site data.shom.fr ses prévisions de surcotes modélisées dans le cadre de la vigilance vagues-submersion avec Météo-France (résultat du projet HOMONIM).

Il existe deux types de surcote :

- la surcote instantanée, définie comme étant la différence à un instant donné entre le niveau d'eau observé sans l'action des vagues (mesure marégraphique dans un puits de tranquillisation) et le niveau d'eau prédit (la marée),
- et la surcote de pleine mer, correspondant à la différence entre le niveau d'eau maximum observé au voisinage de la pleine mer et le niveau de pleine mer prédit (qui peut ne pas se produire au même moment) ; ce type de surcote est utilisé pour l'évaluation des surcotes et niveaux extrêmes.

L'estimation de la surcote peut varier d'une étude à l'autre. Les surcotes peuvent en effet être calculées à partir d'observations hautes fréquences ou horaires (filtrage des hautes fréquences) et de données brutes ou validées. Une méthode différente de prise en compte de l'eustatisme ou une réactualisation des harmoniques de marée peut ainsi conduire à de petites différences sur l'estimation des surcotes. Par ailleurs, du fait d'une possible dépendance entre marée et surcote, les plus fortes valeurs de surcotes instantanées peuvent se produire préférentiellement à la basse mer. Pour les forts marnages, un déphasage entre les niveaux prédits et les niveaux observés peut aussi induire une surestimation de la surcote instantanée. Ces deux derniers points justifient l'intérêt de la notion de « surcote de pleine mer ». En règle générale, pour les territoires macrotidaux, les surcotes de pleine mer seront préférentiellement évaluées à partir de données validées horaires afin de s'affranchir des effets locaux.

Tableau 3.10 : Surcotes instantanées survenues sur le littoral de la province entre 1949 et 2013 (d'après les données recensées dans le tableau 3.3 et shom.fr, 2015)

Date	Lieu de l'observation	Surcote instantanée maximale	Coef. marée	Dégâts observés / vents / nom de la tempête
01-02/03/1949	Dunkerque	1,45 m	85 et 87	2 brèches
15 et 17/03/1949	Digue Tixier	nc	111 et 117	Brèches et inondations
31/01/1953	(digue des Alliés)	2,40 m	82 et 83	2 brèches de 75 m chacune / surcote record
29/11/1974	Calais	2,23 m	83	-
02-04/01/1976	Dunkerque	2,18 m	90 et 91	Tempête Capella / vents ouest-sud-ouest à 144 km/h
11-12/01/1978	Dunkerque Calais	1,13 m	109 et 107	Submersions et recul de la dune à l'est de Dunkerque de 5 m / vents ouest-sud-ouest et nord à 137 km/h
01-02/02/1983	Dunkerque	2,01 m	97	Recul dunaire de 8 m
24-25/11/1984	Dieppe	1,30 m	102	Rupture de la digue sud de l'Authie et submersion de la digue Mercier au Crotoy
25/01/1990	Boulogne-sur-Mer Calais	2,06 m 1,24 m	69 69	Tempête Daria / vents à 150 km/h
01-02/01/1995	Dunkerque	1,15 m	97 et 103	Érosion de l'estran et des dunes / vents à 75 km/h
09/11/2007	Dunkerque	2,40 m	78	Tempête Tilo ; érosion des plages et du cordon dunaire sur les côtes, submersion de digues ; surcote record
06/12/2013	Dunkerque	2,24 m	101	Digue de Sangatte endommagée sur 40 m ; débordements de l'Aa à Gravelines ; perré endommagé entre Malo et Leffrinckoucke ; recul du trait de côte dans les secteurs dunaires sur le littoral de la mer du Nord / Tempête Xaver
	Calais	1,70 m	101	
	Boulogne-sur-Mer	1,00 m	101	

Surcotes instantanées

En Manche-Mer du Nord, les vents de nord à nord-ouest provoquent un apport d'eau en mer du Nord et entraînent une élévation du niveau de la mer dans sa partie méridionale. Lorsque ces vents soufflent en tempête et sont accompagnés d'une dépression barométrique importante traversant lentement la partie septentrionale de la mer du Nord, une onde de tempête se propage du nord au sud du bassin, provoquant une surélévation du niveau moyen. De nombreuses surcotes ont été recensées sur le littoral de la frontière belge à la pointe du Hourdel (Tableaux 3.3 et 3.10).

Les surcotes peuvent être générées par des seiches, qui sont des oscillations stationnaires dans un bassin fermé ou semi-fermé. Elles se manifestent par des oscillations de la hauteur d'eau, dont l'amplitude et la période varient selon la configuration du bassin. Dans les ports de référence de la province, les seiches maximales observées varient entre 40 cm à Calais et 80 cm à Dunkerque (Tableau 3.11). Une analyse fréquentielle a permis de déterminer des caractéristiques pour les seiches de Calais et Dunkerque (Tableau 3.12).

Surcotes de pleine mer

Dix événements marquants en termes de surcote de pleine mer ont été calculés aux marégraphes de référence du Shom sur le littoral de la frontière belge à la pointe du Hourdel et sélectionnés à partir des travaux de Kergadallan (2015) (Tableau 3.13). Les séries temporelles étant caractérisées par la présence de périodes d'interruption des mesures, il ne s'agit donc pas d'une liste exhaustive des dix événements les plus marquants sur la province.

Le tableau 3.13 montre que les surcotes de pleine mer sont peu décalées en temps par rapport au moment théorique de pleine mer (jusqu'à 28 minutes). La plus forte surcote de pleine mer observée sur la province a atteint la valeur de 1,37 m le 16 octobre 1987 à Boulogne-sur-Mer, alors que les plus faibles valeurs de surcote de pleine mer sont observées à Calais.

Tableau 3.11 : Amplitudes en mètres des oscillations haute-fréquence observées entre septembre 2011 et mai 2015 dans les ports de référence de la province (Source : Shom). L'amplitude correspond à la hauteur de crête à creux. Pour une estimation de la surélévation du niveau marin liée à la seiche, considérer la demi-amplitude.

Port	Amplitude moyenne des oscillations		Amplitude maximale observée
	Supérieures au 50 ^e centile	Supérieures au 95 ^e centile	
Boulogne-sur-Mer	0,09	0,21	0,60
Calais	0,14	0,27	0,40
Dunkerque	0,14	0,26	0,80

Tableau 3.12 : Caractéristiques fréquentielles des oscillations haute-fréquence observées entre septembre 2011 et mai 2015 dans les ports de référence de la province (Source : Shom). L'analyse en fréquence sur Boulogne-sur-Mer n'a pas permis d'identifier clairement de périodes propres au site.

Port	Période (en min)	Amplitude moyenne (en cm)	Amplitude maximale (en cm)
Calais	18-20	9	28
	9-10	4	10
	5-6	8	16
	3	6	13
	2	5	13
Dunkerque	22-26	11	69
	6-8	2	7
	3-4	1	5
	2-3	1	9

Tableau 3.13 : Principaux événements de tempêtes relevés sur les périodes d'observation aux ports de Boulogne-sur-Mer, Calais et Dunkerque : surcote de pleine mer (Surcote PM) en mètre et décalage en temps (Décalage/PM) en minute par rapport à la marée de pleine mer (Kergadallan, 2015). Les dates surlignées en gris clair (2 février 1983 et 6 décembre 2013 dite « tempête Xaver ») correspondent à des surcotes de pleine mer et des niveaux extrêmes remarquables.

Date	Boulogne-sur-Mer 20/11/1941 au 16/10/2013		Calais 03/05/1941 au 30/12/2013		Dunkerque 06/06/1956 au 01/01/2014	
	Surcote PM	Décalage/PM	Surcote PM	Décalage/PM	Surcote PM	Décalage/PM
02/04/1973			0,81	18		
11/12/1979	1,08	21				
02/02/1983	0,91	-2			1,32	-5
16/10/1987	1,37	28				
21/02/1993			0,90	-10		
30/01/2000			0,84	-14		
22/02/2002			0,85	-16		
14/11/2002	0,86	2				
18/03/2007			0,84	-7		
06/12/2013			1,02	-1	1,23	-8

Estimation des valeurs extrêmes

Les estimations statistiques des valeurs extrêmes de surcote de pleine mer (Figure 3.15 et Tableau 3.14) ont été réalisées selon l'analyse des surcotes extrêmes le long des côtes métropolitaines du Cerema (Cetmef, CETE Méditerranée, 2013). Les estimations statistiques des surcotes de pleine mer centennales (ajustement statistique par une distribution généralisée de Pareto, GPD) sont comprises entre 0,96 m à Calais et 1,39 m à Boulogne-sur-Mer.

Décotes

Les décotes du niveau d'eau sont moins prévisibles que les surcotes car elles sont associées non

seulement aux ondes de tempête mais aussi à des pressions barométriques anormalement élevées. Elles peuvent atteindre 2 m et sont plus fréquentes dans les estuaires à marée et les zones de faible profondeur (Shom, 2010). Les conditions favorables aux décotes ont été déterminées à partir d'observations faites à Boulogne-sur-Mer, Calais (1965-2002) et Dunkerque (1956-2002) (Chaverot, 2006 ; Beausir, 2007). Les décotes ont généralement lieu lors d'épisodes anticycloniques (pression atmosphérique supérieure à 1015 hPa) mais à Dunkerque, les très fortes décotes observées ont eu lieu en période dépressionnaire, ce qui suppose que le vent soit pour ce site le principal facteur responsable des décotes. La direction et la fréquence des vents sont essentielles.

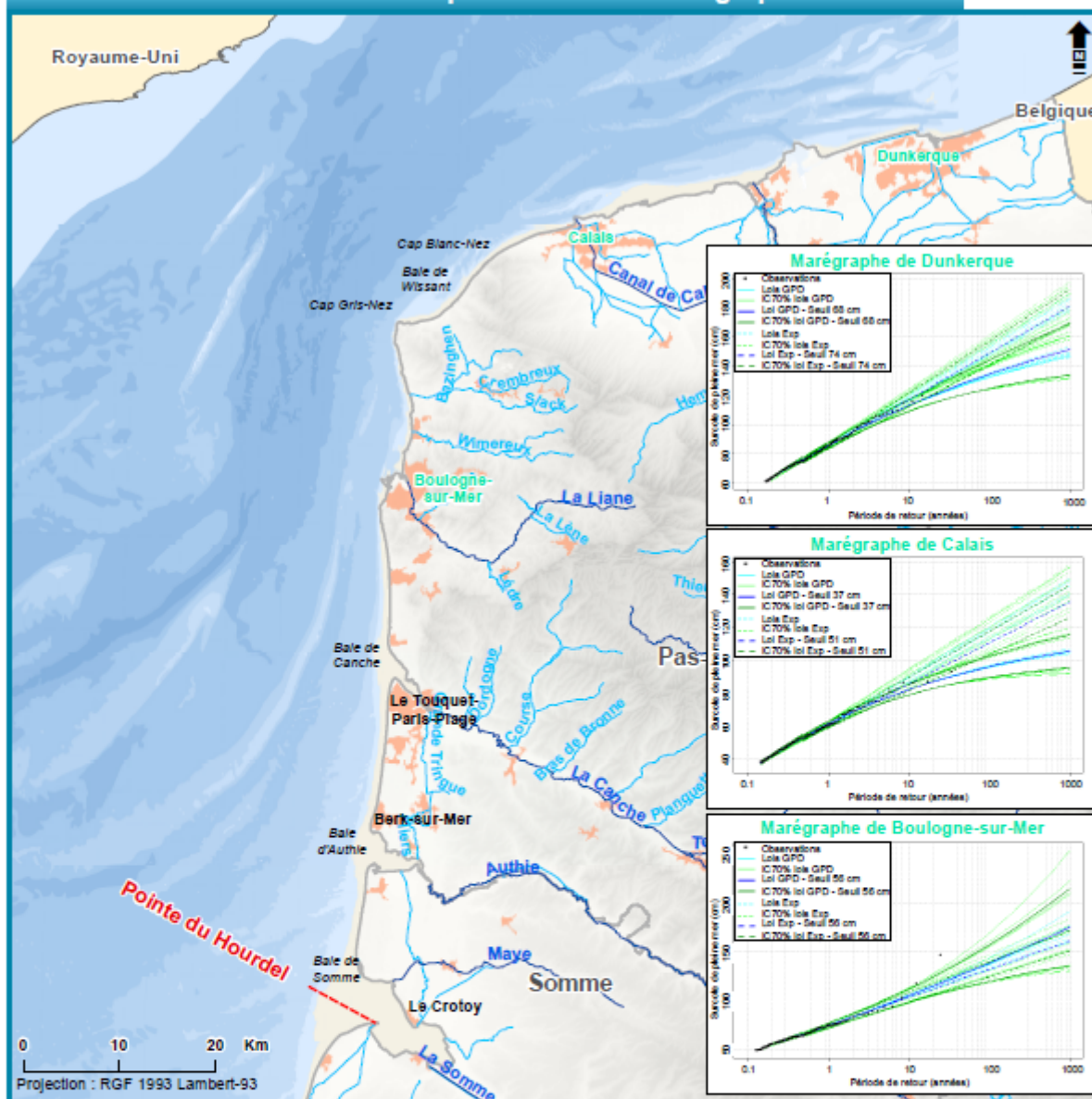
Tableau 3.14 : Estimations statistiques des valeurs extrêmes de surcote de pleine mer en mètre aux ports de Boulogne-sur-Mer, Calais et Dunkerque par ajustement statistique d'une loi exponentielle et d'une distribution généralisée de Pareto -GPD- (Cetmef, CETE Méditerranée, 2013). Les valeurs entre crochets correspondent à l'intervalle de confiance à 70 %.

Loi statistique	Exponentielle				GPD			
	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Boulogne-sur-Mer	1,04 [0,99-1,08]	1,12 [1,06-1,18]	1,24 [1,17-1,31]	1,32 [1,25-1,40]	1,05 [0,98-1,12]	1,15 [1,05-1,25]	1,28 [1,14-1,43]	1,39 [1,20-1,58]
Calais	0,85 [0,81-0,90]	0,93 [0,88-0,98]	1,03 [0,97-1,09]	1,10 [1,03-1,17]	0,82 [0,79-0,85]	0,87 [0,83-0,91]	0,92 [0,87-0,98]	0,96 [0,90-1,02]
Dunkerque	1,17 [1,12-1,22]	1,27 [1,21-1,33]	1,40 [1,33-1,47]	1,49 [1,41-1,57]	1,13 [1,09-1,17]	1,20 [1,15-1,26]	1,29 [1,21-1,37]	1,35 [1,25-1,45]

Dynamiques et évolution du littoral

Synthèse des connaissances de la frontière belge à la pointe du Hourdel

Valeurs extrêmes de surcote de pleine mer aux marégraphes



- Limite de province sédimentaire
- Cours d'eau principal
- Cours d'eau secondaire

Longueur de l'échantillon de surcotes horaires de pleine mer

Marégraphe	Durée	Période
Dunkerque	42,8 années	1956 - 2012
Calais	33,6 années	1941 - 2012
Boulogne-sur-Mer	24,2 années	1941 - 2012

- Bâti
- Limite départementale

Les valeurs extrêmes de surcote de pleine mer sont issues de l'analyse des données SHOM (REFMAR) par le Cerema (Cetmef, 2013) et sont disponibles au niveau de l'implantation des marégraphes dans les ports principaux et secondaires.

Les résultats sont issus de la sélection des événements de tempêtes par une méthode POT (Peak Over Threshold) puis l'ajustement d'une loi paramétrique des valeurs extrêmes. Deux lois paramétriques sont présentées, pour deux résultats : une loi de Pareto (Generalized Pareto Distribution) en traits pleins et une loi exponentielle en pointillés.

Les résultats sont présentés sur les graphes pour l'ensemble des seuils testés par la méthode POT afin de quantifier l'incertitude de la méthode. Le choix de l'opérateur est identifié par la sur-épaisseur du trait.

[Pour en savoir plus : www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr](http://www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr)

Source - Copyrights :
 Province sédimentaire - Cerema & MEEM
 Surcotes extrêmes - Cerema 2013
 Bathymétrie de métropole - Ifremer

Cours d'eau - BD Carthage
 Pays limitrophes - EEA
 GEOFLA® - ©IGN Paris - Reproduction interdite
 Occupation du sol - Corine Land Cover 2012
 BD Alti® - ©IGN Paris - Reproduction interdite



Figure 3.15 : Ajustement statistique des valeurs extrêmes de surcote de pleine mer aux ports de référence de la province (d'après Cetmef, CETE Méditerranée, 2013).

3.2.1.d. Plus hauts niveaux marins observés et niveaux extrêmes

Sur la province de la frontière belge à la baie de Somme, les plus hauts niveaux marins sont relevés au niveau des trois ports de référence et au large. Les événements marquants en termes de niveau d'eau de pleine mer ont été sélectionnés à partir des observations aux marégraphes de référence du Shom et fournies par le Shom (données marégraphiques REFMAR) ; le décalage temporel entre le pic de niveau haut et la pleine mer théorique est précisé pour les dix événements recensés les plus hauts (Tableau 3.15). Les séries temporelles

étant caractérisées par la présence de périodes d'interruption des mesures, il ne s'agit donc pas d'une liste exhaustive des événements les plus marquants sur la province.

Les niveaux de pleine mer présentés dans le Tableau 3.15 sont peu décalés en temps par rapport au moment théorique de pleine mer (jusqu'à 28 minutes). Les plus fortes valeurs de niveau de pleine mer sont observées au sud de la province sédimentaire, et les plus faibles valeurs au nord-est. Le plus fort niveau de pleine mer observé sur la province a atteint la valeur de 5,46 m NGF le 27 février 1990 à Boulogne-sur-Mer.

Tableau 3.15 : Hauteurs de pleine mer maximales observées aux ports de Boulogne-sur-Mer, Calais et Dunkerque : niveau de pleine mer (Niveau PM) en mètre NGF (IGN 69) et décalage en temps (Décalage/PM) en minute par rapport à la marée de pleine mer (Source : Shom et REFMAR). Les dates surlignées en gris clair (2 février 1983 et 6 décembre 2013 dite « tempête Xaver ») correspondent à des surcotes de pleine mer et des niveaux extrêmes remarquables.

Date	Boulogne-sur-Mer 20/11/1941 au 31/12/2013		Calais 03/05/1941 au 31/12/2013		Dunkerque 06/06/1956 au 31/12/2013	
	Niveau PM	Décalage/PM	Niveau PM	Décalage/PM	Niveau PM	Décalage/PM
21/03/1961					4,25	
10/12/1965			4,76	15	4,39	-5
05/10/1967			4,62	10	4,25	
14/12/1973					4,39	3
03/01/1976					4,29	
13/11/1977	5,28					
12/01/1978			4,76	20	4,61	28
25/10/1980	5,33					
14/11/1981					4,26	
14/12/1981	5,36					
31/01/1983					4,25	
02/02/1983	5,41	-2	4,65	-9	4,62	-5
08/04/1985	5,44	9				
26/09/1988	5,29					
27/02/1990	5,46	1				
07/10/1990	5,28		4,67	-4		
14/11/1993			4,65	1		
01/01/1995			4,59			
29/10/1996					4,27	
28/02/1998	5,41	8				
12/03/2001	5,27					
18/03/2007	5,28		4,64		4,28	
25/11/2007			4,61		4,28	
28/02/2010			4,59			
04/11/2013			4,71	3		
06/12/2013	5,55	6	5,14	-1	4,77	-8

Au marégraphe de Dunkerque, les niveaux d'eau maximaux annuels enregistrés (Figure 3.16 et 9.4.10 Annexe 3.10) sont corrélables avec quelques événements cités précédemment dans l'historique des tempêtes ayant impacté la province de la frontière belge à la baie de Somme (Tableau 3.3) : les 12 janvier 1978 (7,30 m CM ; coef. 107) et 2 février 1983 (7,29 m CM ; coef. 97) ou plus récemment les 10 février 2009 (6,84 m CM ; coef. 107) et 28 février 2010 (6,90 m CM ; coef. 109). Mais la plupart ne correspondent pas spécialement à des tempêtes en tant que telles, ni à des événements érosifs. Dans les années 1990, en raison des lacunes, aucun niveau maximum ne correspond aux tempêtes connues (en 1995 notamment). L'année 2007, sans lacune de données, a été marquée par deux tempêtes, les 19 mars (6,80 m CM ; coef. 102) et 9 novembre (6,83 m CM ; coef. 76), où les niveaux d'eau mesurés ont été plus faibles que le niveau maximal du 25 novembre (6,94 m CM ; coef. 100) (Maspataud, 2011).

Les valeurs extrêmes de niveaux marins de pleine mer sur la province ont été estimées par le Shom et le Cerema (Shom, Cetmef, 2012, 2013) pour des

périodes de retour de 10, 20, 50 et 100 ans (Tableaux 3.16 et 3.17 et Figures 3.17 et 3.18). La méthode utilisée repose sur la convolution¹⁵ des surcotes météorologiques avec les niveaux de marée aux ports de référence (durée d'observation supérieure à 10 ans) et secondaires¹⁶. Les résultats présentés sont issus de deux sources, le produit Shom/Cerema (Shom, Cetmef, 2012) et un travail de recherche du Cerema (Kergadallan, 2015). Les valeurs extrêmes officielles de niveau marin de référence sont celles fournies par le produit Shom/Cerema. Le travail de recherche du Cerema est un travail exploratoire visant à améliorer les méthodes d'estimation des extrêmes (prise en compte de la dépendance entre la marée astronomique et la surcote météorologique notamment). Une mise à jour des valeurs officielles doit être effectuée par le Cerema et le Shom sur la base des travaux du Cerema (Kergadallan, 2015) et en intégrant les dernières observations marégraphiques disponibles. Selon le produit Shom/Cerema, les estimations statistiques de niveaux de pleine mer centennaux sont comprises entre 4,70 m NGF à Dunkerque et 5,74 m NGF à Boulogne-sur-Mer (Tableau 3.16).

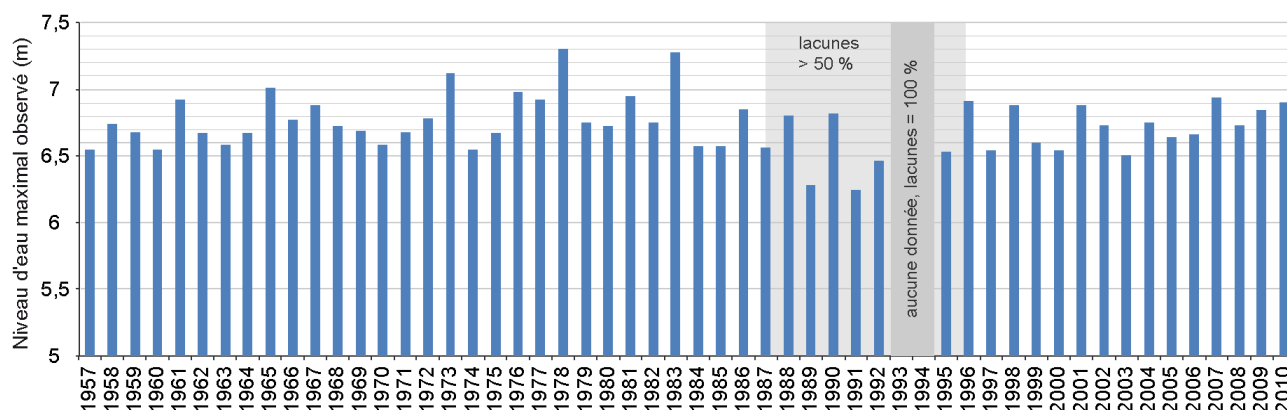


Figure 3.16 : Graphique des plus hauts niveaux d'eau annuels enregistrés au marégraphe de Dunkerque de 1957 à 2010 (en mètres, par rapport au zéro hydrographique) (Maspataud, 2011).

15 Convolution surcote/marée : procédé qui consiste à calculer la probabilité d'atteindre un niveau d'eau donné, en sommant les probabilités d'occurrence de l'ensemble des couples surcote et marée permettant d'atteindre ce niveau.

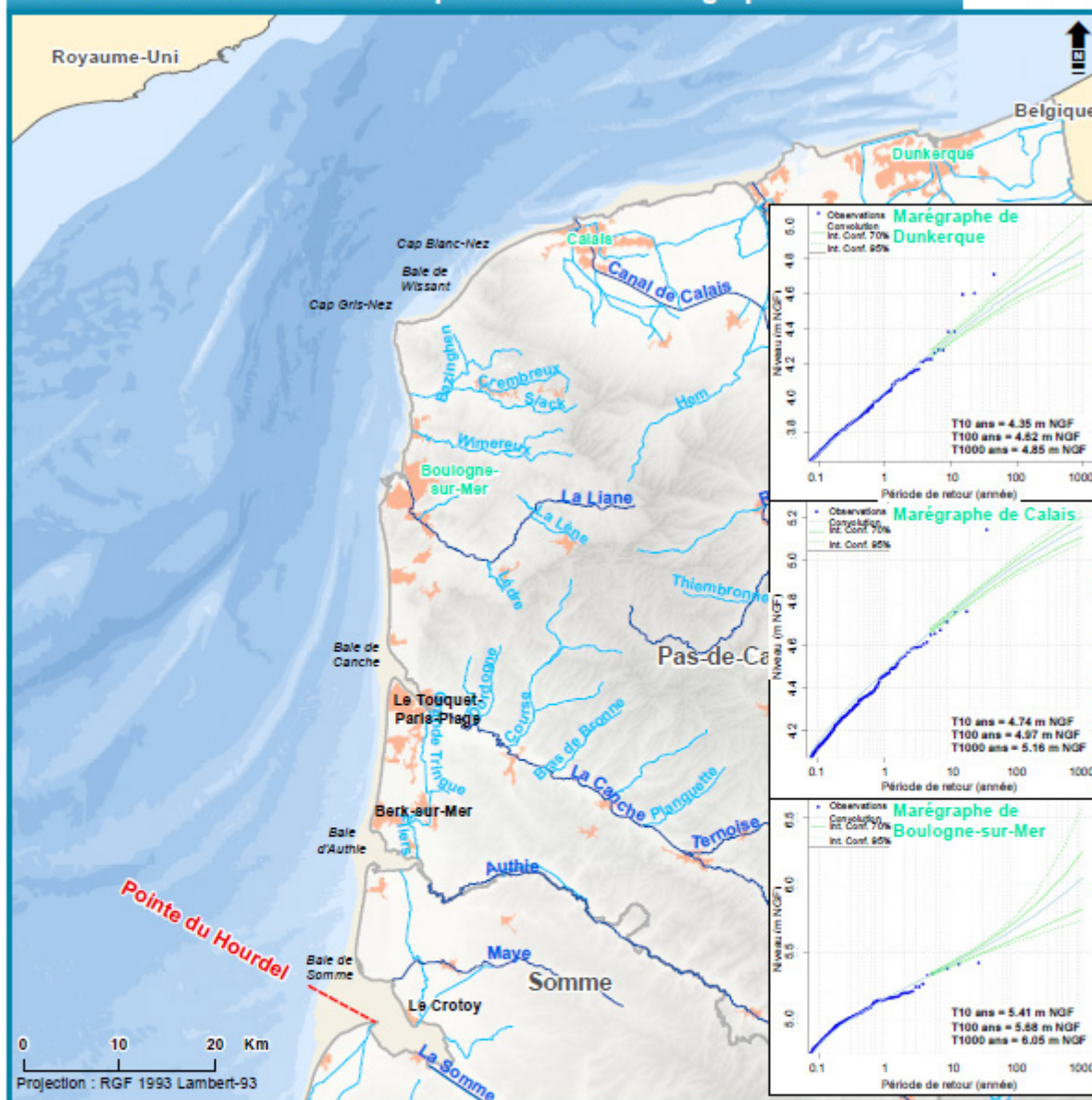
16 Pour les ports de référence, la loi de probabilité des surcotes météorologiques est obtenue par ajustement d'une loi de Gumbel sur les surcotes supérieures à un seuil de tempête. Pour les ports secondaires, la loi de probabilité des surcotes météorologiques est obtenue par corrélation avec la loi des surcotes aux ports de référence de la zone de marée.

Dynamiques et évolution du littoral

Synthèse des connaissances de la frontière belge à la pointe du Hourdel



Valeurs extrêmes de niveau de pleine mer aux marégraphes



— Limite de province sédimentaire ■ Bâti □ Limite départementale

— Cours d'eau principal
— Cours d'eau secondaire

Longueur de l'échantillon de niveaux extrêmes de pleine mer

Marégraphe	Durée	Période
Dunkerque	45,1 années	1958 - 2014
Calais	35,8 années	1941 - 2013
Boulogne-sur-Mer	26,5 années	1941 - 2013

Les valeurs extrêmes de niveau de pleine mer sont issues de l'analyse des données SHOM (REFMAR) par le Cerema (Kergadallan, 2015).

Elles sont disponibles au niveau de l'implantation des marégraphes dans les ports principaux et secondaires.

La méthode d'analyse repose sur la caractérisation des lois de distributions de surcote et de niveau de marée de pleine mer, puis de la convolution de la surcote avec la marée afin d'établir la loi de distribution des niveaux de pleine mer.

► Pour en savoir plus : www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr

Source - Copyrights :
Province sédimentaire - Cerema & MEEM
Niveaux extrêmes - Kergadallan (LNHE & Cerema) 2015
Bathymétrie de métropole - Ifremer
Cours d'eau - BD Carthage

Pays limitrophes - EEA
GEOFLA® - ©IGN Paris - Reproduction interdite
Occupation du sol - Corine Land Cover 2012
BD Alti® - ©IGN Paris - Reproduction interdite



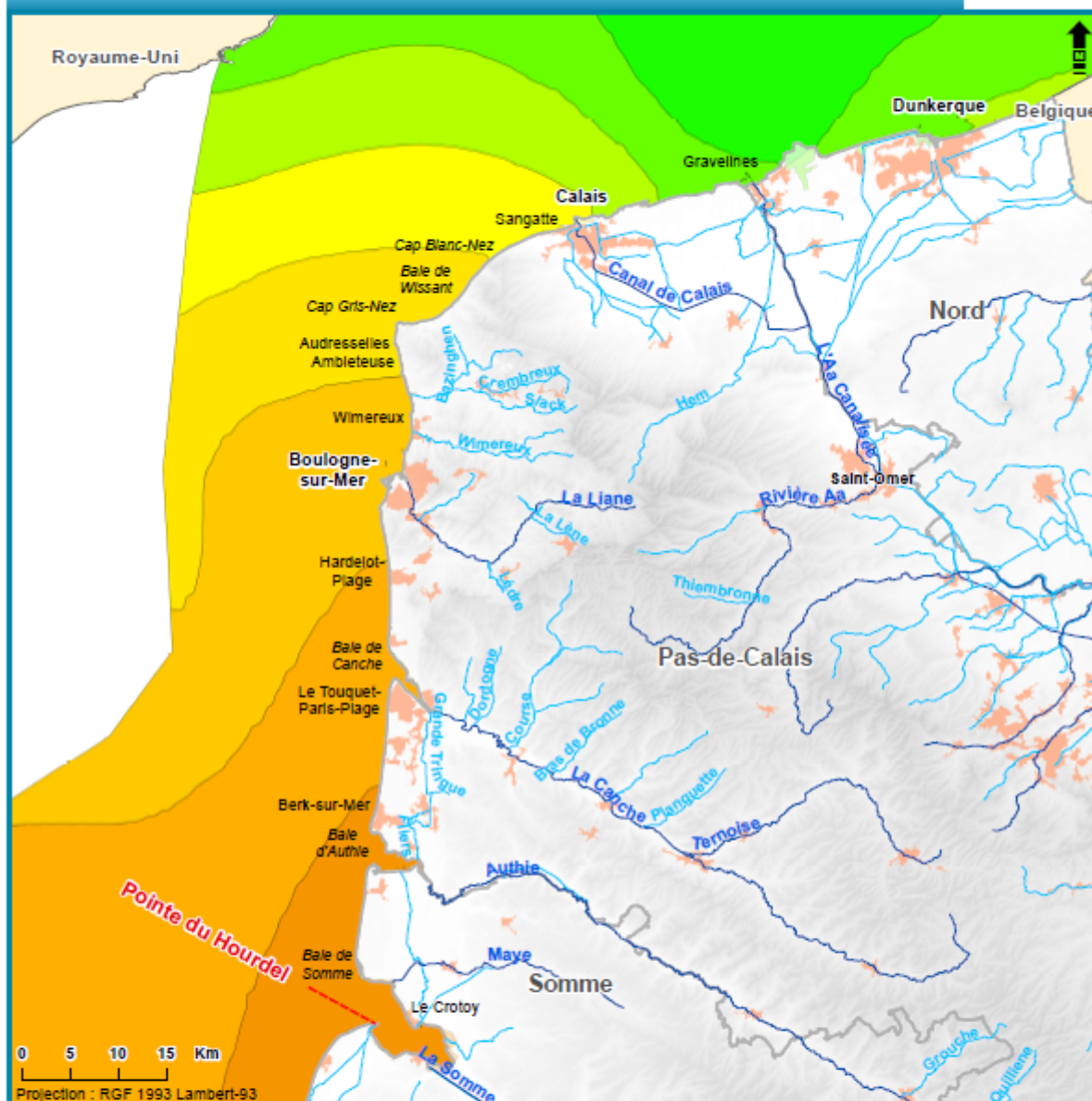
Figure 3.17 : Estimation statistique des valeurs extrêmes de niveau de pleine mer aux ports de référence de la province (Kergadallan, 2015)

Dynamiques et évolution du littoral

Synthèse des connaissances de la frontière belge à la pointe du Hourdel



Niveaux marins centennaux



- Limite de province sédimentaire
- Cours d'eau principal
- Cours d'eau secondaire
- Bâti
- Limite départementale

Niveaux marins extrêmes centennaux (référence verticale: IGN69)

 inf. à 325 cm	 de 475 à 500 cm	 de 625 à 650 cm
 de 325 à 350 cm	 de 500 à 525 cm	 de 650 à 675 cm
 de 350 à 375 cm	 de 525 à 550 cm	 de 675 à 700 cm
 de 375 à 400 cm	 de 550 à 575 cm	 de 700 à 725 cm
 de 400 à 425 cm	 de 575 à 600 cm	 de 725 à 750 cm
 de 425 à 450 cm	 de 600 à 625 cm	 de 750 à 775 cm
 de 450 à 475 cm	 de 625 à 650 cm	 de 775 à 800 cm

Pour en savoir plus : www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr

Source - Copyrights :
 Province sédimentaire - Cerema & MEEM
 Niveaux marins extrêmes - SHOM
 Pays limitrophes - EEA
 GEOFLA® - ©IGN Paris - Reproduction interdite

Occupation du sol - Corine Land Cover 2012
 Cours d'eau - BD Carthage
 BD Alti® - ©IGN Paris - Reproduction interdite



Figure 3.18 : Répartition spatiale des niveaux extrêmes de pleine mer centennaux (en mètres NGF) sur la province (Shom, Cetmef, 2013)

La répartition spatiale sur la province sédimentaire des estimations des niveaux de pleine mer centennaux (Figure 3.18) est issue d'une interpolation des résultats d'estimation entre les ports de référence et des points de mesure secondaires au large et à la côte (Shom et Cetmef, 2013). Cette répartition spatiale sera prochainement actualisée avec les résultats de Kergadallan (2015).

3.2.1.e. Cas des estuaires : plus hauts niveaux observés et concomitances

Pour les baies de Somme et de l'Authie, des niveaux extrêmes de plusieurs périodes de retour ont été évalués par Créocéan (2011) à partir des données Shom-Cetmef (Tableau 3.18) ; cependant ces valeurs sont soumises à précaution étant données les limites de la méthode du produit Shom-Cetmef en zone estuarienne.

La limite de remontée de la marée dans les estuaires a pu être estimée à partir de l'analyse des stations hydrométriques influencées et non

influencées par la marée (CETE Méditerranée, 2012 ; voir 3.3.1.a *Caractéristiques hydrologiques*). Il a ainsi été montré que le signal de marée était enregistré sur la Somme au moins jusqu'à la station d'Abbeville ; les études menées spécifiquement sur l'Authie par Sogreah (1999, 2009a) indiquent que l'Authie subit l'influence des marées dont le flux remonte la baie puis la vallée jusqu'à Colline-Beaumont.

À Saint-Valery-sur-Somme, la cote 6,5 m NGF a probablement été dépassée deux fois, lors des inondations de 1984 et 1990, les quais d'altitude 7 m NGF ayant été recouverts par une tranche d'eau de 0,1 à 0,3 m (Créocéan, 2008).

Aucun événement de submersion marine par débordement n'est recensé à hauteur de la dernière digue de renclôture de la baie d'Authie (altitude minimale de 3 m) (Créocéan, 2011).

Il n'y a pas d'information connue pour les autres estuaires du littoral de la province.

Tableau 3.16 : Estimations statistiques des valeurs extrêmes de niveau de pleine mer en mètre NGF (IGN 69) aux ports de Boulogne-sur-Mer, Calais et Dunkerque (Shom, Cetmef, 2012).

Période de retour	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Boulogne-sur-Mer	5,49	5,57	5,66	5,74
Calais	4,77	4,85	4,96	5,04
Dunkerque	4,4	4,49	4,61	4,70

Tableau 3.17 : Estimations statistiques des valeurs extrêmes de niveau de pleine mer en mètre NGF (IGN 69) aux ports de Boulogne-sur-Mer, Calais et Dunkerque (Kergadallan, 2015). Les valeurs entre crochets correspondent à l'intervalle de confiance à 70 %.

Période de retour	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Boulogne-sur-Mer	5,41 [5,39-5,42]	5,48 [5,46-5,50]	5,59 [5,54-5,63]	5,68 [5,61-5,73]
Calais	4,74 [4,73-4,75]	4,82 [4,80-4,83]	4,91 [4,89-4,93]	4,97 [4,95-5,00]
Dunkerque	4,35 [4,33-4,37]	4,44 [4,41-4,46]	4,54 [4,51-4,58]	4,62 [4,58-4,67]

Tableau 3.18 : Estimation des niveaux extrêmes (en mètres NGF) en baies de Somme et d'Authie (Créocéan, 2011, à partir des données Shom-Cetmef)

Période de retour	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Entrée baie de Somme	6,2	6,3	6,4	6,5
Entrée baie d'Authie	6,1	6,2	6,3	6,4

3.2.2 États de mer

Des séries temporelles d'états de mer sont disponibles sur la province pour différentes périodes selon huit bases de données (Tableau 3.19) issues de l'observation *in situ* ou de la simulation numérique. Ces bases de données nationales sont présentées dans les fiches techniques du fascicule national.

Les quatre bases CANDHIS, ANEMOC 2, BOBWA

et AVAG mettent à disposition un certain nombre d'analyses statistiques (9.4.11 Annexe 3.11). Ces analyses portent sur la climatologie moyenne (roses des houles, quantiles¹⁷, corrélogrammes¹⁸...) et les événements extrêmes (calcul des périodes de retour et/ou sélection des événements remarquables). Les caractéristiques des états de mer détaillées ci-après sont issues de ces analyses. Les points d'observation disponibles sur la province pour ces quatre bases de données sont localisés sur la figure 3.19.

Tableau 3.19 : Bases de données nationales disponibles pour les états de mer de la province

Type de données	Nom de la base	Producteur et/ou gestionnaire	Précisions sur la base	Période disponible	Résolution
Observations	CANDHIS	Cerema, DREAL Hauts-de-France	Mesures par houlographes	Depuis 1987	4 points de mesure
	GLOBWAVE	SATOC, NOC, CLS, Ifremer, Logica, CNES et ESA	Mesures par satellite	Depuis 1992	Tous les 5 à 7 km le long des traces Inexploitable <15 km des côtes
Simulations numériques rétrospectives	ANEMOC 2	EDF R&D et Cerema	Modèle TOMAWAC	De 1979 à 2010	Minimum <1 km à proximité des côtes
	BOBWA	BRGM	Modèle WAVEWATCH III™	De 1958 à 2002	Minimum >5 km à proximité des côtes
	HOMERE	Ifremer	Modèle WAVEWATCH III™	De 1994 à 2012	Minimum de 200 m à proximité des côtes
Prévisions	PREVIMER	Ifremer et Shom	Modèle WAVEWATCH III™	Depuis 2007	Minimum de 200 m à proximité des côtes
	AVAG	Météo-France	Modèle AVAG Modèle MFWAM	De 1999 à 2013 Depuis 2013	Minimum >1 km à proximité des côtes
	Data.shom.fr	Shom	Modèle WAVEWATCH III™	15 derniers jours	Minimum de 200 m à proximité des côtes

17 Le quantile X % correspond à la valeur maximale observée X % du temps et est noté QX %.

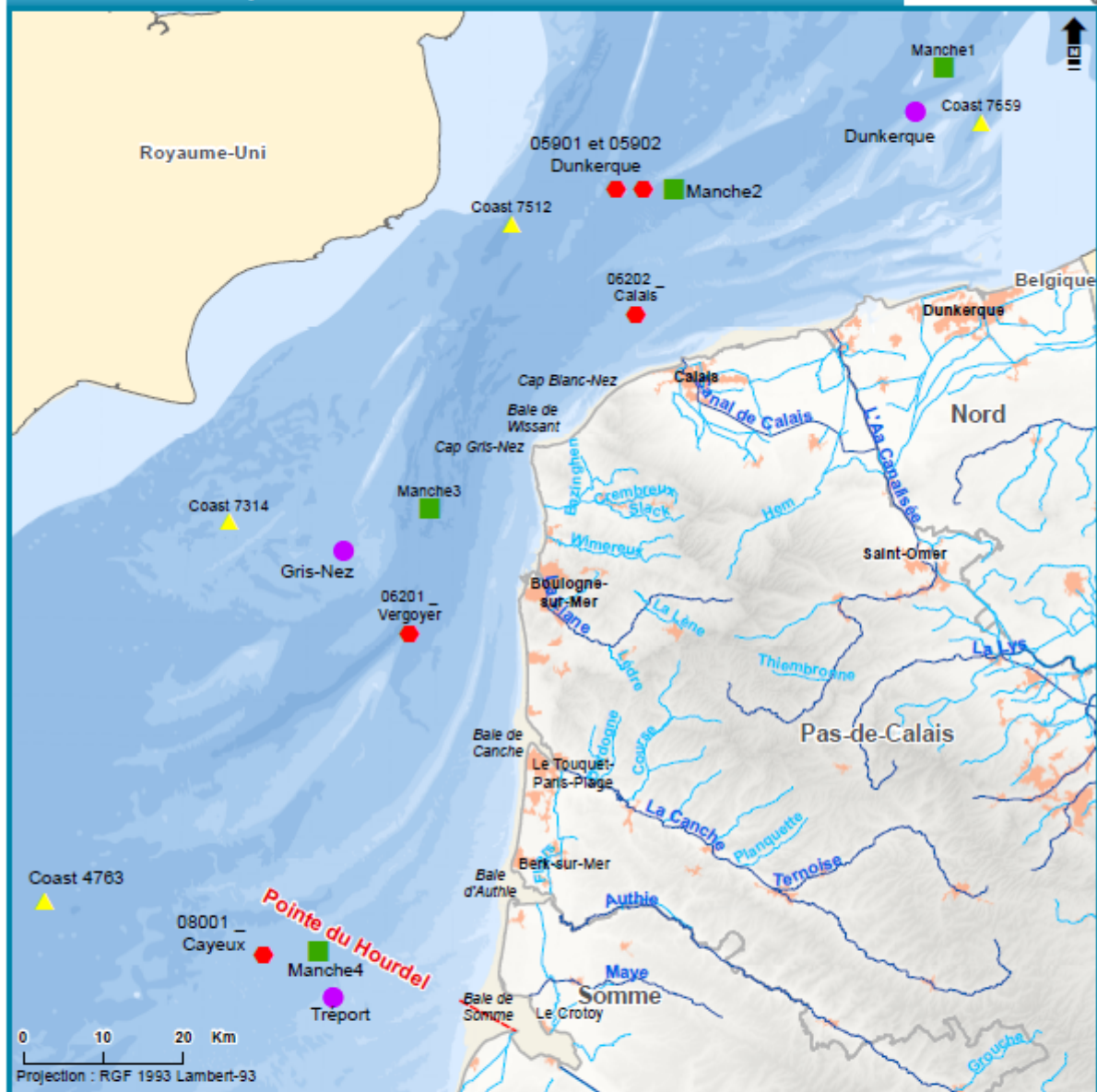
18 Un corrélogramme à 2 dimensions correspond à la représentation graphique de la distribution d'une variable X en fonction de la distribution d'une variable Y.

Dynamiques et évolution du littoral

Synthèse des connaissances de la frontière belge à la pointe du Hourdel



Localisation des points d'observation des états de mer



— Limite de province sédimentaire — Cours d'eau principal ■ Bâti □ Limite départementale
 — Cours d'eau secondaire

Observation des états de mer

- ▲ ANEMOC-2
- AVAG
- BOBWA
- CANDHIS

ANEMOC-2, AVAG et BOBWA sont des bases de données numériques des états de mer :

- ANEMOC-2 est issue de la collaboration d'EDF R&D et le Cerema. Cette base est construite à partir de simulations rétrospectives (code TOMAWAC) sur une période de 32 ans (du 1er janvier 1979 au 31 décembre 2010).
- AVAG est développée par Météo-France et construite à partir de prédictions des états de mer (code WAVEWATCH III) archivées depuis 1999.
- BOBWA est issue d'un projet de recherche associant le BRGM et le CNRM-GAME. Cette base est construite à partir de simulations rétrospectives (code WAVEWATCH III) sur une période de 44 ans et 8 mois (du 10 janvier 1958 au 31 août 2002).

CANDHIS est une base de données d'observation in situ des états de mer. Les mesures sont effectuées à partir de bouées (holographes). Cette base est gérée par le Cerema et regroupe de nombreux partenaires (établissements publics, services de l'État, collectivités territoriales, industriels).

► Pour en savoir plus : www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr

Source - Copyrights :
 Province sédimentaire - Cerema & MEEM
 Candhis - Cerema 2015
 ANEMOC-2 - EDF R&D LNHE & Cerema
 BOBWA - Charles (BRGM & CNRS-Météo-France) 2012
 Bathymétrie de métropole - Ifremer

GEOFLA® - ©IGN Paris - Reproduction interdite
 Occupation du sol - Corine Land Cover 2012
 Cours d'eau - BD Carthage
 BD Alt® - ©IGN Paris - Reproduction interdite



Figure 3.19 : Points d'observation des états de mer sur la province issus des bases de données CANDHIS, ANEMOC 2, BOBWA et AVAG

3.2.2.a. Climatologie moyenne et valeurs extrêmes

Les roses des houles issues des bases CANDHIS, ANEMOC 2, BOBWA et AVAG (Figures 3.20 et 3.21 et 9.4.11 Annexe 3.11) montrent qu'en termes de climatologie moyenne, la province sédimentaire est principalement influencée par les états de mer :

- en provenance de l'océan Atlantique et remontant la Manche : direction de provenance des vagues de secteur sud-ouest à ouest-sud-ouest au large de la baie de Somme pour virer ouest-sud-ouest au large de Dunkerque ;
- et descendant de la mer du Nord : direction de provenance des vagues de secteur nord à nord-nord-est au large de Dunkerque, pour virer nord-est au large de la baie de Somme.

Les roses des houles issues de l'analyse des données AVAG (points Dunkerque et Gris-Nez – voir 9.4.11 Annexe 3.11), dissociant la part liée à la mer de vent de celle liée à la houle primaire, montrent :

- au nord de la province (Dunkerque), que les houles primaires sont principalement de direction nord (événements météorologiques en provenance de la mer du Nord) et les mers de vent de direction centrée sur le sud-ouest (événements météorologiques en provenance de l'océan Atlantique) ;
- au sud de la province (Gris-Nez), que les houles primaires et les mers de vent sont principalement de direction sud-ouest (événements météorologiques en provenance de l'océan Atlantique).

Les roses des houles AVAG (9.4.11 Annexe 3.11) montrent aussi que les plus fortes vagues sont liées majoritairement aux mers de vent, plutôt qu'aux houles primaires sur la province.

La plaine maritime picarde est ainsi plus exposée aux événements provenant de l'océan Atlantique qu'à ceux provenant de la mer du Nord et les quantiles à 99 % issus d'ANEMOC 2 (Figure 3.23 et 9.4.11 Annexe 3.11) indiquent que les hauteurs significatives de vagues y sont plus élevées qu'au nord-est (Q99 % = 4,26 m au point Coast4763 vers Le Crotoy ; Q99 % = 2,86 m au point Coast7659 vers Dunkerque). Cette tendance s'inverse vers la plaine maritime flamande au nord.

Cette tendance semble être confirmée par les données d'observations *in situ* (données CANDHIS, Figure 3.22 et 9.4.11 Annexe 3.11) bien que le faible nombre de points de mesure et l'influence de paramètres locaux (distance à la côte, exposition, bathymétrie...) rendent difficile cette analyse.

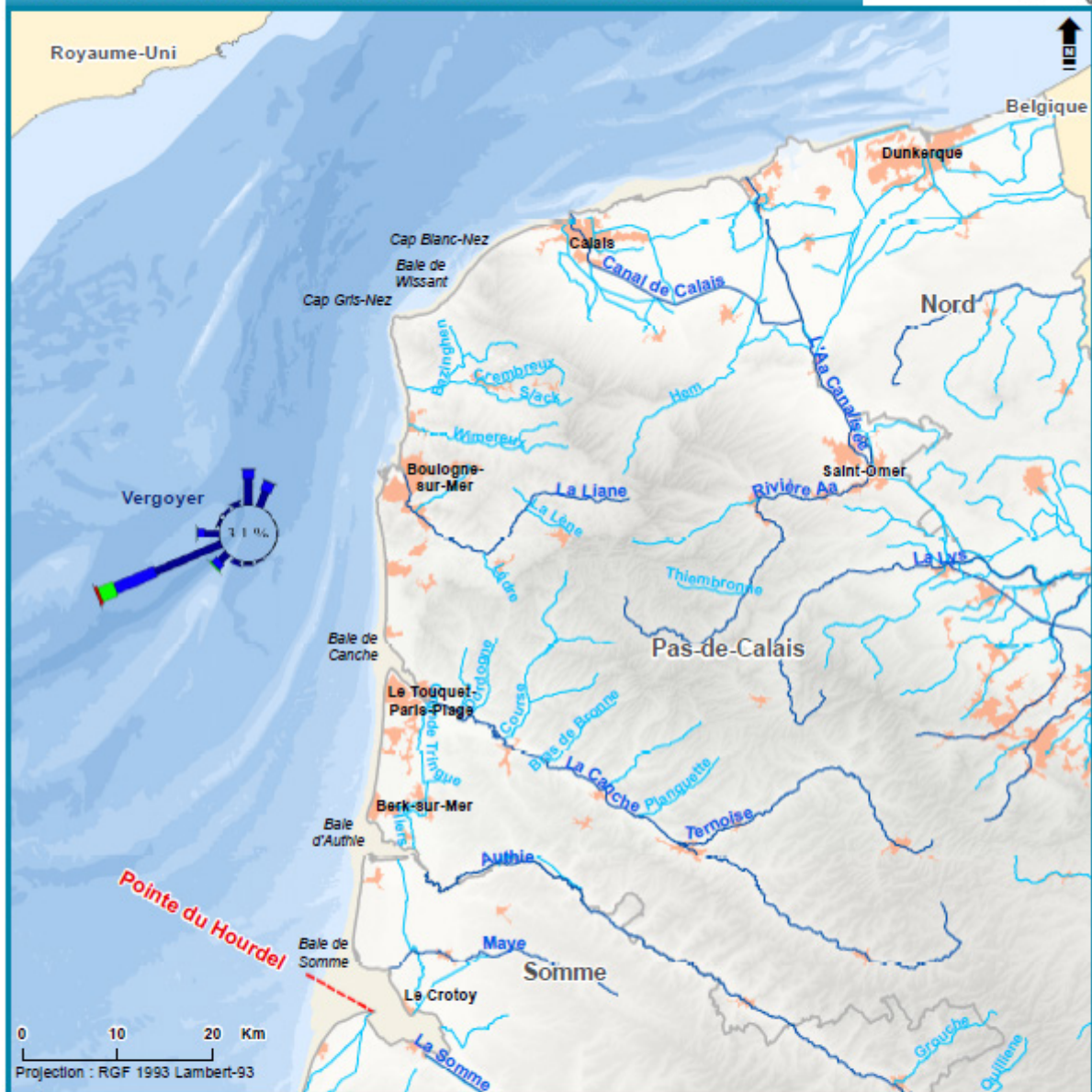
Sur les façades Manche et mer du Nord de la province sédimentaire, le climat de houle comporte des épisodes courts (de un à quelques jours) de vagues de mer de haute énergie (avec des périodes de pic de 4 à 7 secondes) qui s'intercalent entre des phases plus ou moins longues (de l'ordre de plusieurs jours en hiver à plusieurs semaines en été) de vagues de mer de basse énergie. L'hiver est davantage marqué par des vagues de secteur nord, de période et de hauteur plus importante (jusqu'à 2 m lors de tempêtes, d'après des enregistrements effectués sur le site de Dunkerque-est). 60 % des houles sont inférieures à 5 secondes et 23 % sont comprises entre 6 et 7 secondes (Héquette, Rufin-Soler, 2007).

La houle montre un comportement en deux saisons bien distinctes coïncidant avec le rythme saisonnier du vent. D'avril à octobre, le régime de vagues est plutôt calme. Les houles les moins hautes (inférieures à 1,25 m) sont fortement dominantes (70 à 90 %) avec, durant les mois de mai à août, au moins 45 à 50 % des hauteurs inférieures à 0,5 m. Les vagues de 1,25 à 2,5 m représentent environ 30 % des cas, et environ 10 % des vagues ont des hauteurs comprises entre 2,5 et 6 m. D'octobre à mars, le régime saisonnier se caractérise par une plus grande agitation du plan d'eau. Les vagues inférieures à 0,5 m représentent moins de 40 % des observations. Si les vagues comprises entre 0,5 et 1,25 m restent aussi fréquentes, les vagues les plus hautes augmentent également sensiblement. Celles comprises entre 1,25 et 2,50 m représentent entre 30 et 40 % des cas et celles entre 2,5 et 6 m entre 10 et 20 % des cas. Les vagues supérieures à 6 m constituent autour de 1 % des cas. Ces dernières sont sans aucun doute à mettre en relation avec les tempêtes les plus importantes (voir 3.2.2.b.) (Héquette, Rufin-Soler, 2007).

Dynamiques et évolution du littoral

Synthèse des connaissances de la frontière belge à la pointe du Hourdel

Etats de mer issus de l'observation in situ - Rose des houles



— Limite de province sédimentaire Bâti Limite départementale
— Cours d'eau principal
— Cours d'eau secondaire

Rose des houles

HmD (m)

15.00	6.00]
14.00	5.00]
13.00	4.00]
12.00	3.00]
11.00	2.00]
10.25	1.00]
0%	0.00 , 0.25]
20%	

Les roses des houles représentent le pourcentage d'horodates associé à une hauteur significative H_{mD} donnée, pour une direction moyenne de provenance des vagues donnée. Le pourcentage associé à une classe donnée de H_{mD} est fourni par la hauteur du rectangle. Le type de la classe est fourni par la couleur et la largeur du rectangle.

Les directions de provenance associées à une H_{mD} inférieure ou égale à 0,25 m sont jugées peu représentatives et ne sont donc pas représentées. Le pourcentage d'horodates concerné est indiqué au centre de la rose.

Ces paramètres d'états de mer sont issus de l'observation in situ.

Pour en savoir plus : www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr

Source - Copyrights :
 Province sédimentaire - Cerema & MEEM
 Candhis - Cerema 2015
 Bathymétrie de métropole - Ifremer
 Cours d'eau - BD Carthage

Pays limitrophes - EEA
 GEOFLA® - ©IGN Paris - Reproduction interdite
 Occupation du sol - Corine Land Cover 2012
 BD Alti® - ©IGN Paris - Reproduction interdite

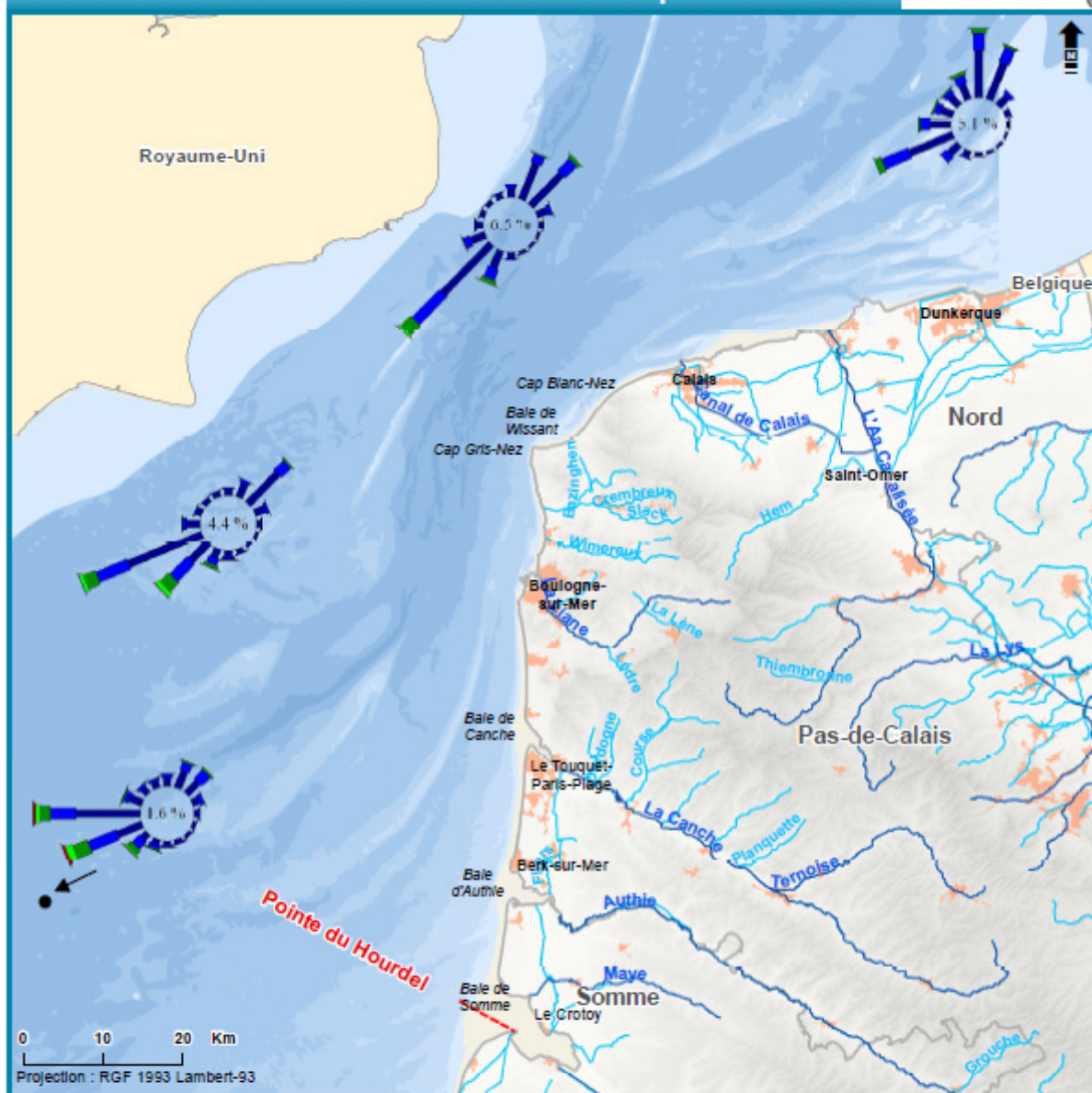


Figure 3.20 : Roses des houles issues de l'analyse des données de mesure in situ CANDHIS

Dynamiques et évolution du littoral

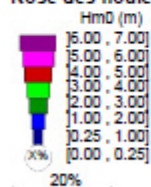
Synthèse des connaissances de la frontière belge à la pointe du Hourdel

Roses des houles issues de simulations numériques ANEMOC-2



— Limite de province sédimentaire — Cours d'eau principal ■ Bâti □ Limite départementale
 — Cours d'eau secondaire

Rose des houles



Les roses des houles représentent le pourcentage d'horodates associé à une hauteur significative H_{m0} donnée, pour une direction moyenne de provenance des vagues donnée.

Le pourcentage associé à une classe donnée de H_{m0} est fourni par la hauteur du rectangle. Le type de la classe est fourni par la couleur et la largeur du rectangle.

Les directions de provenance associées à une H_{m0} inférieure ou égale à 0,25 m sont jugées peu représentatives et ne sont donc pas représentées. Le pourcentage d'horodates concerné est indiqué au centre de la rose.

Les données utilisées sont issues de la simulation rétrospective des états de mer du 01/01/1979 au 01/01/2011 (produit ANEMOC-2 par EDF R&D et le Cerema). Ces résultats sont issus de la modélisation numérique et de ce fait doivent être considérés avec prudence.

Pour en savoir plus : www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr

Source - Copyrights :
 Province sédimentaire - Cerema & MEEM
 ANEMOC-2 - EDF R&D LNHE & Cerema
 Bathymétrie de métropole - Ifremer
 Pays limitrophes - EEA

GEOFLA® - ©IGN Paris - Reproduction interdite
 Occupation du sol - Corine Land Cover 2012
 Cours d'eau - BD Carthage
 BD Alti® - ©IGN Paris - Reproduction interdite

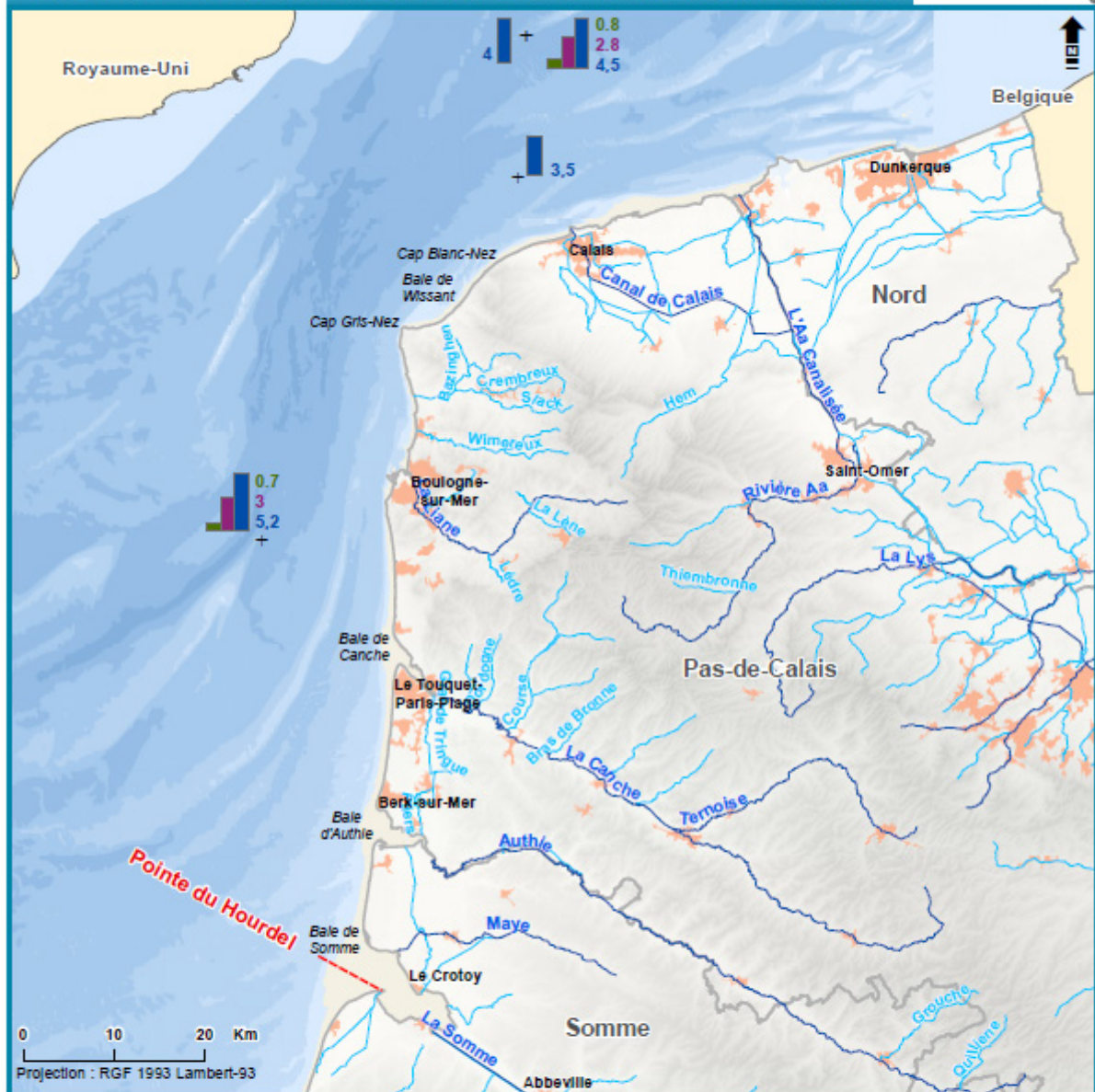


Figure 3.21 : Roses des houles issues de l'analyse des données de simulation numérique ANEMOC 2

Dynamiques et évolution du littoral

Synthèse des connaissances de la frontière belge à la pointe du Hourdel

Etats de mer issus de l'observation in situ - Hauteurs significatives



- Limite de province sédimentaire
- Cours d'eau principal
- Cours d'eau secondaire
- Bâti
- Limite départementale

Hauteur significative (en mètres)



Le paramètre d'états de mer représenté est la hauteur significative $H_{1/3}$ correspondant à la valeur moyenne du tiers supérieur des hauteurs de vagues observées in situ sur 20 à 30 min.

Les quantiles 50% et 99% de $H_{1/3}$ ne sont représentés que si les durées d'observation sont supérieures ou égales à 1 an. Ces quantiles correspondent aux valeurs dépassées respectivement 50% et 1% du temps. La valeur maximale de $H_{1/3}$ est représentée quelle que soit la durée d'observation. Cette valeur est à considérer avec prudence, particulièrement si la durée d'observation est inférieure à 1 an (points pour lesquels les quantiles 50% et 99% ne sont pas fournis).

Pour en savoir plus : www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr

Source - Copyrights :
 Province sédimentaire - Cerema & MEEM
 Candhis - Cerema 2015
 Bathymétrie de métropole - Ifremer
 Pays limitrophes - EEA

Occupation du sol - Corine Land Cover 2012
 GEOFLA® - ©IGN Paris - Reproduction interdite
 BD Alti® - ©IGN Paris - Reproduction interdite
 Cours d'eau - BD Carthage



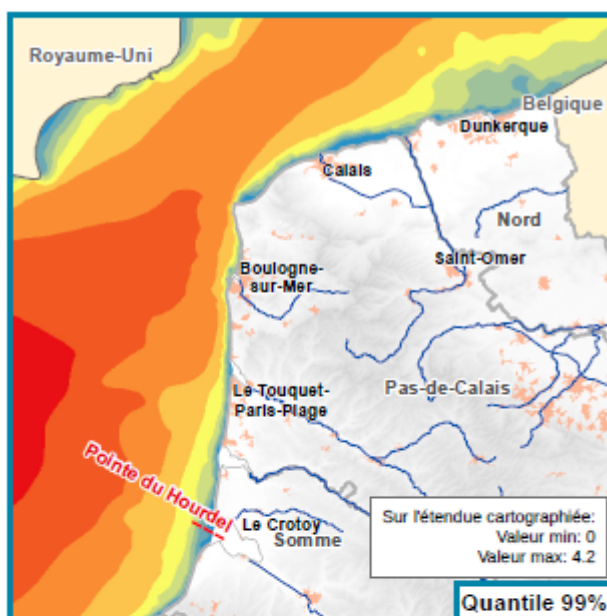
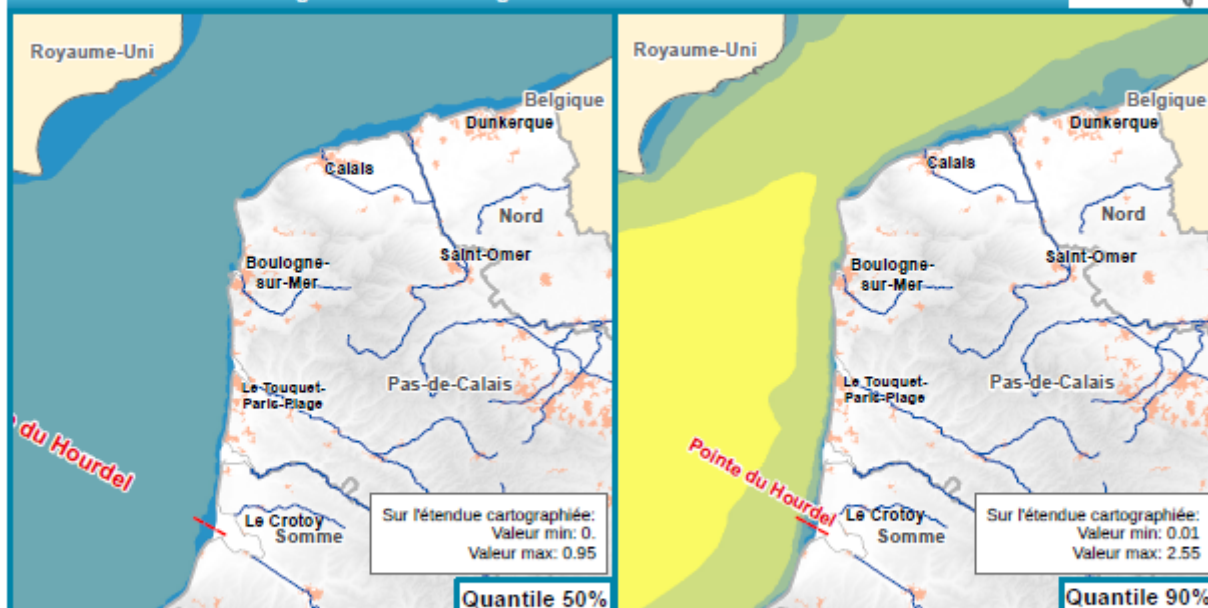
Figure 3.22 : Répartition spatiale des hauteurs significatives issues de l'analyse des données d'observation in situ CANDHIS

Dynamiques et évolution du littoral

Synthèse des connaissances de la frontière belge à la pointe du Hourdel



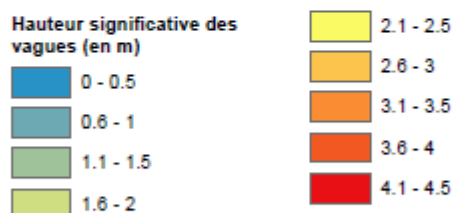
Etats de mer - Hauteur significative des vagues issues des simulations ANEMOC-2



Les hauteurs de vague représentées correspondent aux quantiles 50%, 90% et 99% des hauteurs significatives (Hm0) :

- Le quantile 50% correspond à la hauteur significative des vagues dépassée 50% du temps
- Le quantile 90% correspond à la hauteur significative des vagues dépassée 10% du temps
- Le quantile 99% correspond à la hauteur significative des vagues dépassée 1% du temps

Les données utilisées sont issues de la simulation rétrospective des états de mer du 1^{er} janvier 1979 au 31 décembre 2010 (produit ANEMOC-2 par EDF R&D et le Cerema). Elles ont ici été interpolées entre les points disponibles et jusqu'à la côte. Ces résultats de modélisation numérique doivent être considérés avec prudence, en particulier pour des profondeurs inférieures à 20 mètres ; ils ne sont notamment pas validés entre les dernières valeurs disponibles et la côte, ainsi que dans les estuaires représentés pour l'occasion en zone « blanche ».



Pour en savoir plus : www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr

Source - Copyrights :
Province sédimentaire - Cerema & MEEM
ANEMOC-2 - EDF R&D LNHE & Cerema
Bathymétrie de métropole - Ifremer
Pays limitrophes - EEA

GEOFLA® - ©IGN Paris - Reproduction interdite
Occupation du sol - Corine Land Cover 2012
Cours d'eau - BD Carthage
BD Alti® - ©IGN Paris - Reproduction interdite



Figure 3.23 : Répartition spatiale des hauteurs significatives issues de l'analyse des données de simulation numérique ANEMOC 2

Hauteurs significatives extrêmes

Les périodes de retour des valeurs extrêmes de hauteur significative ont été estimées pour des points des bases de données CANDHIS, ANEMOC 2 et BOBWA ; les valeurs décennales et centennales sont présentées dans le [tableau 3.20](#). Les estimations sont basées sur l'ajustement statistique d'une loi GPD (Generalized Pareto Distribution) par la méthode POT (Peak Over Threshold). Les bases de données CANDHIS et ANEMOC 2 proposent également une autre estimation par ajustement statistique d'une loi exponentielle (voir [9.4.11 Annexe 3.11](#)). Le seul point proche des données *in situ* CANDHIS (point 05901 et 05902) est le point Manche01 de la base de données BOBWA : la comparaison montre que BOBWA tendrait à sous-estimer la hauteur significative décennale (de plus de 80 cm pour ce point).

Les ajustements statistiques par direction de provenance effectués sur ANEMOC 2 et BOBWA (voir [9.4.11 Annexe 3.11](#)) montrent que les valeurs extrêmes sont principalement influencées :

- pour la plaine maritime picarde (au sud-ouest), par les tempêtes venant de l'océan Atlantique,
- pour la plaine maritime flamande (au nord), par les tempêtes descendant de la mer du Nord.

Événements de tempête

Le [tableau 3.21](#) présente les principales dates de tempête relevées dans les bases ANEMOC 2 (sélection des deux plus fortes tempêtes), BOBWA (sélection des deux plus fortes tempêtes) et AVAG (sélection de la plus forte tempête). Lorsque l'information est disponible, les hauteurs observées pour ces dates sont aussi renseignées pour CANDHIS. D'autres dates de tempête sont fournies en [9.4.11 Annexe 3.11](#) sur les fiches individuelles d'analyse des points d'observation.

Les répartitions des hauteurs significatives des vagues simulées sur la province (données ANEMOC 2) pour trois des plus fortes tempêtes relevées sont représentées sur la [figure 3.24](#). Les dates de tempête relevées pour les états de mer et celles relevées pour les surcotes météorologiques ([Tableaux 3.10](#), [3.13](#) et [3.21](#)) ne permettent pas d'identifier d'événement particulier ayant engendré de fortes hauteurs de vagues au large et de fortes surcotes météorologiques de pleine mer à la côte. A contrario, les dates de tempête relevées pour les états de mer et celles relevées pour les niveaux d'eau ([Tableaux 3.15](#) et [3.21](#)) montrent que les événements des 12 janvier 1978 et 28 février 1990 ont généré à la fois de fortes hauteurs de vagues au large et de forts niveaux d'eau de pleine mer à la côte. Cette différence entre les dates relevées pour les niveaux d'eau et les surcotes météorologiques vient de l'influence de la marée. Il faut toutefois noter que les relevés de dates présentés ne sont pas exhaustifs pour ces trois paramètres.

Tableau 3.20 : Estimation des hauteurs significatives décennales (Hs T10 ans) et centennales (Hs T100 ans) par ajustement statistique d'une loi de Pareto (GPD)

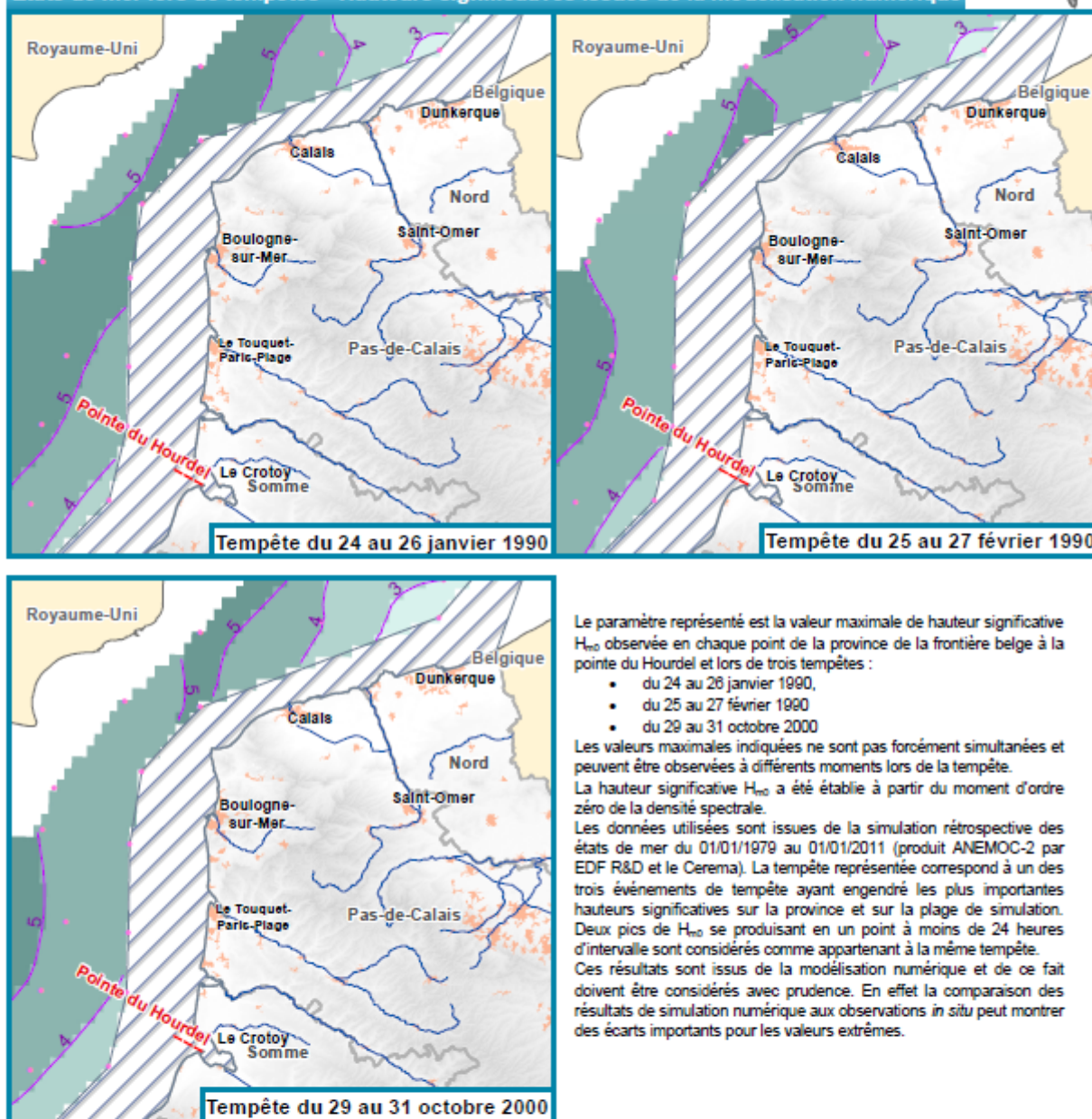
Points analysés	Hs T10 ans (m)	Hs T100 ans (m)
CANDHIS_05901 et CANDHIS_05902	4,64	-
ANEMOC2_Coast4763	5,85	6,01
ANEMOC2_Coast07314	4,83	4,93
ANEMOC2_Coast07512	4,96	5,28
ANEMOC2_Coast07659	4,03	4,22
BOBWA_Manche01	3,81	4,42
BOBWA_Manche02	3,82	4,41
BOBWA_Manche03	4,07	4,72

Dynamiques et évolution du littoral

Synthèse des connaissances de la frontière belge à la pointe du Hourdel



Etats de mer lors de tempêtes - Hauteurs significatives issues de la modélisation numérique

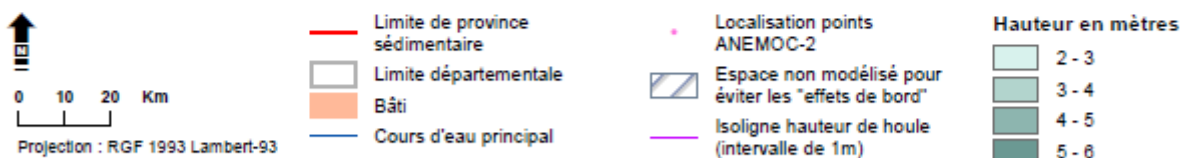


Le paramètre représenté est la valeur maximale de hauteur significative H_{m0} observée en chaque point de la province de la frontière belge à la pointe du Hourdel et lors de trois tempêtes :

- du 24 au 26 janvier 1990,
- du 25 au 27 février 1990
- du 29 au 31 octobre 2000

Les valeurs maximales indiquées ne sont pas forcément simultanées et peuvent être observées à différents moments lors de la tempête. La hauteur significative H_{m0} a été établie à partir du moment d'ordre zéro de la densité spectrale.

Les données utilisées sont issues de la simulation rétrospective des états de mer du 01/01/1979 au 01/01/2011 (produit ANEMOC-2 par EDF R&D et le Cerema). La tempête représentée correspond à un des trois événements de tempête ayant engendré les plus importantes hauteurs significatives sur la province et sur la plage de simulation. Deux pics de H_{m0} se produisant en un point à moins de 24 heures d'intervalle sont considérés comme appartenant à la même tempête. Ces résultats sont issus de la modélisation numérique et de ce fait doivent être considérés avec prudence. En effet la comparaison des résultats de simulation numérique aux observations *in situ* peut montrer des écarts importants pour les valeurs extrêmes.



Pour en savoir plus : www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr

Source - Copyrights :
Province sédimentaire - Cerema & MEEM
Bathymétrie de métropole - Ifremer
Pays limitrophes - EEA
Cours d'eau - BD Carthage

ANEMOC-2 - EDF R&D LNHE & Cerema
GEOFLA® - ©IGN Paris Reproduction interdite
Occupation du sol - Corine Land Cover 2012
BD Alti® - ©IGN Paris Reproduction interdite



Figure 3.24 : Répartition des hauteurs significatives lors du passage des tempêtes du 25 janvier 1990, 28 février 1990 et le 30 octobre 2000 (simulations ANEMOC 2)

Tableau 3.21 : Principaux événements de tempêtes relevés sur les périodes d'observation (hauteurs significatives $H_{1/3}$ ou H_{m0} en mètres et directions Dir_{moy} ou Dir_p). Les cellules grisées correspondent aux périodes sans donnée.

Base	CANDHIS	ANEMOC 2 (01/01/1979 – 31/12/2010)								AVAG (07/12/1999 – 10/12/2013)	
		Coast4763		Coast7314		Coast7512		Coast7659		Dunkerque	Gris-Nez
Date	$H_{1/3}$	H_{m0}	Dir_{moy}	H_{m0}	Dir_{moy}	H_{m0}	Dir_{moy}	H_{m0}	Dir_{moy}	H_{m0}	H_{m0}
12/01/1978											
15/12/1979		5,85	254°	4,75	238°						
03/03/1984								4,11	350°		
25/01/1990		6,02	247°	4,97	230°	5,27	215°				
28/02/1990		5,81	260°								
12/12/1990								4,20	350°		
09/12/1993											
29/10/1996		5,85	250°	4,79	234°	4,81	216°				
04/04/2000										4,00	
30/10/2000	4,79			4,83	215°	5,28	202°				5,20

3.2.2.b. Propagation du large à la côte

La propagation des vagues du large à la côte est illustrée avec les données ANEMOC 2 pour deux événements particuliers (Figures 3.25 et 3.26) : le premier correspond à une tempête venant de l'ouest (tempête du 25 janvier 1990 – Figure 3.25) et le deuxième à une tempête venant du nord-est (tempête du 19 février 1996 – Figure 3.26). Ces tempêtes sont caractéristiques des deux régimes observés sur la province (hauteur significative décennale ou plus, pour une direction de provenance centrée sur le secteur de provenance du régime, identifié à partir de l'ensemble des événements tempêtes ANEMOC 2 et BOBWA fournis en 9.4.11 Annexe 3.11). Elles ne correspondent pas forcément aux plus fortes tempêtes des régimes identifiés, en particulier si les directions de provenance de ces dernières sont jugées moins représentatives.

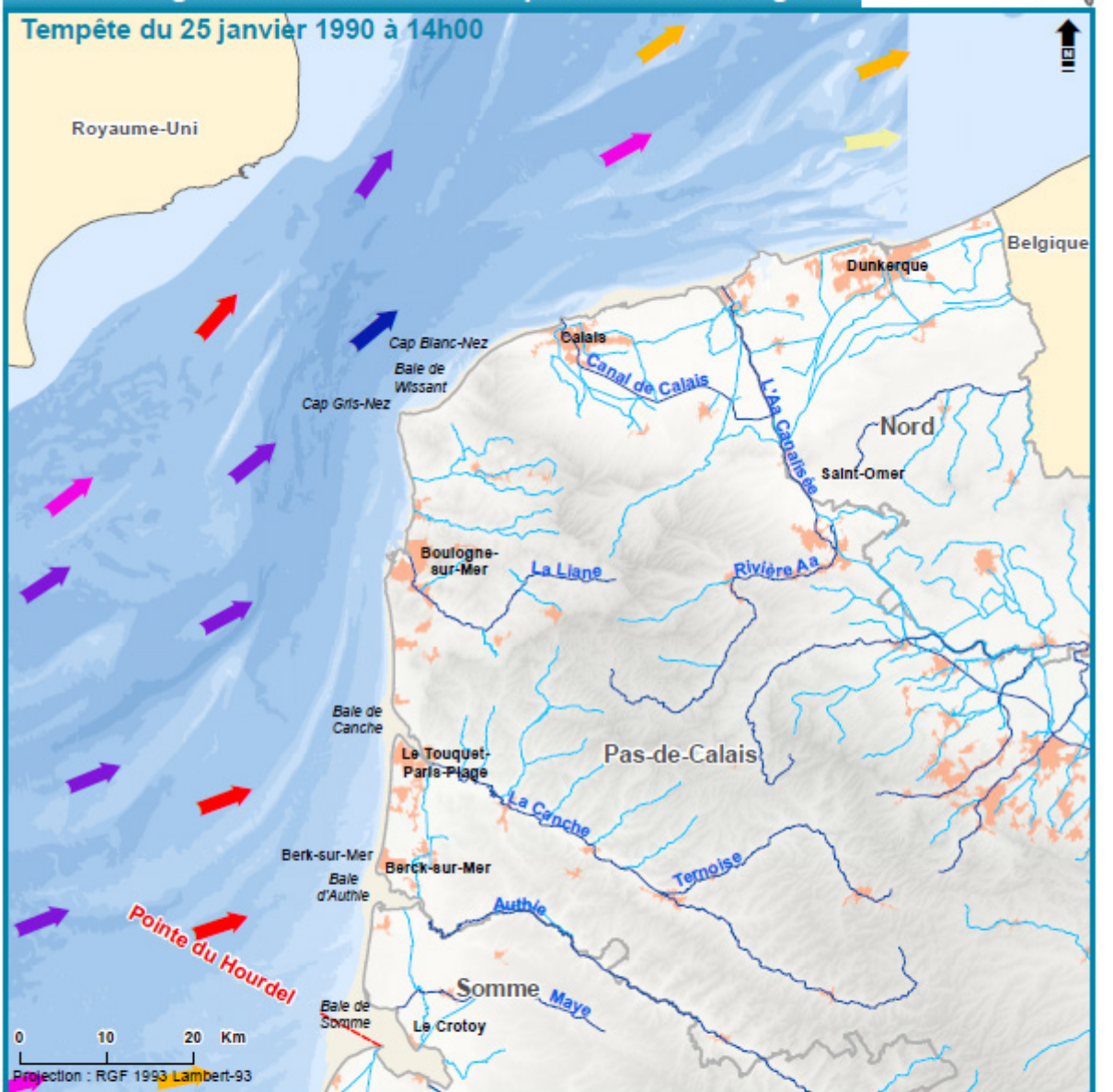
Ces figures montrent que :

- la façade ouest de la province (de la baie de Somme au cap Gris-Nez) est plus particulièrement exposée aux tempêtes venant de l'océan Atlantique avec des directions de provenance des vagues normales à la côte ; les hauteurs de vagues correspondant à la tempête venant de la mer du Nord sont fortement atténuées avec des directions de provenance parallèles à la côte ;
- la façade nord de la province (du cap Gris-Nez à la frontière belge) est plus particulièrement exposée aux tempêtes venant de la mer du Nord avec des directions de provenance des vagues normales à la côte ; les hauteurs de vagues correspondant à la tempête venant de l'océan Atlantique restent importantes mais avec des directions de provenance parallèles à la côte.

Dynamiques et évolution du littoral

Synthèse des connaissances de la frontière belge à la pointe du Hourdel

Hauteurs significatives et direction de provenance des vagues



— Limite de province sédimentaire

— Cours d'eau principal

— Cours d'eau secondaire

Hauteur (en m) et direction des vagues

↑ 4.1 - 4.5

↑ 4.6 - 5.0

↑ 5.1 - 5.5

↑ 5.6 - 6.5

↑ 2.5 - 3.0

↑ 3.1 - 3.5

↑ 3.6 - 4.0

■ Bâti

□ Limite départementale

Les hauteurs significatives (Hm0) et directions de provenance (directions moyennes) représentées sont issues de la modélisation numérique. La date et l'heure de la représentation correspondent au maximum de hauteur significative modélisée sur un point pris en référence au centre de la zone.

Les données utilisées sont issues de la simulation rétrospective des états de mer du 1^{er} janvier 1979 au 31 décembre 2010 (produit ANEMOC-2 par EDF R&D et le Cerema). Ces résultats de modélisation doivent être considérés avec prudence, en particulier pour des profondeurs inférieures à 20 mètres.

Pour en savoir plus : www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr

Source - Copyrights :
Province sédimentaire - Cerema & MEEM
ANEMOC-2 - EDF R&D LNHE & Cerema
Bathymétrie de métropole - Ifremer
Cours d'eau - BD Carthage

Pays limitrophes - EEA
GEOFLA® - ©IGN Paris - Reproduction interdite
Occupation du sol - Corine Land Cover 2012
BD Alti® - ©IGN Paris - Reproduction interdite

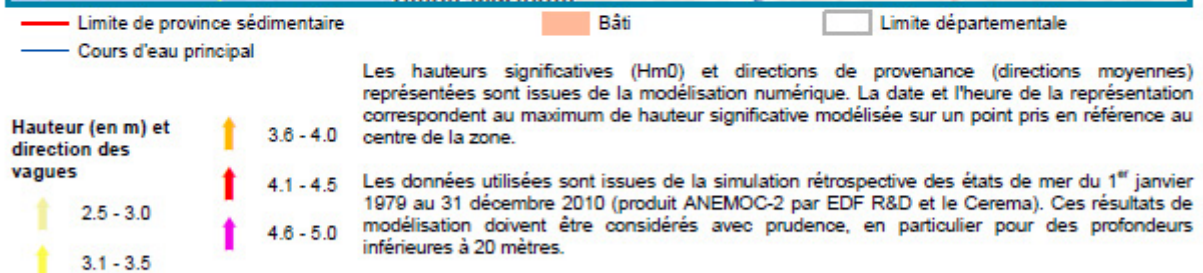
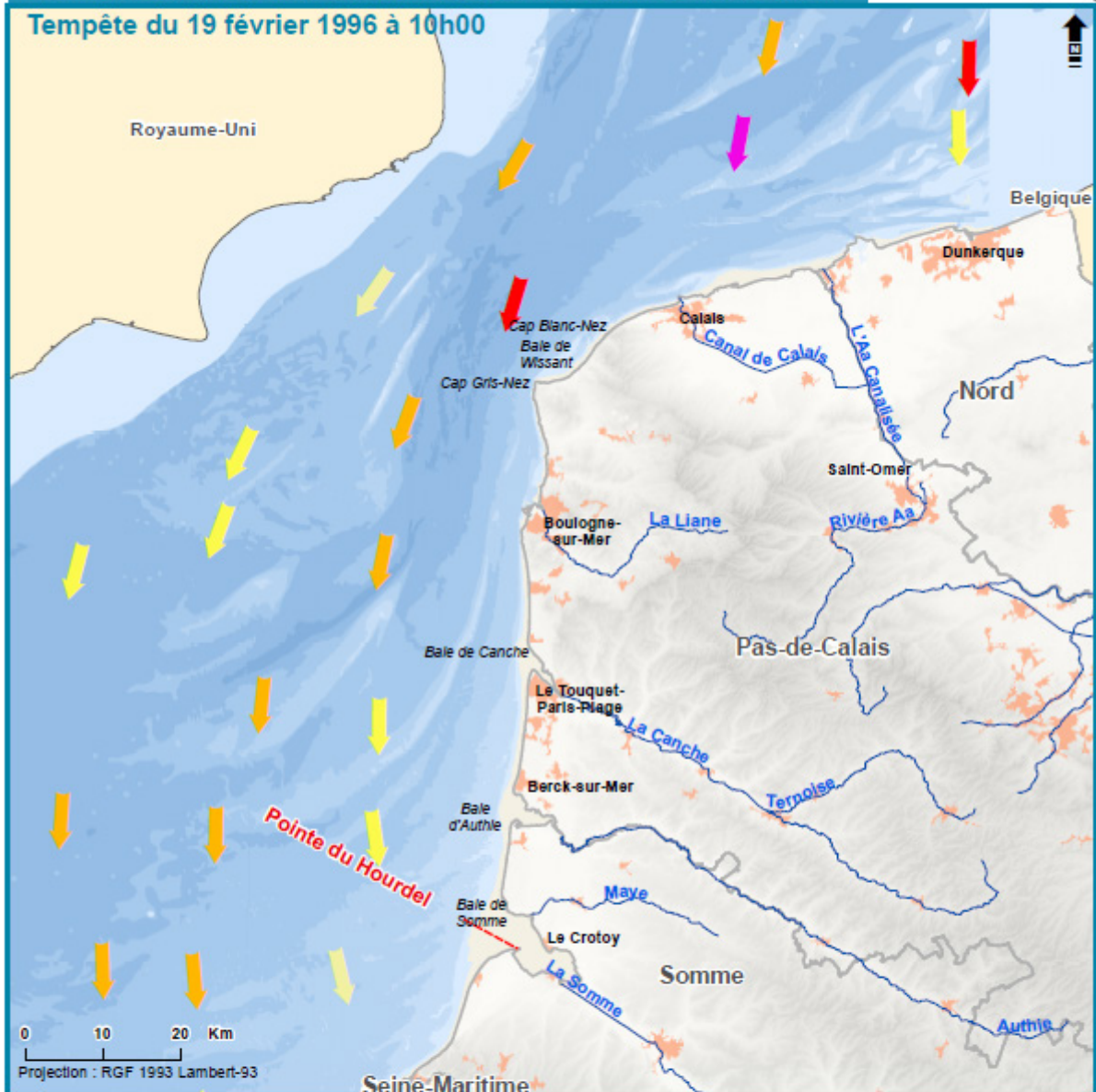


Figure 3.25 : Hauteurs significatives et directions de provenance des vagues lors de la tempête du 25 janvier 1990 (simulations ANEMOC 2)

Dynamiques et évolution du littoral

Synthèse des connaissances de la frontière belge à la pointe du Hourdel

Hauteurs significatives et direction de provenance des vagues



Pour en savoir plus : www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr

Source - Copyrights :
 Province sédimentaire - Cerema & MEEM
 ANEMOC-2 - EDF R&D LNHE & Cerema
 Bathymétrie de métropole - Ifremer
 Cours d'eau - BD Carthage

Pays limitrophes - EEA
 GEOFLA® - ©IGN Paris - Reproduction interdite
 Occupation du sol - Corine Land Cover 2012
 BD Alti® - ©IGN Paris - Reproduction interdite



Figure 3.26 : Hauteurs significatives et directions de provenance des vagues lors de la tempête du 19 février 1996 (simulations ANEMOC 2)

3.2.3 Courants

Les courants marins ont deux origines bien distinctes :

- les courants de marée dits « gravitationnels » : leur origine est la force génératrice des marées dont la cause première est l'attraction newtonienne ;
- les courants dits « radiationnels » : leur origine plus ou moins lointaine est le rayonnement solaire, responsable de phénomènes tels que le régime des vents, le cycle des saisons, les perturbations météorologiques, ou les variations spatiales de densité des océans pouvant générer des mouvements au sein des masses d'eau.

Sont ainsi détaillés ci-après les courants généraux, issus de la circulation océanique globale, les courants gravitationnels de marée, les courants de houle puis les courants de surface ou liés au vent.

3.2.3.a. Courants généraux

Les courants généraux en Manche sont issus d'une branche du Gulf Stream provenant de l'Atlantique nord dont la direction est nord-nord-est. Cependant, ces courants sont quasi inexistant (de l'ordre de quelques centimètres par seconde) par rapport aux courants de marée. Par conséquent, ils jouent un rôle négligeable dans les processus sédimentaires.

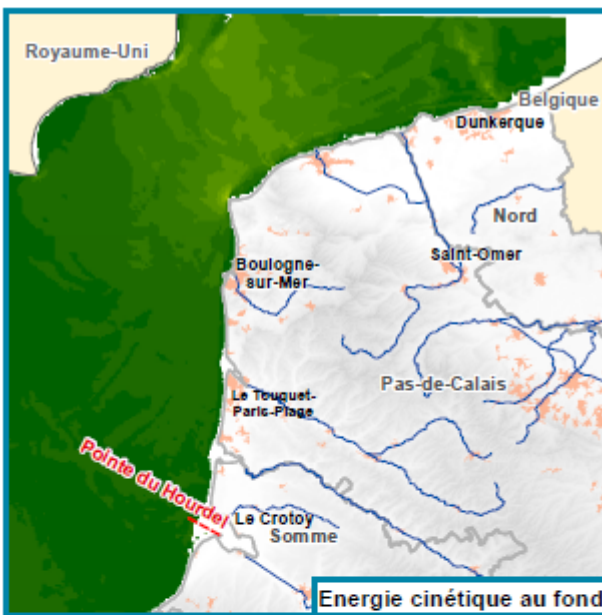
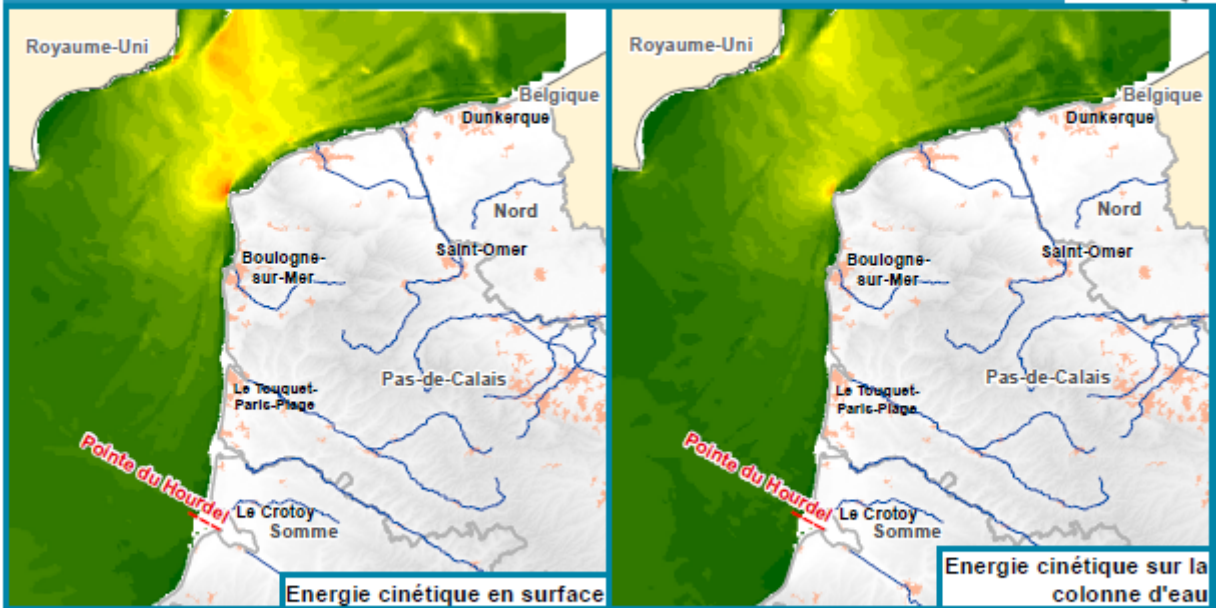
L'unité de recherche DYNECO de l'Ifremer a produit une base de données hydrodynamique réalisée avec le modèle MARS3D et la librairie AGRIF le long des façades Atlantique, Manche et mer du Nord. Une simulation de six années allant de 2010 à 2015 a été réalisée sur l'emprise de la province sédimentaire (Figures 3.27 et 3.28).

Dynamiques et évolution du littoral

Synthèse des connaissances de la frontière belge à la pointe du Hourdel



Energie cinétique des courants marins - Climatologie pour la période 2010 - 2015

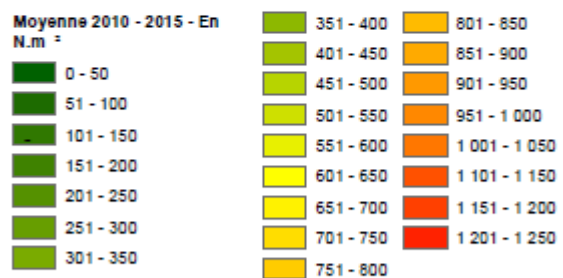


Cette climatologie a été établie en 2015, dans le cadre du projet EMODnet Seabed Habitats, à partir de la base de données hydrodynamique réalisée avec le modèle MARS3D et la librairie AGRIF (V10.10 - <http://www.ljk.imag.fr/MOISE/AGRIF/>) le long des façades Atlantique, Manche et mer du Nord. Cette base de données est maintenue et mise à jour par l'unité de recherche DYNECO de l'Ifremer.

Une simulation de six années allant de 2010 à 2015 a été réalisée pour l'ensemble des emprises couvrant ces façades françaises. Les caractéristiques de simulation sont les suivantes :

- Résolution spatiale horizontale : 500 m
- Résolution spatiale verticale : 40 niveaux (Sigma généralisés)
- Résolution temporelle : 1 heure

La climatologie représentée ici a été calculée à partir des résultats de cette simulation. La variable prise en compte est l'énergie cinétique induite par le courant, dont la formule mathématique est $0,5mv^2$, m étant la masse volumique de l'eau de mer (1027 kg.m^{-3}) et v la vitesse des courants. Les valeurs sont exprimées en N.m^2 (Newton par mètre carré). La moyenne a été calculée à partir de chaque valeur de la période 2010-2015 pour la surface, la moyenne verticale et le fond.



Pour en savoir plus : www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr

Source - Copyrights :
Rejeu hydrodynamique - IFREMER-DYNECO
Province sédimentaire - Cerema & MEEM
Pays limitrophes - EEA

GEOFLA® - ©IGN Paris Reproduction interdite
Occupation du sol - Corine Land Cover 2012
Cours d'eau - BD Carthage
BD Alti® - ©IGN Paris Reproduction interdite



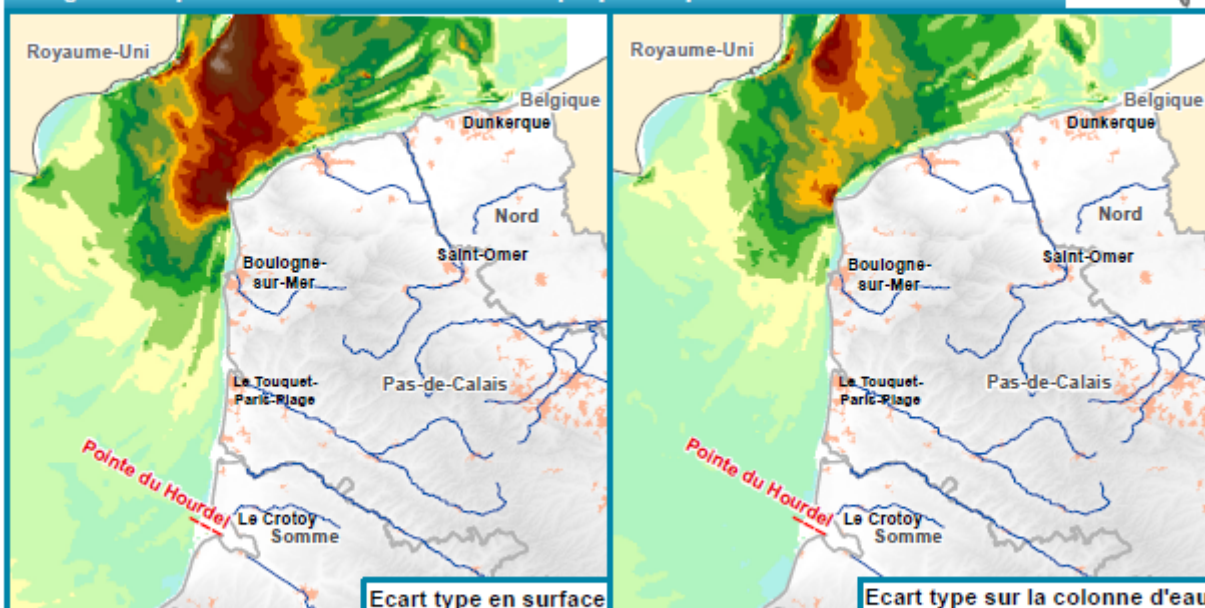
Figure 3.27 : Énergie cinétique moyenne des courants marins sur la période 2010-2015

Dynamiques et évolution du littoral

Synthèse des connaissances de la frontière belge à la pointe du Hourdel



Energie cinétique des courants marins - Chronique pour la période 2010 - 2015



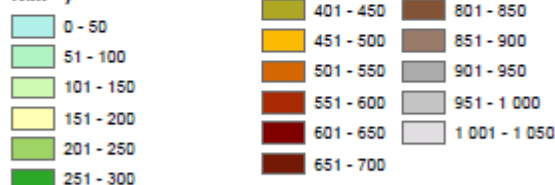
Cette chronique a été établie en 2015, dans le cadre du projet EMODnet Seabed Habitats, à partir de la base de données hydrodynamique réalisée avec le modèle MARS3D et la librairie AGRIF (V10.10 - <http://www.ljk.imag.fr/MOISE/AGRIF/>) le long des façades Atlantique, Manche et mer du Nord. Cette base de données est maintenue et mise à jour par l'unité de recherche DYNECO de l'Ifremer.

Une simulation de six années allant de 2010 à 2015 a été réalisée pour l'ensemble des emprises couvrant ces façades françaises. Les caractéristiques de simulation sont les suivantes :

- Résolution spatiale horizontale : 500 m
- Résolution spatiale verticale : 40 niveaux (Sigma généralisés)
- Résolution temporelle : 1 heure

La chronique représentée ici a été calculée à partir des résultats de cette simulation. La variable prise en compte est l'énergie cinétique induite par le courant, dont la formule mathématique est $0.5mv^2$, m étant la masse volumique de l'eau de mer (1027 kg.m^{-3}) et v la vitesse des courants. Les valeurs sont exprimées en N.m^{-2} (Newton par mètre carré). La moyenne a été calculée à partir de chaque valeur de la période 2010-2015 pour la surface, la moyenne verticale et le fond.

Ecart type calculé sur la période 2010 - 2015 (en N.m^{-2})



0 10 20 Km

Projection : RGF 1993 Lambert-93

- Limite de province sédimentaire
- Limite départementale
- Bâti
- Cours d'eau principal

Pour en savoir plus : www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr

Source - Copyrights :
Rejeu hydrodynamique - IFREMER-DYNECO
Province sédimentaire - Cerema & MEEM
Pays limitrophes - EEA

GEOFLA® - ©IGN Paris Reproduction interdite
Occupation du sol - Corine Land Cover 2012
Cours d'eau - BD Carthage
BD Alti® - ©IGN Paris Reproduction interdite



Figure 3.28 : Écart type de l'énergie cinétique des courants marins sur la période 2010-2015

3.2.3.b. Courants de marée

L'évolution des courants de marée sur la province répond à une alternance de flot portant vers l'est à nord-est et de jusant portant vers l'ouest à sud-ouest. Ainsi, au cours d'un cycle de marée, deux renversements de courant (changement de direction), caractérisés par des courants faibles, se produisent (Figures 3.29, 3.30 et 3.31) :

- à marée basse (6 heures avant la pleine mer de Calais), le courant porte vers le sud-ouest sur l'ensemble de la zone ;
- à marée montante (au cours des 6 heures suivantes), l'onde de marée se propage progressivement du sud vers le nord entraînant un renversement des courants ;
- à marée haute (à Calais), les courants sont orientés vers le nord-est sur l'ensemble de la zone ;
- à marée descendante, une deuxième renverse de courant se propage du nord au sud.

Sur la province, le courant de marée est dissymétrique, c'est-à-dire que le courant de flot est plus rapide que celui de jusant, d'où la présence d'un courant de dérive littorale vers le nord (Augris *et al.*, 1990). Des roses de courants ont été établies par le Shom en vives-eaux et mortes-eaux à partir de mesures *in situ* issues de la base de données du Shom « Tide database » (Figure 3.29). Certaines de ces statistiques sont diffusées sur les cartes marines sous forme de tableaux de courants (référéncés par rapport à une pleine mer ou basse mer d'un port de référence).

Sur la façade ouest de la province, la zone du large se caractérise par une inflexion progressive des directions de courant de marée, passant de sud-ouest/nord-est au sud de Boulogne-sur-Mer, à sud/nord au nord de Boulogne-sur-Mer. Sur la façade nord de la province, les courants de surface et de fond ont une direction sud-ouest/nord-est qui s'infléchit progressivement d'ouest en est. La vitesse des courants, en marée de vive-eau, d'une moyenne de 4 nœuds (soit 2,1 m/s) devant les sites des caps Blanc-Nez et Gris-Nez, passe à 1,5 nœuds (soit 0,8 m/s) devant la frontière franco-belge. La variation de vitesse n'est cependant pas régulière. Les courants accélèrent devant Dunkerque du fait de la présence d'importants bancs sableux (Augris *et al.*, 1990).

Manche orientale

Légèrement tournants au nord et au centre de la zone, les courants deviennent giratoires devant la baie de Somme. Le long des côtes, le courant est pratiquement alternatif et sensiblement parallèle à la côte. Le courant de flot portant au nord-est devient traversier en baie de Somme, devant les estuaires

de l'Authie (point 3 – Figure 3.29) et de la Canche (point 4 – Figure 3.29). En baie de Somme, les courants sont souvent forts, avec des vitesses comprises entre 1,5 nœuds et 2 nœuds (soit entre 0,8 et 1 m/s) (Figure 3.29) et notamment un maximum local supérieur à 3 nœuds (soit supérieur à 1,5 m/s) à la sortie de l'estuaire (vers Cayeux-sur-Mer).

Au large, entre la baie de Somme et Boulogne-sur-Mer, les courants de marée n'excèdent pas 2 nœuds (soit 1 m/s) au cours d'un cycle de marée. Au large de Boulogne-sur-Mer, les courants sont généralement supérieurs à 2 nœuds (soit 1 m/s) entre 4 heures avant la pleine mer et une heure après la pleine mer de Boulogne-sur-Mer. De forts courants, supérieurs à 2,5 nœuds (soit 1,3 m/s), affectent la sortie du port de Boulogne-sur-Mer à l'heure de la pleine mer et une heure après : les maxima de courants atteignent 2,8 nœuds (soit 1,4 m/s). L'intensité des courants croît vers le nord de la Manche.

Sur l'ensemble de la zone côtière, les courants sont généralement parallèles à la côte. Une branche du courant entre dans la rade d'Ambleteuse, générant une divergence ou une convergence selon le cycle de marée au niveau du port de Boulogne-sur-Mer. Le renversement de marée affecte la zone en créant une dynamique locale particulière liée à la géographie du lieu :

- à marée montante, trois heures avant la pleine mer de Boulogne-sur-Mer, les courants portent en général vers le sud et des courants orientés vers la côte apparaissent dans la rade d'Ambleteuse. Deux heures avant la pleine mer, alors que les courants sont faibles au large de Boulogne-sur-Mer, un contre-courant longeant la côte vers le nord se produit dans la rade d'Ambleteuse. Un même contre-courant portant vers le sud apparaît à marée descendante trois ou quatre heures après la pleine mer ;
- lors du renversement des courants de marée, la baie de Wissant est également sujette à de fortes variations spatiales entre le large et la zone côtière, avec un contre-courant qui peut être critique pour la navigation deux heures avant la pleine mer et trois à quatre heures après la pleine mer. Lorsque le courant de marée est bien établi, un ralentissement des courants par rapport au large est observé dans cette baie.

Bien que significatifs, ces contre-courants restent inférieurs à 1 nœud (soit 0,5 m/s).

Détroit du Pas de Calais

Le rétrécissement de la Manche au niveau du Pas de Calais induit des phénomènes de convergence dans le détroit et de divergence en aval de ce détroit, aux moments où les courants sont les plus forts. Dans le détroit, la convergence provoque une accélération des courants qui peuvent dépasser 3,5 nœuds (soit 1,8 m/s) vers le nord-est au moment de la pleine mer de Calais. Des courants supérieurs à 3 nœuds (soit 1,5 m/s) vers le sud-ouest s'y produisent entre 5 et 4 heures avant la pleine mer. Au niveau du Pas de Calais, les renversements se produisent 2 heures avant la pleine mer et 4 heures après la pleine mer de Calais.

Au cap Gris-Nez, de très forts courants apparaissent, supérieurs à 2,8 nœuds (soit 1,4 m/s), entre 4 heures et 3 heures avant la pleine mer ainsi qu'entre la pleine mer et 2 heures après la pleine mer, atteignant des maxima supérieurs à 3,8 nœuds (soit 2 m/s) à l'heure de la pleine mer et une heure après. La dynamique des courants y est complexe.

Mer du Nord

Le flot porte vers le nord-est autour de la pleine mer et le jusant porte vers le sud-ouest peu après la basse mer. Le flot est plus fort mais dure moins longtemps que le jusant. Les courants côtiers sont relativement faibles et subissent l'influence des structures portuaires de la zone (port de Dunkerque notamment).

Les maxima de courants surviennent dans l'est du domaine à l'approche du Pas de Calais (> 3,4 nœuds, soit 1,7 m/s). Au large du port de Calais, les courants atteignent parfois plus de 2,8 nœuds (soit 1,4 m/s) vers le sud-ouest entre 6 et 4 heures avant la pleine mer, et vers le nord-est entre une heure avant et une heure après la pleine mer. Le maximum de 3,3 nœuds (soit 1,7 m/s) vers le nord-est est atteint au moment de la pleine mer. Devant le port de Calais, aux moments des

renverses de courant, soit 2 heures avant et 4 heures après la pleine mer, les courants longent la côte respectivement vers le nord-est et vers le sud-ouest avec des vitesses maximales respectives de 1,7 et 0,9 nœuds (soit de 0,9 à 0,5 m/s). À ces mêmes instants, les courants sont très faibles au large de Calais (moins de 0,5 nœuds, soit moins de 0,3 m/s).

Au large du port de Dunkerque, les valeurs maximales de courant n'excèdent pas 2,6 nœuds (soit 1,3 m/s).

Les bancs de sables présents devant Calais et Dunkerque influent sur la direction des courants, ceux-ci suivent alors les « chenaux » entre les bancs.

Sur le site des Hemmes de Marck (entre Calais et Dunkerque), les courants de marée dominant sur les processus associés aux vagues en condition de vive-eau type : cette dominance des courants se traduit notamment lors de la phase de remplissage par une chenalisation (Figure 3.32) dans la zone entre la plage et le premier banc sableux, mais aussi à mi-flot et mi-jusant, périodes durant lesquelles les vitesses des courants sont les plus élevées. Les courants sont particulièrement intenses sur la plateforme où sont enregistrés, sur des faibles tranches d'eau, des courants laminaires rapides induits par la vidange du chenal principal à l'est (Aubry, 2010).

Au niveau du banc Hills, sur les côtes de la mer du Nord, une chenalisation des courants entre ce banc et la côte induirait de forts courants en face de Zuydcoote, où le banc est plus haut et se rapproche de la côte (voir 6.1.8.b. ; Héquette *et al.*, 2009 ; Maspataud *et al.*, 2013). Ce phénomène expliquerait la présence d'un secteur en érosion à l'ouest, au niveau des dunes Dewulf, où le niveau du haut de plage est plus bas, et de secteurs stables et en accrétion à l'est au niveau des dunes Marchand et du Perroquet respectivement, où le niveau en haut de plage est plus élevé (Maspataud *et al.*, 2013).

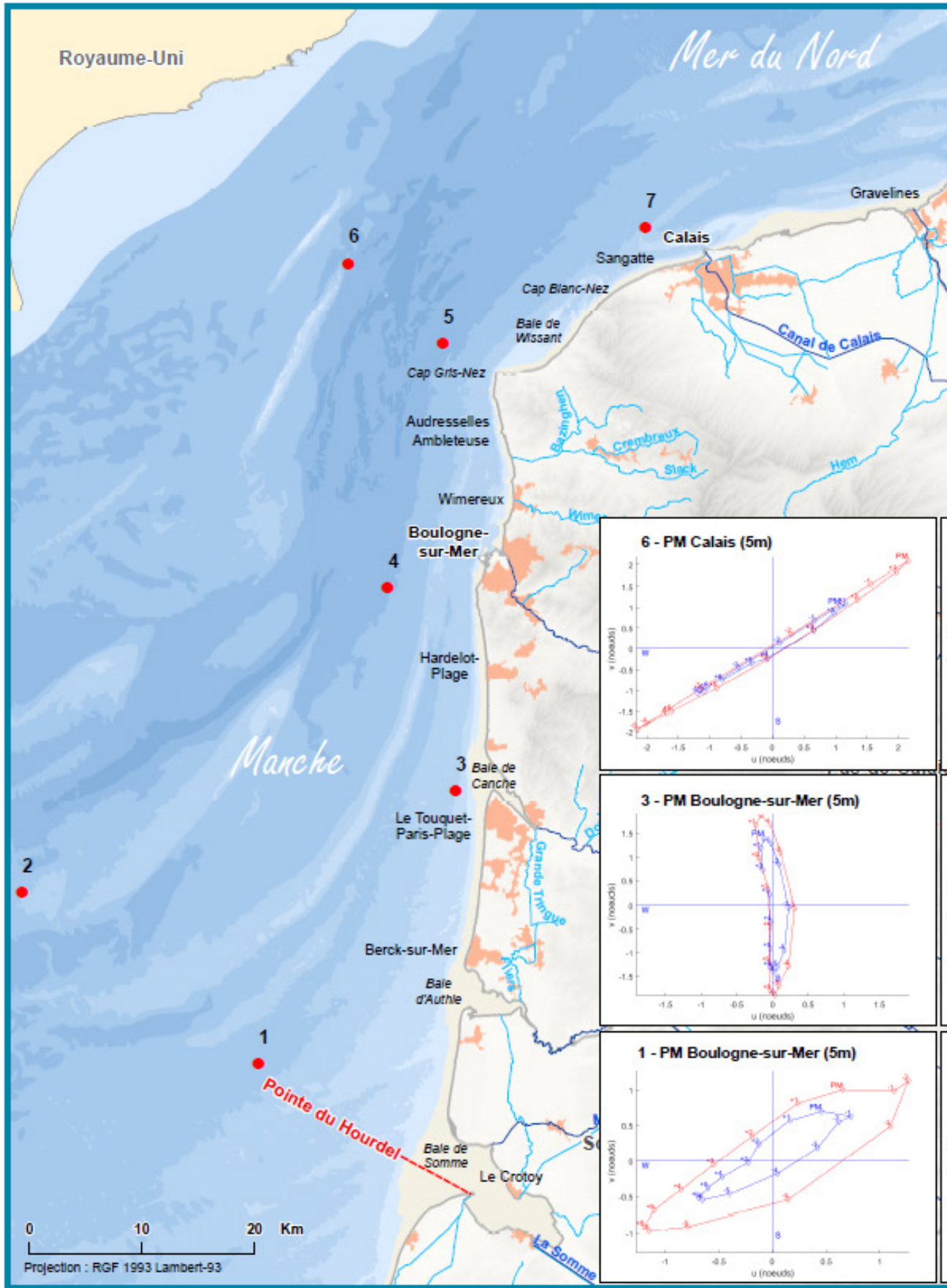


Figure 3.29 : Roses de courants établies à partir de mesures in situ (Source : Shom)

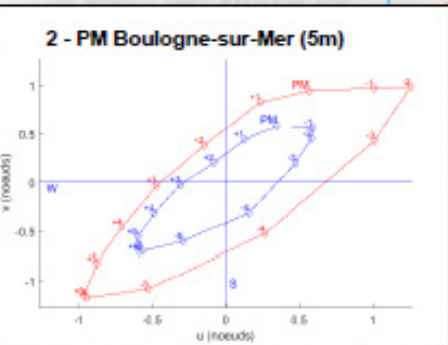
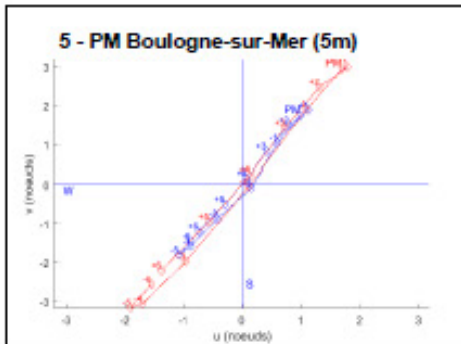
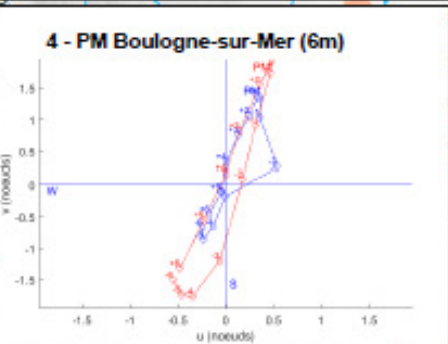
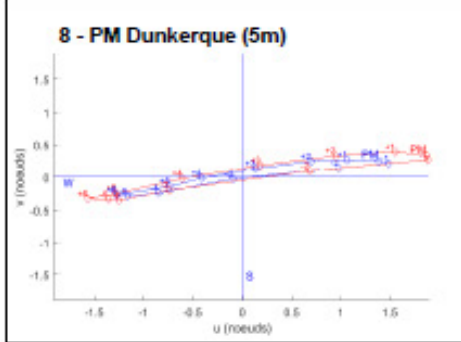
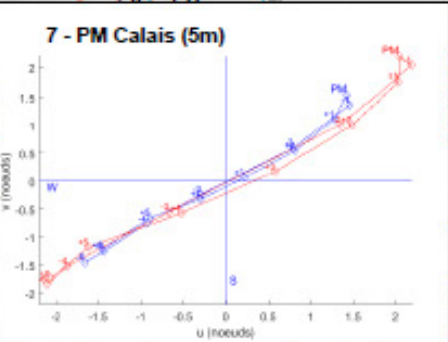
Dynamiques et évolution du littoral

Synthèse des connaissances
de la frontière belge à la pointe du Hourdel



Roses de courant

- Limite de province sédimentaire
- Cours d'eau principal
- Cours d'eau secondaire
- Bâti
- Limite départementale
- Position des roses de courant



Pour en savoir plus : www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr

Source - Copyrights :
Province sédimentaire - Cerema & MEEM
Roses de courant - SHOM
Bathymétrie de métropole - Ifremer
Pays limitrophes - EEA
GEOLLA® - ©IGN Paris - Reproduction interdite
Occupation du sol - Corine Land Cover 2012
Cours d'eau - BD Carthage
BD Alti® - ©IGN Paris - Reproduction interdite



Dynamiques et évolution du littoral

Synthèse des connaissances de la frontière belge à la pointe du Hourdel



Courant de marée de surface - Avant et après la pleine mer de mortes-eaux (coefficient de 45)

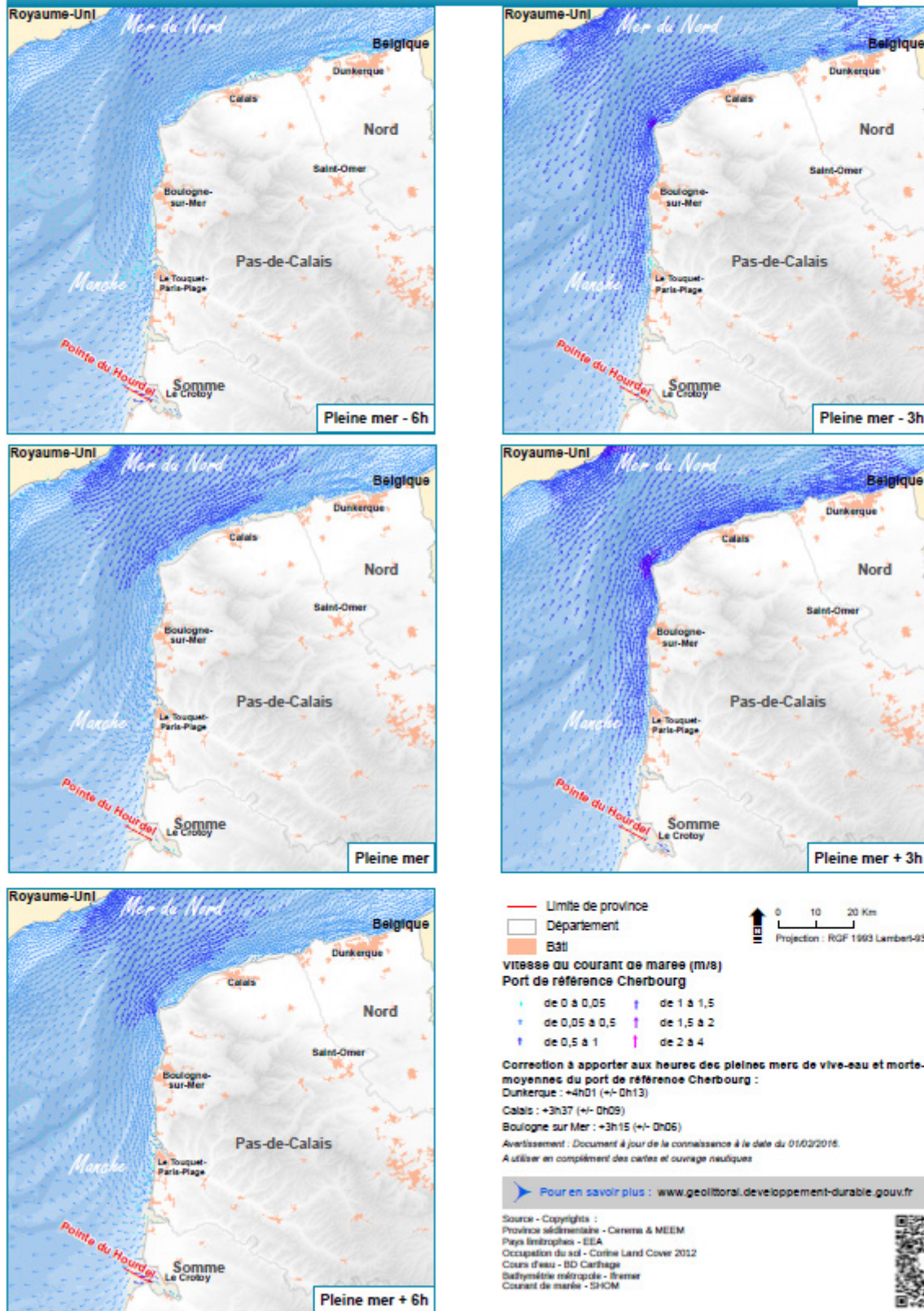


Figure 3.30 : Courants de marée de surface avant et après la pleine mer de mortes-eaux (coef.45)

Dynamiques et évolution du littoral

Synthèse des connaissances de la frontière belge à la pointe du Hourdel



Courant de marée de surface - Avant et après la pleine mer de vives-eaux (coefficient de 95)

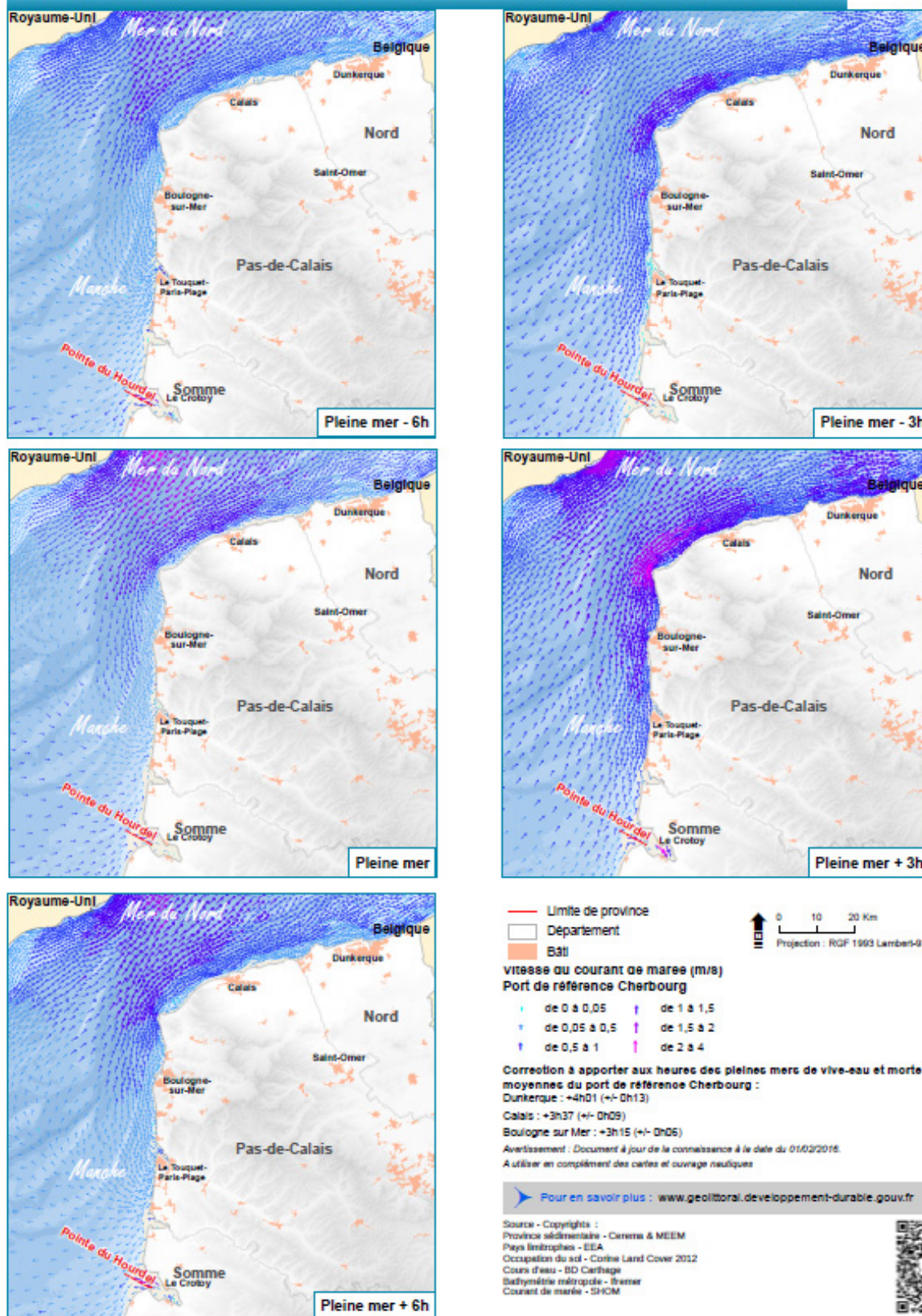


Figure 3.31 : Courants de marée de surface avant et après la pleine mer de vives-eaux (coef.95)

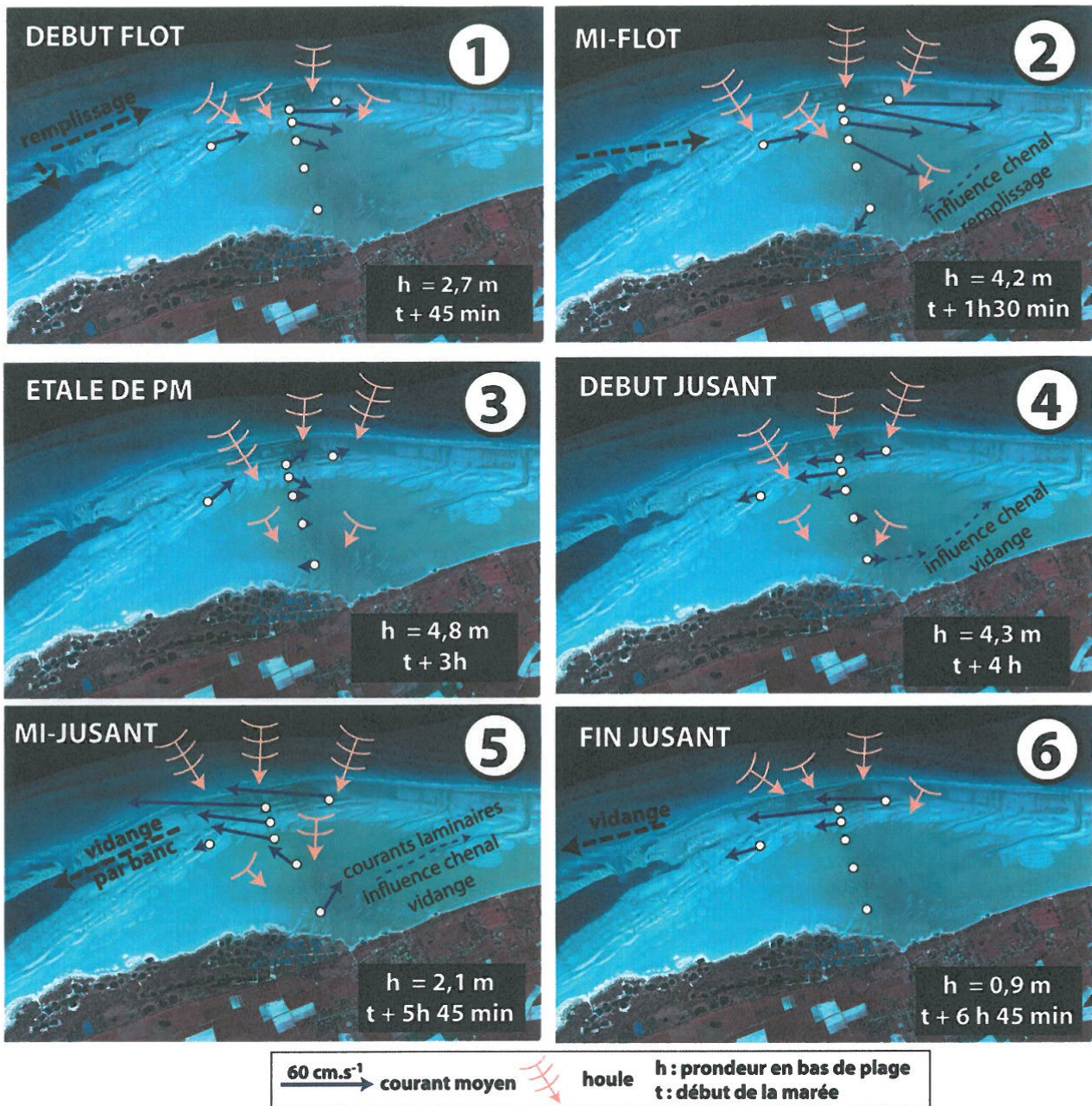


Figure 3.32 : Synthèse de l'hydrodynamisme sur l'ensemble de la plate-forme au droit des Hemmes de Marck lors d'une marée classique de vive-eau. Cette figure présente une succession de 6 moments relatifs à la marée entre le début du flot (phase de remplissage par chenalisation), le flot, l'étalement de pleine mer et le jusant (vidange du secteur) sur fond de photographie aérienne en infrarouge. La partie orientale de cet espace correspond à une légère dépression topographique matérialisée sur la photo par des teintes plus verdâtres au milieu de laquelle un chenal de vidange s'écoule en direction de l'est-sud-est avant de partir vers le nord. À noter que cette vidange s'effectue préférentiellement en haut de plate-forme et en bas de plage, par l'espace compris entre la plage et le premier banc sableux ; à $t =$ basse mer, de l'eau superficielle peut persister dans la dépression topographique de la plate-forme ; elle est lentement évacuée par drainage (d'après Aubry, 2010)

3.2.3.c. Courants de houle

Lorsque une houle approche du rivage avec une certaine obliquité, son déferlement donne naissance à un courant parallèle à la côte. Sur une plage régulière, l'intensité de ce courant peut être évaluée à partir de la hauteur de la houle, de son incidence sur le rivage et de la pente de la plage. Ce courant peut être important et dépasser le mètre par seconde (Latteux, 2001).

3.2.3.d. Courants de surface et courants liés au vent

Le littoral de la façade Manche de la province présente des marnages pouvant dépasser 8 mètres et des courants de l'ordre de 2 m/s, ce qui le classe parmi les littoraux mégatidaux. Ces caractéristiques font de lui une zone d'influence d'eau douce (ROFI¹⁹), où les apports d'eau douce continentale contribuent aux gradients de densité et aux mouvements baroclines sur de grands espaces adjacents aux estuaires. Ces apports en eau moins dense sont responsables de l'existence d'un régime hydrodynamique particulier. Dans les ROFI, le matériel en suspension émis par les rivières se dépose en zone côtière mais est souvent remis en suspension par les différents forçages physiques présents (houle, marée, vent, débit...). Une zone de convergence-divergence de courants de surface a également été identifiée en marge de la zone d'influence d'eau douce (ROFI) : sur la bande

côtière (< 30 m de profondeur), le frottement modifie les ellipses de courant de surface en inversant leur polarité (cyclonique) par rapport aux courants du large (ellipses anticycloniques). Les champs de courants alternent alors entre convergence (lorsqu'ils sont de face) et divergence (lorsqu'ils s'éloignent) au niveau d'une zone frontale (isobathe 30 m) (Figure 3.34). L'intensité du courant évolue selon la bathymétrie avec une intensification dans la zone du détroit et très localement au-dessus des bancs de sable (Figure 3.33). Ainsi, les courants résiduels de surface mettent en évidence la dérive résiduelle vers le nord avec une circulation plus complexe sur la Manche orientale, car la présence de caps, chenaux et bancs sableux génère la formation de tourbillons à de nombreux endroits (Figure 3.35-B). La morphologie sous-marine affecte fortement la distribution des courants en direction et en intensité (Figure 3.35-A-B). Cela se voit en particulier sur la façade de la Manche caractérisée au large par plusieurs bancs parallèles entre eux (voir 2.3.2). Les courants résiduels s'intensifient dans la zone côtière, soumise à l'effet de rejet d'eau douce, à 10-15 km au large (Figure 3.35-A). Les courants sont également liés au vent dont le sens provoque des variations d'intensité de la dérive vers le nord du fleuve côtier (voir 3.3.1.b et Figure 3.36) (Jouanneau, 2013).

Aucune étude similaire n'est connue à ce jour sur les courants de surface dans la mer du Nord.

19 Region Of Freshwater Influence (Simpson, 1997).

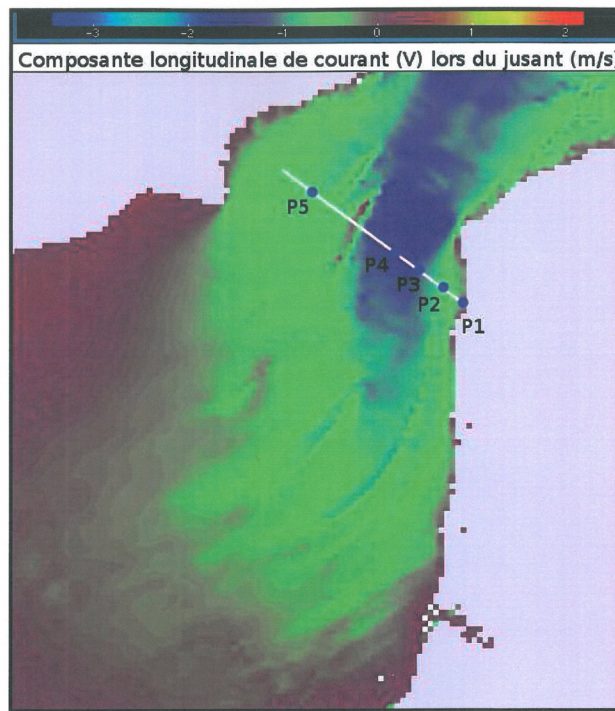


Figure 3.33 : Circulation de surface instantanée au moment du jusant. La vitesse du courant s'intensifie dans la zone du détroit du Pas de Calais (Jouanneau, 2013)

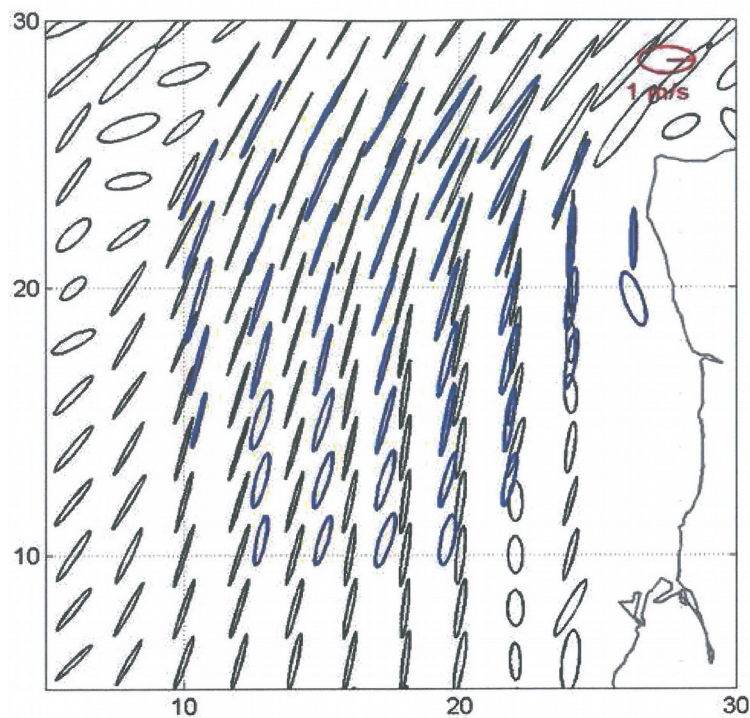


Figure 3.34 : Ellipses des courants de surface calculés par MAR3D²⁰ (en noir) et mesurés par les radars (en bleu) pendant un cycle de marée le 05/05/2003. L'orientation des ellipses montre que les courants sont fortement influencés par la configuration du bassin et par la bathymétrie qui tend à aligner les axes majeurs suivant les contours bathymétriques (Jouanneau, 2013)

20 Le modèle MARS-3D (Lazure et Dumas, 2007) est un modèle à surface libre aux différences finies fondé sur la résolution des équations de Navier-Stokes. Il introduit l'approximation de Boussinesq et l'hypothèse d'hydrostaticité sur la verticale. Ce modèle, inspiré de celui de Blumberg et Mellor (1987), est basé sur la séparation des modes barotropes et baroclines.

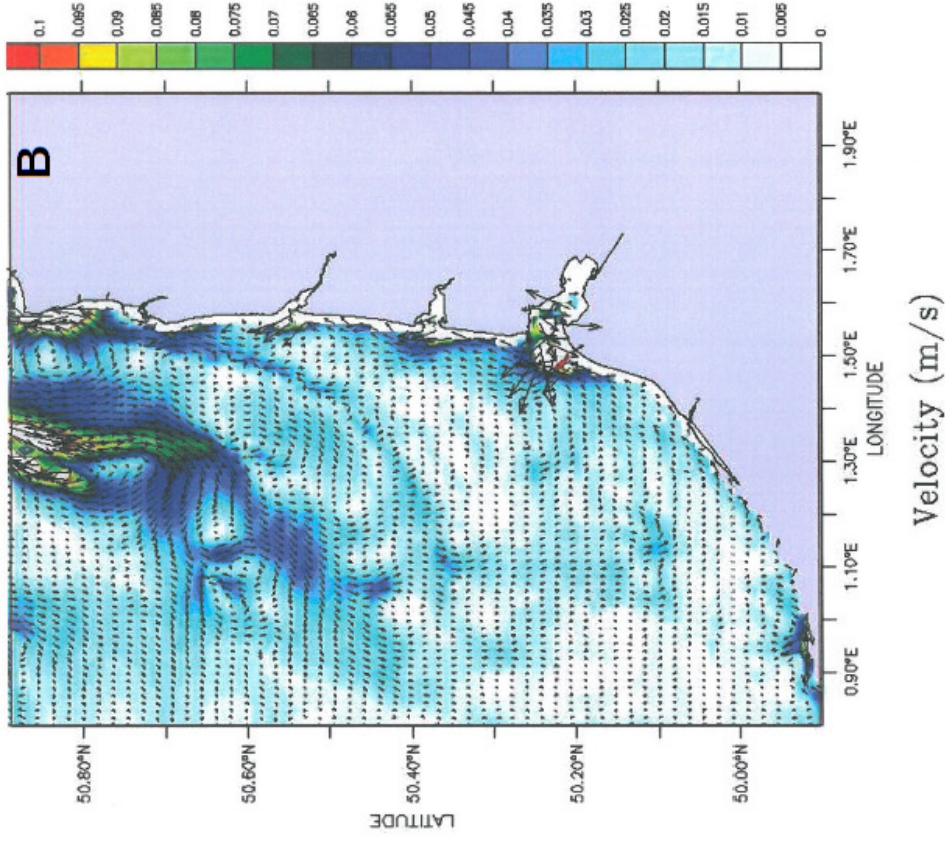
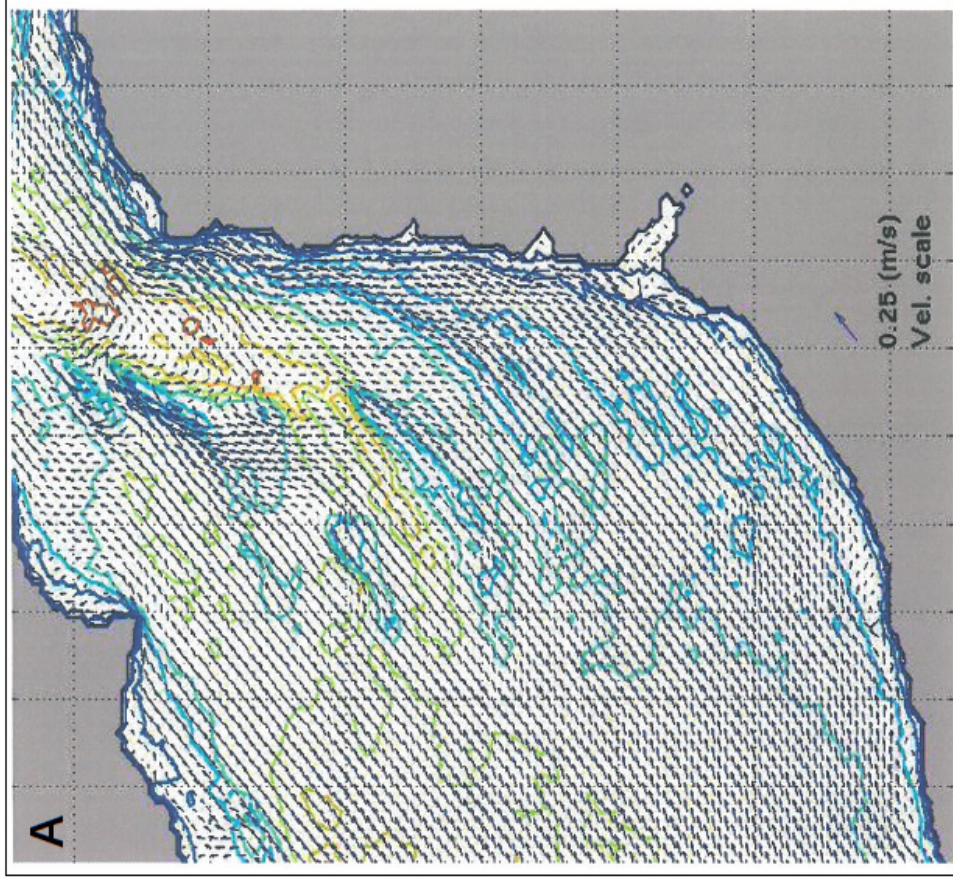


Figure 3.35 : Bathymétrie et courants résiduels de surface sur le littoral de la Manche (A) pendant 10 jours (du 10 au 20/05/2003) et (B) calculés par MAR3D avec la marée et les fleuves comme seuls forçages pour une période de 125 heures (Jouanneau, 2013)

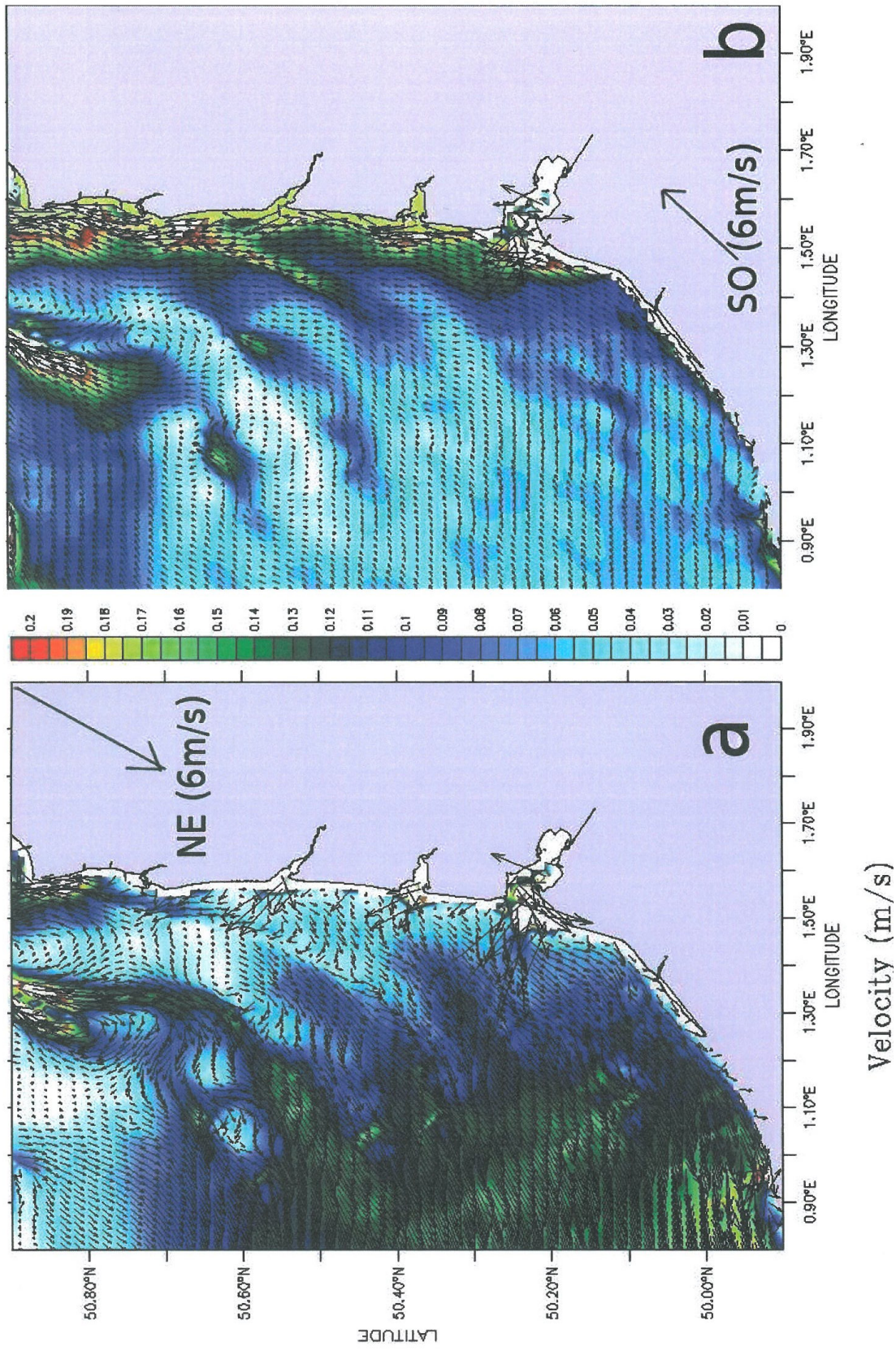


Figure 3.36 : Circulation résiduelle de surface sur 125 heures par (a) vent de nord-est (6 m/s) et par (b) vent de sud-ouest (6 m/s), mise en évidence des différences d'intensité de la dérive vers le nord de la masse d'eau littorale (fleuve côtier) en fonction du sens du vent (Jouanneau, 2013)

3.3 Hydrologie

3.3.1 Les grands fleuves

Les stations hydrométriques, gérées par la DREAL Hauts-de-France, fournissent des données en temps réel sur les principaux fleuves du bassin Artois-Picardie (Figure 3.38).

Pour les données hydrogéologiques, le SIGES²¹ couvre essentiellement les six masses d'eau potable de la nappe de la craie suivantes (Figure 3.38) :

- la vallée de la Deûle (MESO n°1003),
- l'Artois et la vallée de la Lys (MESO n°1004),
- la Scarpe et la Sensée (MESO n°1006),
- le Valenciennois (MESO n°1007),
- le Cambrésis (MESO n°1010),
- la bordure du Hainaut (MESO n°1017).

Les informations contenues dans le SIGES sont parfois étendues aux limites hydrogéologiques du bassin Artois-Picardie (soit la région Hauts-de-France hors formations primaires de l'Avesnois et formations jurassiques du Boulonnais).

3.3.1.a. Caractéristiques hydrologiques

La principale caractéristique hydrographique des Hauts-de-France est l'absence de grands fleuves et de reliefs importants : les cours d'eau (Tableau 3.22 ; voir également 2.1 Géographie et Tableau 2.1 pour la présentation des fleuves de la province), constitués de rivières et de petits fleuves côtiers, se caractérisent par la faiblesse de leur pente et de leur débit (sigesnpc.brgm.fr, 2015). L'ensemble du réseau hydrographique du bassin Artois-Picardie (Figures 2.3 et 3.37) est fortement influencé par la topographie et notamment par la présence du bombement de l'Artois (orientation sud-est / nord-ouest). Celui-ci constitue une ligne de partage des eaux au sud-ouest à partir de laquelle une série de fleuves côtiers coulent vers la Manche : la Somme, la Maye, l'Authie, la Canche, la Liane, le Wimereux et la Slack. Au nord, l'Aa (et son affluent la Hem) s'écoule vers la mer du Nord (Figure 3.37). La nature géologique des terrains joue également un rôle important dans le régime hydrologique de ces cours d'eau, à savoir :

- soit ils sont situés dans des secteurs où la nappe contribue de façon très significative à leur alimentation (cas de l'Aa, l'Authie, la Canche, la Somme et ses affluents) ;
- soit ils coulent sur des bassins versants peu perméables où le ruissellement constitue la majeure partie de l'alimentation du cours d'eau (cas de la Liane, du Wimereux et de la Slack).

21 Système d'information pour la gestion des eaux souterraines dans le Nord et le Pas-de-Calais.



Figure 3.37 : Géographie des cours d'eau de la province (bassins versants, affluents, débits)



Dynamiques et évolution du littoral

Synthèse des connaissances
de la frontière belge à la pointe du Hourdel

Réseau hydrographique

Photo et numéro correspondant

- Station de pompage
- Obstacle à l'écoulement

Obstacle spécifique

- Clapet
- Porte à flot/Porte à la mer
- Barrage
- Ecluse

Limite de province sédimentaire



QMNA 5 (en m³/s) *

- Moins de 0.003
- 0.003 - 0.02
- 0.02 - 0.2
- 0.2 - 0.5
- 0.5 - 1
- Plus de 1
- Cours d'eau sans calcul de l'indicateur **

Zone hydrographique

- | | |
|----------|--|
| Aa | Somme |
| Authie | Slack et cours d'eau se jetant en mer du cap Blanc Nez à l'embouchure de la Slack |
| Wimereux | Liane et cours d'eau se jetant en mer du cap d'Alprech à l'embouchure de la Canche |
| Canche | Autre zone hydrographique |

* Le QMNA correspond au débit mensuel d'étiage atteint par un cours d'eau pour une année donnée. Cet indicateur permet de connaître le plus petit écoulement d'un cours d'eau sur une période donnée.

Le QMNA 5 correspond à un débit ayant la probabilité de ne pas se reproduire plus d'une fois tous les 5 ans.

** Cet indicateur n'est pas toujours disponible ou suffisamment fiable pour être cartographié. Dans ce cas, le cours d'eau est représenté en gris.

Pour en savoir plus : www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr

Source - Copyrights :
Province sédimentaire - Cerema & MEEM
Bathymétrie de métropole - Ifremer
Pays limitrophes - EEA
Obstacle à l'écoulement - Onema
Bassins versants, cours d'eau et stations de pompage - BD Carthage
GEOFLA® - ©IGN Paris - Reproduction interdite

Crédits photos :
© Vincent Vancraenenbroeck / Cerema
© Anaïs Daburon / Cerema
© Emeric Védie / Cerema
© Laurent Mignaux / MEEM



Tableau 3.22 : Caractéristique des cours d'eau sur la province de la frontière belge à la pointe du Hourdel ((1) IGH modélisation hydraulique réalisée par Artélia, 2014 ; (5) débit caractéristique calculé par la loi de Gumbel par Q_{moy} annuel : débit moyen annuel ; QJ : débit moyen journalier calculé avec le débit instantané maximal (QIX) pour un mensuel minimal annuel calculé par la loi de Galton pour une fréquence théorique biennale (2) et quinquennale (5) ; NC :

Noms des cours d'eau (classés du nord au sud)	Données hydro-physiographiques (1)			Hydrologie aux stations					
	Longueur totale du fleuve (km)	Surface totale du bassin versant à l'exutoire (km ²)	Principaux Affluents	Noms de la station de mesures hydrométriques la plus aval (ou la plus aval disposant de données)	Années mesurées à la station	Surface du bassin versant depuis la station (km ²)			
							Q moy annuel	QJ 10 (QIX 10)	QJ 50 (QIX 50)
L'Aa	88,07 (55,45 non canalisé, l'Aa sup)	1314,4 (656,4 non canalisé, l'Aa sup)	Bléquin, Thiembronne, Hem	Wizernes (données disponibles) Flandres aval (la plus en aval mais données non disponibles, sauf les données journalières sur Vigicrues)	1964-2016 (52 ans)	392	5,4	32 (42)	45 (59)
La Slack	20,24	220,4	–	Rinxent	1980-2016 (36 ans)	38,4	0,655	13 (22)	NC
Le Wimereux	21,53	82,52	–	Wimille	1981-2016 (35 ans)	78	1,04	23 (32)	31 (44)
La Liane	36,52	346,6	–	Isques puis Wirwignes	2013-2016 (3 ans) 1973-2016 (43 ans)	100	1,84	30 (56)	41 (76)
La Canche	87,97	1396	Ternoise, Planquette, Créquoise, Bras de Brosne, Course, Nocq, Dordogne, Witrepin, Grande Tringue	Etaples-sur-Mer (données de hauteur) puis Brimeux	depuis février 2015 1962-2016 (54 ans)	894	12,1	31 (32)	41 (42)
L'Authie	95,44	1152	Kilienne, Grouche, Fliers	Dompierre-sur-Authie	1963-2016 (53 ans)	784	7,85	20 (22)	26 (28)
La Maye	29,69	306	–	Arry	1993-2016 (23 ans)	109	1,04	3,5 (3,9)	NC
La Somme	156	6547	Sommette, Beine, Allemagne, Ingon, Avre, Selle, Omignon, Cologne, Ancre, Hallue	Boismont (Somme canalisée) puis Abbeville	2005-2016 (11 ans) 1963-2016 (53 ans)	5560	35,1	71 (78)	89 (99)

N, 2015 ; (2) MEDDE, 2016 ; (3) CETE Méditerranée, 2012 ; (4) estimations, en fonction des scénarios, issues de la Sogreah, 2004 ; (6) pic de crue calculé par Hydratec, 2014 ; (7) Sogreah, 1999 ; (8) EPTB de l'Authie, 2006).
 ne période de retour de 10, 50, 100 et 1000 ans ; QIX : débit instantané maximal et date d'occurrence ; QMNA : débit donnée non-calculée.

Calculs (2)						Limite de la remontée de l'influence marine (3)			
Hydrologie à la station en aval (m³/s)						Ouvrage faisant obstacle à la mer	Remontée de la marée dans l'estuaire (Si oui, estimation de la limite)	Station influencée par la marée	Station aval non influencée par la marée
QJ 100	QJ 1000	QIX	QMNA (2)	QMNA (5)					
NC	130 (6)	57,60 (01/03/2002)	2,7	2,2	- Stations de pompage - Clapet de Marck ...	Gravelines	Aucune	Wizernes	
NC	-	22,20 (18/01/2015)	0,085	0,051	Porte à flot de l'Ecluse Marmin (Ambleteuse)	Non	Aucune	Rinxent	
NC	-	52,30 (21/11/2000)	0,12	0,074	Aucun	Wimille	Aucune	Wimille	
NC	-	56,50 (02/11/2012)	0,43	0,3	Barrage de Marguet	Brimeux	Stations du barrage	Wirwigne	
NC	-	34,80 (28/12/1999)	8,7	7,3	Porte à la mer « la Grande Tringue » (sur l'affluent La Grande Tringue, proche de l'embouchure)	Probablement jusqu'à Montreuil Limite de salure des eaux au niveau de la confluence avec la Dordogne (SAGE Canche)	Aucune	Brimeux	
30 (7)	-	26,7 (21/03/2001) 29 (13/12/1966) d'après (8)	5,7	4,5	Porte à la mer « Porte Fliers » (sur l'affluent le Fliers proche de l'embouchure) + La Vantellerie de Montigny (vanne automatique installée en 2000)	Roussent	Colline-Beaumont (non-située)	Dompierre-sur-Authie	
NC	-	7,3 (11/05/2001)	0,55	0,38	Porte à flots	Non	Aucune	Arry	
105 (5)	138 à 163 (4)	100 (11/12/2008)	25	19	Ecluse(s) de Saint-Valery-sur-Somme	Abbeville	Boismont, Abbeville, Lamotte-Brebière	L'étoile	

Dynamiques et évolution du littoral

Synthèse des connaissances de la frontière belge à la pointe du Hourdel



Surveillance du réseau hydrographique



- Limite de province sédimentaire
 - Cours d'eau**
 - Cours d'eau principal
 - Cours d'eau secondaire
 - Bâti
 - Limite départementale
- Réseau hydrométrique**
 - | Station hydrométrique en service
 - Tronçon réglementaire de vigilance crues

Pour en savoir plus : www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr

Source - Copyrights :
 Province sédimentaire - Cerema & MEEM
 Tronçon de surveillance de crues - Vigicrues - MEEM
 Station hydrométrique - MEEM
 Bathymétrie de métropole - Ifremer

Pays limitrophes - EEA
 Occupation du sol - Corine Land Cover 2012
 Cours d'eau - BD Carthage
 GEOFLA® - ©IGN Paris - Reproduction interdite
 BD Alti® - ©IGN Paris - Reproduction interdite



Figure 3.38 : Surveillance du réseau hydrographique et stations hydrométriques

Incidence des cours d'eau sur le littoral : le fleuve marin côtier

Le « fleuve marin côtier » est une masse d'eau de 3 à 5 milles nautiques (soit 4,8 à 8 km) de large le long des côtes depuis la baie de Seine jusqu'au cap Gris-Nez, circonscrite par les courants marins. Elle est alimentée par les fleuves (notamment la Seine) le long de la côte, et draine du sud vers le nord une partie de leurs apports en nutriments et en polluants (Agence des Aires Marines Protégées, 2011).

L'incidence des cours d'eau sur le littoral se traduit par les courants induits, les apports liquides, l'évolution des coins salés, etc. Il apparaît que les principaux estuaires débouchant dans la Manche ajoutent chacun leurs eaux douces au panache de la Seine pour former ce fleuve marin côtier (Brylinski *et al.*, 1991 ; Dupont *et al.*, 1991). Une importante masse d'eau moins salée (et donc moins dense) que la Manche et que la mer du Nord longe la côte vers le nord, poussée par les courants dominants venant de l'Atlantique (voir 3.2.3 *Courants*). La densité, la turbidité, la salinité, la vitesse et l'écologie de ce fleuve marin côtier sont spécifiques. Elles varient selon les époques de l'année (cycle saisonnier), mais aussi selon les années, en fonction des conditions météorologiques. Les six

fleuves de la façade Manche de la province (Somme, Authie, Canche, Liane, Slack et Wimereux) apportent environ 13 % de la masse d'eau totale constituant le fleuve marin côtier (Agence des Aires Marines Protégées, 2011).

Influence de la marée sur les cours d'eau côtiers

L'influence de la marée sur les cours d'eau côtiers est difficile à estimer. Néanmoins, la limite de remontée de la marée dans les estuaires a pu être estimée à partir de l'analyse des stations hydrométriques influencées et non influencées par la marée (CETE Méditerranée, 2012 ; [Tableau 3.15](#)). Il a ainsi été montré que le signal de marée était enregistré sur la Somme au moins jusqu'à la station d'Abbeville ([Figure 3.39](#)).

Les études menées spécifiquement sur l'Authie par Sogreah (1999, 2009b) indiquent que :

- l'Authie subit l'influence des marées dont le flux remonte la baie puis la vallée,
- les cotes maximales d'eau enregistrées dans la partie aval, après Colline-Beaumont, dépendent essentiellement du niveau d'eau engendré par la combinaison marée-surcote et semblent peu influencées par le débit de l'Authie.

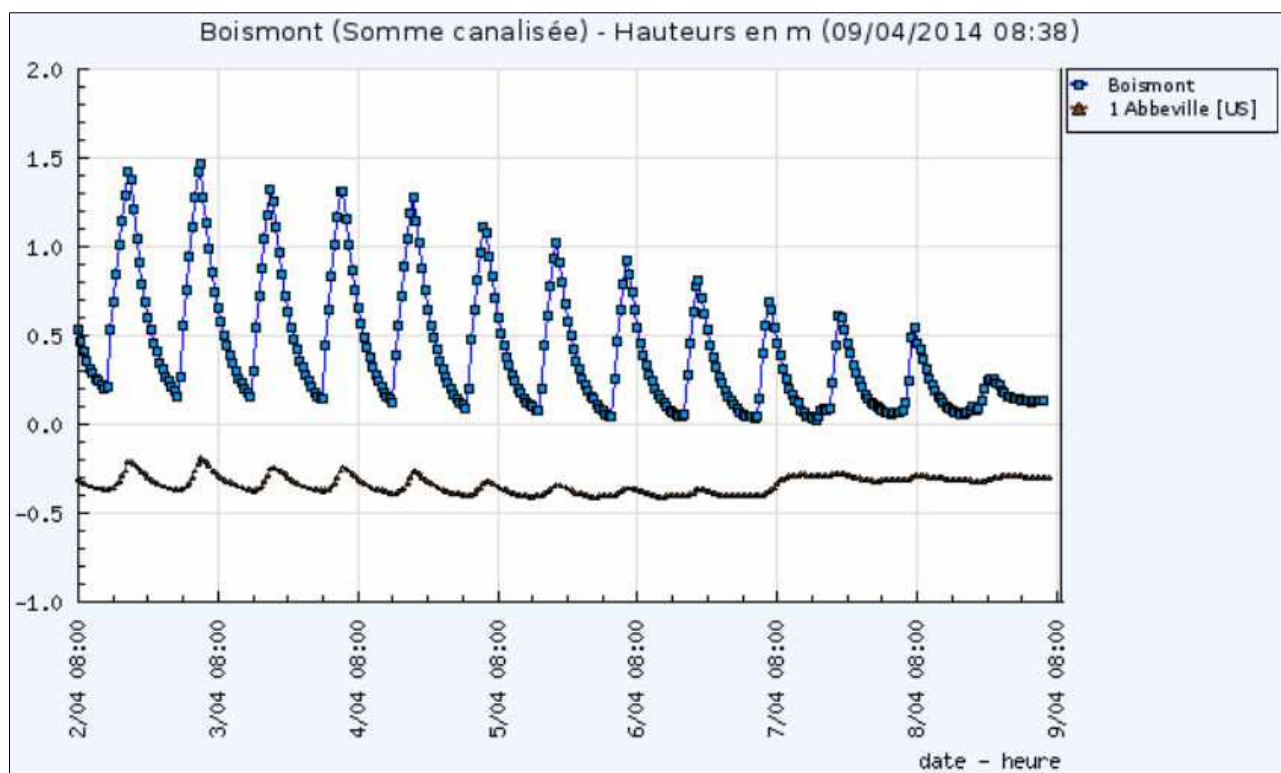


Figure 3.39 : Limnigramme²² de la Somme à Boismont et Abbeville ([vigicrues.gouv.fr](#), 2015)

22 Représentation graphique des niveaux d'eau en fonction du temps (CNRTL, 2012).

Aménagements hydrauliques

Avec 930 km de canaux et de rivières canalisées, le bassin Artois-Picardie comporte un nombre important d'aménagements hydrauliques destinés à la navigation, mais également à la lutte contre les intrusions d'eau salée, à l'assainissement des zones humides, à l'évacuation des eaux de ruissellement... (voir *Chapitre 5, notamment 5.4.3*). Les faibles pentes ont incité l'homme à canaliser les cours d'eau et à tisser un réseau maillé de canaux entre les différents bassins. Seuls l'Authie, la Canche, la Liane, la Slack et le Wimereux sont hydrauliquement indépendants. Des canaux de liaison permettent à l'eau de s'écouler d'un bassin à l'autre, et parfois même, grâce à des stations de pompage, d'inverser le sens d'écoulement d'un cours de l'eau (Ifen, DRE Nord - Pas-de-Calais, 2004). Les aménagements les plus significatifs sont les suivants :

- Sur l'Aa : le delta de l'Aa est un territoire de polders (appelés wateringues), aménagé à partir du X^e siècle, qui couvre environ 900 km² dans les départements du Nord (arrondissement de Dunkerque) et du Pas-de-Calais (arrondissements de Calais et de Saint-Omer). Ce territoire est situé à une cote voisine du niveau moyen de la mer, parfois même en dessous de ce niveau, et toujours au-dessous du niveau des plus hautes eaux. Le cordon dunaire, qui longe la côte, assure une protection partielle contre l'intrusion de la mer. Le maintien hors d'eau de la population et de l'activité fait appel à un dispositif complexe de gestion des eaux en fonction de la marée, qui comporte notamment un réseau dense de canaux (environ 400 km de chemins d'eau) avec de nombreuses vannes, écluses et stations de pompage.
- Sur la Somme : sur son parcours, la Somme ne reste qu'assez peu à l'état naturel. Elle a en effet été canalisée (canal construit entre 1770 et 1843) sur une grande partie de sa longueur, notamment pour relier la région de Saint-Quentin à la mer. D'une longueur de 156,5 km, le canal débute à Saint-Simon, où il est en liaison avec le canal de Saint-Quentin, et se jette dans la baie de Somme au niveau de Saint-Valery-sur-Somme. Le nombre d'écluses présentes s'élève à 25. Entre Saint-Simon et Froissy (53 km), le canal est latéral à la Somme naturelle. Sur le reste du parcours, il est établi tantôt en rivière, tantôt en dérivation. A Abbeville, une dérivation scinde la boucle de la Somme. La voie se poursuit ensuite jusqu'à Saint-Valery-sur-Somme, sous le nom de canal maritime.
- Sur l'Authie et la Canche : ces cours d'eau ont subi des modifications de leur cours (Verslype, 2011) avec notamment une canalisation de la basse vallée dès le XIII^e siècle pour l'Authie.

À l'exception du Wimereux, chaque cours d'eau possède un ouvrage faisant obstacle à la mer, sur son cours ou sur un de ses affluents : porte à flot, barrage, écluse ou buse (*Tableau 3.22, Figure 3.37* et voir *5.4.3 Aménagements hydrauliques*). La présence et la gestion de ces ouvrages sont essentielles, car elles conditionnent les volumes d'eau apportés à la mer ainsi que les transferts de matières solides (matières en suspension notamment).

3.3.1.b. Débits liquides des principaux cours d'eau

La synthèse des caractéristiques des principaux cours d'eau de la province (*Tableaux 2.1 et 3.22*) met en évidence leur grande hétérogénéité aussi bien en ce qui concerne leur morphologie (longueur, superficie de leur bassin versant) que leurs caractéristiques hydrologiques. Leurs débits moyens annuels (Q_{ma}) ont été mesurés grâce aux stations de mesures hydrométriques présentes sur chacun des cours d'eau (voir *Figures 3.38 et 3.37*) : dans l'ordre d'importance, se trouvent ainsi la Somme (34,8 m³/s), la Canche (12,1 m³/s), l'Authie (7,82 m³/s) puis l'Aa (5,35 m³/s).

La majorité des cours d'eau dispose de quantiles de débit jusqu'à la période de retour 50 ans. Leur analyse met en avant une différence assez nette de dynamique entre :

- les cours d'eau du Boulonnais (Liane notamment) qui montrent une réaction rapide des débits aux précipitations : par exemple, le débit instantané maximal (Q_{IX}) de la Liane correspond à 30 fois son débit moyen annuel (Q_{ma}),
- les cours d'eau situés au sud de la Canche (comprise) qui présentent des pointes de débits beaucoup plus faibles du fait de l'effet tampon joué par les nappes aquifères : par exemple, le débit instantané maximal (Q_{IX}) de la Canche correspond à seulement 3 fois son débit moyen annuel (Q_{ma}).

L'apport annuel des eaux douces en Manche est de l'ordre de 25 km³ pour un bassin versant total (France et Angleterre) de 137 000 km², avec les contributions moyennes de 327 m³/s par les 31 rivières britanniques et 665 m³/s par les 45 rivières françaises, dont 410 m³/s par la Seine seule (Reid *et al.*, 1993). Les rivières françaises alimentent le fleuve marin côtier (voir *3.3.1.b*).

Le bassin Artois-Picardie a connu par le passé différentes inondations qui sont ici illustrées à travers les événements historiques les plus significatifs survenus sur chacun des cours d'eau (Tableau 3.23). Plusieurs types d'inondations sont observés sur le bassin :

- l'hiver, la succession de perturbations pluvieuses cause les principales inondations, soit par remontée de nappe, soit par débordement lent ou rapide des principaux cours d'eau ;
- en période estivale, des fronts orageux mobiles mais virulents peuvent engendrer des crues à montée rapide sur les affluents, et des ruissellements dans les zones les moins perméables.

Le référencement de ces événements s'appuie notamment sur l'Évaluation préliminaire des risques d'inondation (EPRI) réalisée par la DREAL Nord – Pas-de-Calais (2011) dans le cadre de la mise en œuvre de la Directive Inondation (2007/60/CE), mettant en évidence :

- le nombre relativement important d'événements (environ 40 sur l'ensemble du bassin),

- l'existence d'événements recensés depuis la fin du XVIII^e siècle,
- l'existence d'événements sur tous les cours d'eau à l'exception de la Maye,
- l'existence d'événements particulièrement significatifs (sans obligatoirement concomitance avec des niveaux marins hauts) :
 - décembre 1999 sur la Canche (T = 50 ans)
 - avril 2001 sur la Somme (T = 120 ans)
 - mars 2002 sur l'Aa (T = 60 ans)

L'événement le plus remarquable est probablement celui qui a touché la Somme au printemps 2001. Suite à plusieurs années successives très humides (1998-2001) combinées à des précipitations très importantes en mars 2001 (26 jours de pluie – Figure 3.40), une crue de très grande ampleur a notamment touché la partie aval du cours d'eau. D'une période de retour estimée à 120 ans à Abbeville, cet événement est surtout exceptionnel par la durée de submersion : jusqu'à 4 mois dans les secteurs les plus touchés.

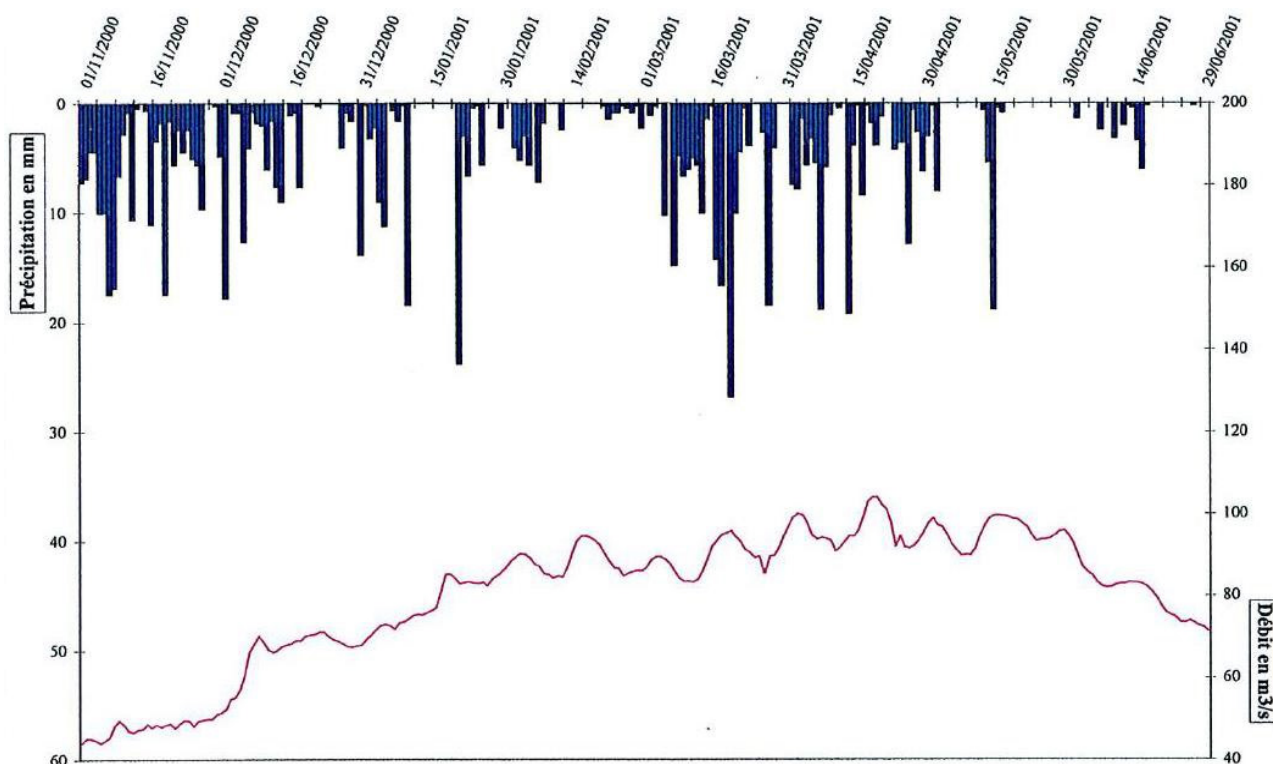


Figure 3.40 : Hydrogramme et hyétogramme de la Somme à Abbeville entre novembre 2000 et juin 2001 (DDTM 80, 2012)

Tableau 3.23 : Synthèse des principaux événements survenus et des plus hautes eaux observées (DREAL Nord - débit maximal de l'événement.

	Événements marquants		Date(s) exacte(s) de l'événement	Intensité et caractéristiques de la crue	Mesures relevées station
	Période de l'événement	Période de retour T (années)			
L'Aa supérieur	1894	NC	Du 26 février au 04 mars 2002	Crue rapide Crue historique de référence	Lumbres : 2,36m ou 1,32m les sources Wizernes : 1,93m, 58m³ Fauquembergues : 1,75
	Décembre 1960	NC			
	1975	NC			
	Février 1988	T=10			
	Décembre 1999	T=10			
	Mars 2002	T=60			
La Slack	Septembre 1857	NC	Octobre 1981	Crue subite	sans information
	Octobre 1981	NC			
	Octobre 1998	NC			
	Décembre 1999	NC			
	Décembre 2006	NC			
	Novembre 2009	NC			
Le Wimereux	Octobre 1998	T= 20	(Décembre 1999) 21 novembre 2000	sans information	(Wimilles : 2,06m, 36m³/ Wimilles : 2,95m, 45m³)
	Décembre 1999	T=>20			
	Novembre 2000	T=>20			
	Décembre 2006	NC			
	27 novembre 2009	NC			
La Liane	1839	NC	Du 24 octobre au 15 novembre 1998 (novembre 2000)	4 crues dont 3 petites Maximum atteint le 31/10/1998 à Wirwignes	Wirwignes : 4,32m, 56m (Wirwignes : 4,16m, 52m)
	1857	NC			
	Septembre 1949	NC			
	Octobre 1981	T=10			
	Février 1988	NC			
	Novembre 1998	T=20			
	Décembre 1999	T=2 à 10			
	Novembre 2000	T=20			
	Février-mars 2002	NC			
Novembre 2009	10 < T < 20				
La Canche	Janvier 1961	NC	28 décembre 1999	sans information	Brimeux : 1,94m, 35m³
	1964	NC			
	1988	NC			
	Décembre 1993	T=20			
	Mai 1995	10 < T < 50			
	Décembre 1999	T=50			
L'Authie	Décembre 1966	T > 50	Avril 2001	Submersions souvent supérieures à 15 jours Crue et remontée de nappes	sans information
	Décembre 1999	NC			
	Avril 2001	10 < T < 100			
La Maye	Pas de				
La Somme	Février 1784	NC	Octobre 2000 à avril 2001	Débordement de la Somme et de ses affluents, inondations par remontée de nappe et ruissellement Crue exceptionnelle par sa durée (plusieurs mois) avec paroxysme mi-avril Exceptionnelle sur partie aval, importante mais non exceptionnelle sur amont	Abbeville (Epagne-Epagne 104 m³/s (QMJ) Hangest sur Somme : 90,5 (QMJ le 08/04) Péronne : 24,3m³/s (Qma 12/04)
	Janvier 1841	NC			
	Août 1850	NC			
	1873	NC			
	Juin 1879	NC			
	1926	NC			
	1931	NC			
	1937	NC			
	1994-1995	T=12			
	2000-2001	T=120			
	Janvier 2003	T=25			

(Pas-de-Calais, 2011 ; Service de Préviation des Crues Artois-Picardie, 2014). QJM : débit moyen journalier ; Qmax :

Événement le plus remarquable		
en	Dégâts	Conditions météorologiques
selon /s m	Communes les plus touchées : Blendecques, Arques, Saint-Omer et Saint-Etienne-au-Mont (1,80m d'eau par endroits) (crue Aa ou Liane) Plus de 1200 logements sinistrés, dont 730 à Blendecques, 150 à St-Omer, 111 à Arques, 4 à St-Martin-d'Hardinghem, 5 à Merck-St-Liévin, 12 à Ouve-Wirquin et 3 à Remilly-Wirquin	Pas d'événement pluvieux journalier intense mais une succession d'événements pluvieux conséquents (mais non exceptionnels) sur des sols saturés : du 15 janvier au 28 février 2002, environ 335 mm. - janvier 2002 : 100,7 mm précipités (normale du mois : 93 mm) - février 2002 : 236,1 mm précipités (normale du mois : 72,2 mm) (source : étude hydraulique de la commune de Blendecques – V2R Ingénierie & Environnement)
	sans information	sans information
s) s)	sans information	Fortes pluies en octobre et novembre 2000, 2 à 3 fois la normale, ainsi que des modules journaliers importants
2/s 3/s)	Plus de 400 maisons inondées : - 2 maisons de retraite évacuées - ZI de la Liane à Boulogne-sur-Mer et à Saint-Etienne-au-Mont : plusieurs centaines de chômage techniques - la ville de Boulogne-sur-Mer inondée	De fortes pluies se sont abattues sur le département du Pas-de-Calais entre le 31 octobre et le 1er novembre 1998. Les précipitations représentaient parfois le double de la normale observée à cette période de l'année (l'évacuation de l'eau par la mer a été facile car les coefficients de marée étaient compris entre 36 et 60 sur la période)
s	sans information	Fortes pluies pendant tout le mois de décembre 1999 (plus de 25 jours avec précipitations) : 281mm à Desvres, 185,9 à Lambersart, 228,5 à Fourmies, soit 2 à 3 fois la normale. Périodes de retour entre 25 et plus de 50 ans. Des modules journaliers plus ou moins exceptionnels se succèdent et viennent s'ajouter à cette pluviométrie excédentaire. La répétition de ces pluies sur un sol gorgé d'eau a entraîné un ruissellement important provoquant la réaction rapide des cours d'eau.
	Nombreuses zones inondées et dégât aux habitations, notamment sur le secteur de Quend	sans information
données disponibles		
ette) : m ³ /s x le	Importantes inondations entre la haute Somme et Abbeville de mars à mai 2001. Communes concernées : Abbeville, Fontaine-sur-Somme, Mareuil-Caubert, Amiens, Cagny, Camon et Pont-Rémy (108 communes déclarées dans l'arrêté de reconnaissance de l'état de « Catastrophe naturelle » dans la Somme). 3 414 maisons inondées plus ou moins gravement, dont 739 évacuées (>1000 personnes), et 32 à détruire. 23 routes départementales ont été coupées et 15 ponts détruits ou très endommagés. Certains quartiers de Abbeville sont noyés sous deux mètres d'eau, le trafic ferroviaire est interrompu. Environ 150M€ de dégâts au total. Environ 200 entreprises et 450 exploitations agricoles ont été sinistrées. Tourisme fortement impacté car sites historiques et touristiques touchés, notamment ceux d'Amiens.	Années humides 1998 à 2001 : l'année 2000 est la plus humide enregistrée sur au moins la période 1970-2000. La vallée de la Somme a connu d'octobre 2000 à avril 2001 une pluviométrie exceptionnelle, égale à 2 fois la normale, soit un record depuis au moins 1945. Station d'Abbeville : 216,4mm en octobre 2000, record sur la période 1973-2001 (au moins). Mars 2001 très pluvieux (26 jours de pluie). Les pluies de l'automne et de l'hiver ont saturé les sols constitués de limons et de craie très perméables et remonté la nappe à des niveaux rarement atteints, sans pour autant déclencher des inondations. C'est la reprise de la pluviométrie en mars, après une pause en février, qui a entraîné une augmentation des débits et le débordement de la Somme et de ses affluents, ainsi que des inondations par remontée de la nappe en fond de vallée.

3.3.1.c. Apports solides des principaux cours d'eau

Des mouvements de sédiments existent à l'interface entre les cours d'eau et la mer. Classiquement, des échanges se produisent entre :

- les particules continentales apportées par les fleuves : peu d'informations sont disponibles sur les caractéristiques des apports fluviaux sur la province (volumes, nature, dynamique) ;
- les sédiments marins qui remontent dans l'estuaire : l'influence de la marée sur l'hydrologie est observée sur l'ensemble des cours d'eau à l'exception de la Liane (port de Boulogne-sur-Mer) et de la Maye ; en revanche, la quantification des apports est rarement disponible.

Ces transferts de sédiments sont néanmoins fortement perturbés par la présence d'ouvrages hydrauliques faisant obstacle à la mer, sans qu'il soit réellement possible d'apprécier ou de quantifier cette influence.

En 1989, des quantifications d'apports à la mer ont été proposées par l'Ifremer (Chaussepied *et al.*, 1989) suite à une campagne de mesure réalisée entre 1984 et 1986, démontrant des apports bien plus faibles (de l'ordre de 3 fois) sur la façade nord

que sur la façade ouest de la province (Tableau 3.24). Ceci s'explique par les faibles pentes et les petits débits des canaux de Flandre. Sur cette façade nord, la moitié des sédiments est apportée par la rivière Aa, le reste par le canal de la Rivière Neuve et par le canal exutoire de Dunkerque.

Les apports continentaux des fleuves en éléments nutritifs en Manche orientale ont été quantifiés par l'Ifremer (Hébert *et al.*, 2004) à partir de relevés de turbidités et de matières en suspension (MES) entre 2001 et 2002 pour 5 fleuves : la Slack, le Wimereux, la Liane, la Canche et l'Authie. Les apports totaux en MES, probablement surestimés selon les auteurs eux-mêmes, sont évalués à 192 000 t/an (Figure 3.41).

Parmi les cinq fleuves étudiés, deux catégories se distinguent :

- la Canche et l'Authie qui apportent l'essentiel des éléments mesurés (47 et 28 % respectivement) de manière régulière tout au long de l'année (régulation par les nappes de craie),
- les fleuves du Boulonnais qui sont à l'origine d'apports plus faibles et beaucoup plus irréguliers, étroitement en lien avec les périodes de crue, où les apports sont plus importants.

Tableau 3.24 : Apports solides en matières en suspension (MES) des principaux cours d'eau sur la province (Chaussepied *et al.*, 1989 ; Latteux, De Crouette, 1995 (Somme) ; Latteux, 1999 (Authie))

	Aa	Authie	Canche	Liane	Somme	Slack	Wimereux
Apports solides en MES (t/an)	6 900	12 000 à 15 000	23 000	2 800	22 000	530	130

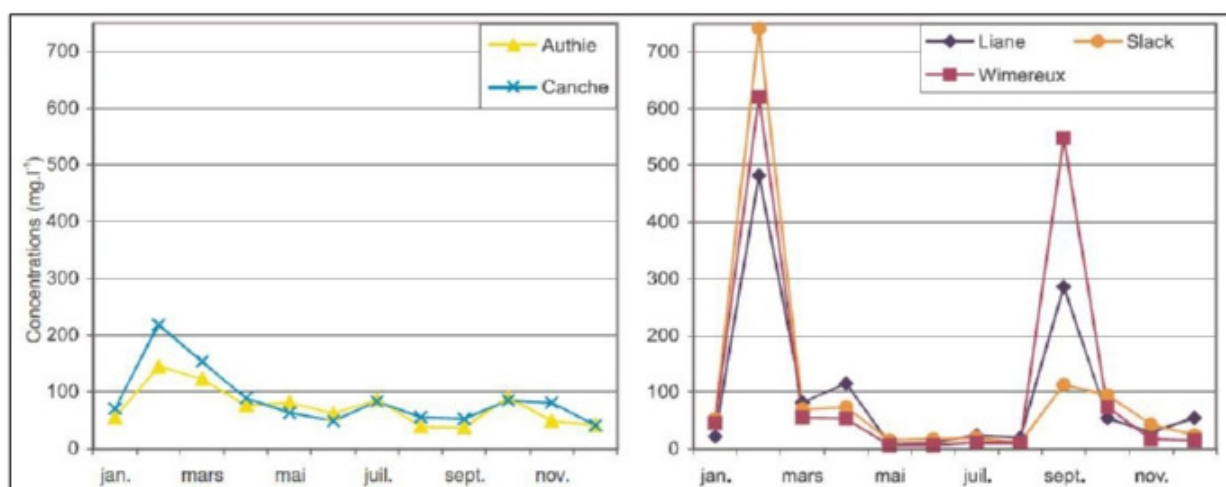


Figure 3.41 : Apports en matières en suspension (MES) (en mg/l) sur une année des principaux fleuves de la province (d'après Hébert *et al.*, 2004)

Un réseau de suivi régional des nutriments a été mis en place par l'Ifremer en collaboration avec l'Agence de l'eau Artois-Picardie en 1992 (ifremer.fr, 2015). Ce suivi à long terme permet notamment d'évaluer l'influence des apports continentaux en éléments nutritifs sur d'éventuels processus d'eutrophisation du milieu marin. Dans ce cadre, des informations sur la teneur en MES sont disponibles sur trois radiales situées au large de Dunkerque, de Boulogne-sur-Mer et en baie de Somme.

L'Agence de l'eau Artois-Picardie effectue de nombreux relevés dans le cadre de la surveillance de la qualité des eaux superficielles (eau-artois-picardie.fr, 2008 ; IGN - DREAL - Agence de l'Eau Artois-Picardie, 2016), notamment concernant les fleuves côtiers (Tableau 3.25).

Trois fleuves ont fait l'objet d'études spécifiques : la Somme, l'Authie et la Canche.

Dans le cas de la Canche, l'étude réalisée en 1984 conjointement par l'Université de Lille et l'Institut Pasteur de Lille (L'Hopitault *et al.*, 1984) fournit les informations qualitatives suivantes :

- les MES sont abondantes dans l'estuaire et se déplacent d'amont en aval de l'estuaire (et inversement) au rythme des marées ;
- l'estuaire permet un stockage temporaire des produits issus du bassin versant de la Canche : ces produits sont expulsés partiellement à marée descendante, réintroduits en partie à marée montante puis définitivement expulsés lors des forts coefficients et des crues estivales ;
- les sédiments prélevés présentent une minéralogie soit riche en quartz (apports de l'amont), soit riche en calcite (apports de l'aval²³).

Dans le cas de l'Authie, l'étude réalisée par Sogreah en 2009 (2009a) avance des taux de MES en moyenne de l'ordre de 30 mg/l à la station de Quend (suivi mensuel mené par l'Agence de l'eau depuis 1976, taux moyens annuels variables d'une année à l'autre), avec toutefois des variations saisonnières marquées (minimum de 10 mg/l en juillet-août et maximum de 60 mg/l en décembre-janvier).

Au large de la baie, les eaux marines plus salées affichent des valeurs de turbidité moyennes de l'ordre de 60 mg/l (Latteux, 1999), avec des concentrations en MES pouvant atteindre exceptionnellement plus de 500 mg/l (notamment lors de crues). Les matières sèches apportées par l'Authie ont quant à elles été estimées à 15 000 t/an (Tableau 3.24).

Dans l'état des lieux du SAGE Authie (EPTB de l'Authie, 2006), la part de teneur en MES est mentionnée « souvent supérieure à 0,07 kg/m³ » (soit 70 mg/l) au sein du cours d'eau. Ces teneurs importantes en MES provoqueraient le colmatage du lit de l'Authie en de nombreux endroits, notamment en basse vallée et en amont des barrages.

Dans le cas de la Somme, Beauchamp (1998) précise, en s'appuyant sur les données acquises lors de l'étude Sogreah (1995), que le remplissage de la baie de Somme est fait principalement de sables fins homogènes dont la médiane est à 0,17 mm (voir 4.2.1.c. *Baies et estuaires*). Les sables sont moins fins à l'entrée de la baie (médiane à 0,24 mm) alors que la vase prédomine dans les molières (plus de 70 %). Ce sable est transporté en suspension ; la charge atteint 50 kg/m³ (soit 50 g/l) ou 10 kg/s par mètre de largeur à l'entrée de la baie pour des courants supérieurs à 2 m/s. A l'entrée de la petite baie, au large du Crotoy, le flux entrant de MES a été évalué à 0,54 t/m alors que le flux sortant était de 0,30 t/m en marée de vive-eau, une différence de 0,24 t/m restant dans la petite baie pour un cycle de marée.

Tableau 3.25 : Valeurs moyennes de matières en suspension (MES) totales pour l'année 2015 dans les 7 principaux fleuves de la province (IGN - DREAL - Agence de l'Eau Artois-Picardie, 2016)

Fleuve	Aa canalisée	Authie	Canche	Liane	Somme canalisée	Slack	Wimereux
Lieu de mesure	Saint-Folquin	Quend	Estrée	Carly	Boismon	Ambleteuse	Wimille
Moyenne de MES totales en 2015 (en mg/l)	25,2	14,4	21	39,3	6,4	22,9	22,7

23 L'auteur ne précise pas la limite de l'amont et de l'aval.

3.3.2 Marais et lagunes

Un recensement des zones à dominante humide a été réalisé pour l'Agence de l'eau Artois-Picardie par le bureau d'étude SIRS (2007). Deux principaux secteurs littoraux humides sont mis en évidence (Figure 3.42) :

- le **territoire des Wateringues** comprenant notamment le **marais audomarois**, ancienne zone humide tourbeuse de 35 km² qui abrite 1 050 ha de prairies humides, 436 ha de terres maraîchères et 171 ha de roselières. À la fois drainée (via l'Aa canalisée par le goulet de Watten) et alimentée par l'Aa, la cuvette est encadrée à l'est par les collines marquant les limites de la Flandre intérieure et à l'ouest par la retombée crayeuse de l'Artois. Les écoulements d'eau y sont quasi-nuls et les niveaux d'eau sont entièrement liés à ceux du canal de navigation. Ils dépendent donc des contraintes de navigation, mais aussi des différents apports en eau (Aa, nappe,

versant artésien, versant flamand) et des ouvrages multiples : ouvrages de protection internes au marais, casiers, et ouvrages d'évacuation des eaux à la mer (CLE de l'Audomarois, 2005).

- les **marais arrière-littoraux picards** correspondant à un ensemble de tourbières basses alcalines constituant un système nord-atlantique arrière-littoral endémique, propre à la plaine maritime picarde, de part et d'autre de l'Authie : il s'agit plus précisément d'une mosaïque de marais parfois boisés et de prairies humides, traversés par un réseau hydrographique complexe (fossés, canaux et ruisseaux) et ponctués de mares de chasse et étangs. Le Syndicat mixte baie de Somme-grand littoral picard propose une description complète de chacun de ces marais (Dufour, Triplet, 2009).

Le rôle de ces deux zones humides sur le transport sédimentaire est difficile à estimer et n'a pas fait l'objet d'étude spécifique.

Dynamiques et évolution du littoral

Synthèse des connaissances de la frontière belge à la pointe du Hourdel



Marais maritimes et zones humides



- Limite de province sédimentaire
- Cours d'eau principal
- Cours d'eau secondaire
- Bâti
- Limite départementale
- Zone humide
- Zone intertidale
- Marais maritime
- Surface en eau

Pour en savoir plus : www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr

Source - Copyrights :
 Province sédimentaire - Cerema & MEEM
 Marais maritimes et zones intertidales - Corine Land Cover 2012
 Zones humides - SIRS 2008
 Bathymétrie de métropole - Itremer

Cours d'eau - BD Carthage
 Pays limitrophes - EEA
 GEOFLAB - ©IGN Paris - Reproduction interdite
 Occupation du sol - Corine Land Cover 2012
 BD Alti® - ©IGN Paris - Reproduction interdite



Figure 3.42 : Marais maritimes et zones humides sur la province

3.4 Changement climatique et impacts sur les facteurs hydrodynamiques

Le changement climatique en cours impacte l'ensemble des facteurs naturels d'évolution du littoral, qu'ils soient climatiques ou hydrodynamiques, et au premier rang desquels figure l'élévation du niveau moyen de la mer. Les connaissances au niveau global s'appuient nécessairement sur les rapports de référence émis par le GIEC²⁴, dont le prochain rapport, attendu en 2019, traitera de l'océan et de la cryosphère.

Au plan national, le projet DRIAS²⁵ a mis à disposition sur un portail Internet dédié des indices de températures, précipitations et de vent, ainsi que des projections climatiques régionalisées pour l'ensemble des régions françaises, sur la base des scénarii dits RCP²⁶ du 5^e rapport du GIEC (GIEC, 2013). Ces données ont notamment été exploitées dans le cadre de la mission confiée à Jean Jouzel par le Ministère en charge du développement durable en 2010 pour l'établissement d'une « synthèse approfondie sur les scénarios de référence à considérer pour la mise en œuvre du plan national d'adaptation au changement climatique », notamment Ouzeau *et al.* (2014) et Planton *et al.* (2015). Enfin, le littoral a fait l'objet du rapport annuel de l'Onerc au Premier ministre et au Parlement en 2015 ; ce document de référence constitue une synthèse bibliographique nationale des effets du changement climatique sur les paramètres d'évolution du littoral.

Enfin, Météo-France a réalisé en 2011 une étude prospective sur le climat du Nord-Pas-de-Calais à l'horizon 2080 en s'appuyant sur les scénarii B1 (optimiste), A1B (médian) et A2 (pessimiste) établis par le GIEC en 2007.

3.4.1 Evolution des paramètres climatiques

Ne sont décrits ci-dessous que les paramètres de climatologie atmosphérique ou océanique pouvant avoir un impact direct ou indirect sur l'évolution du littoral (voir 2.5 Facteurs et mécanismes d'évolution du littoral), notamment :

- les températures et le nombre de jours de gel/dégel qui peuvent impacter la nature et la répartition des habitats naturels terrestres et influencer sur l'évolution des côtes à falaises rocheuses,
- les vents et événements tempétueux (dépressions) qui interviennent directement dans la déflation éolienne (particulièrement pour les dunes) et indirectement vis-à-vis de la formation des états de mer et des surcotes marines,
- les précipitations moyennes et extrêmes, qui impactent les débits liquides des cours d'eau, et inversement le nombre de jours de sécheresse, qui peuvent augmenter l'érodabilité des sols, et peuvent ensemble modifier leurs apports en matières solides à la côte, participer à l'évolution des falaises par infiltration de l'eau et indirectement impacter la nature et la répartition des habitats naturels terrestres,
- la température de l'eau, ainsi que les paramètres de salinité et de pH, qui impactent la nature et la répartition des habitats naturels marins et peuvent influencer sur l'évolution des côtes rocheuses, notamment crayeuses.

3.4.1.a. Températures et nombre de jours de gel/dégel

Le GIEC (2013) estime que la température de l'air moyenne au niveau mondial, au niveau de la surface, s'est élevée de 0,85 °C entre 1880 et 2012, avec une hausse deux fois plus importante au-dessus des terres qu'au-dessus des océans (Onerc, 2015). En France, les températures ont augmenté de 0,1 °C en moyenne par décennie au cours du XX^e siècle, avec un rythme de 0,6 °C par décennie sur la période 1973-2003 (Météo-France *in*: CGDD, 2011). Sur la période 1951-2000, les séries quotidiennes montrent notamment des températures diurnes et de fin de nuit plus élevées et une diminution du nombre de jours de gel (Météo-France *in*: CGDD, 2011).

24 Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

25 Le projet DRIAS (« Donner accès aux scénarios climatiques régionalisés français pour l'impact et l'adaptation de nos sociétés et environnements ») a été mené par l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), Météo-France (direction de la climatologie et laboratoire CNRM-GAME) et le Centre européen de recherche et de formation avancées en calcul scientifique (CERFACS) ; il a été soutenu par le programme GICC (Gestion et impacts du changement climatique) du ministère en charge de l'environnement. Ses résultats sont diffusés par Internet via le portail DRIAS-Les futurs du climat (<http://www.drias-climat.fr>).

26 Representative concentration pathway – pour plus d'informations voir notamment « Le climat de la France au XXI^e siècle » (Ouzeau *et al.*, 2014).

Les projections mondiales à 2100 montrent une augmentation de la température comprise entre 75 et 100 % de la hausse globale sur les façades métropolitaines de la Manche et la mer du Nord (Onerc, 2015). Au stade actuel des connaissances, il est encore impossible de dresser des projections détaillées le long du littoral (Onerc, 2015). Sur la métropole, les modèles climatiques donnent des projections similaires en termes d'élévation des températures au début du XXI^e siècle, avec une élévation des températures moyennes de +0,6 à +1,3 °C d'ici 2050, en hiver comme en été (Ouzeau *et al.*, 2014). Ces élévations s'accroissent avec cependant des résultats de modèle plus variables à l'horizon 2100, de +0,9 à +3,6 °C en hiver et de +1,2 à +5,3 °C en été pour les mêmes modèles (Ouzeau *et al.*, 2014).

Le littoral de la province reste globalement dans la moyenne nationale, avec des températures à la hausse pour toutes les saisons, de +1 °C à +2 °C à l'horizon 2050 en moyenne annuelle, et de +1,5 °C à +3 °C à l'horizon 2080 d'après les scénarii B1, A1B et A2 du GIEC 2007 (Météo-France, 2011 ; [Figure 3.43](#)). Le phénomène serait légèrement plus marqué à l'intérieur des terres, au sud-est du Nord-Pas-de-Calais, de l'ordre de quelques dixièmes de degré de plus, cependant les températures moyennes les plus élevées sont situées sur les côtes de la région (Météo-France, 2011).

Sur le littoral, le nombre de jours de gel, entre 20 et 40 jours en 2011, pourrait être nul à la fin du siècle, alors que le nombre de jours pour lesquels la température est supérieure à 30 °C deviendrait courant à la fin du siècle à la saison chaude (Météo-France, 2011). Le nombre de jours de canicule augmente peu ou pas sur la première moitié du siècle mais fortement à l'horizon 2080 pour passer à entre 1 et 7 jours (dans le Cambrasis) (Météo-France, 2011).

3.4.1.b. Vents et tempêtes

Le nombre annuel de tempêtes sur la métropole a beaucoup varié sur la période 1949-1999, sans montrer de tendance significative, à la hausse ou à la baisse (CGDD, 2011 ; Onerc, 2015). Depuis les cent dernières années, aucune tendance significative ne se dégage sur l'ouest et le sud de l'Europe, ni sur le nombre de tempêtes, ni sur leur intensité (Onerc, 2015).

Les modèles actuels de projection climatique ne permettent pas de tirer de conclusions sur l'évolution de la fréquence et l'intensité des tempêtes hivernales en métropole (Ouzeau *et al.*, 2014). Cependant, une tendance générale à la baisse des vents moyens les plus forts peut être avancée pour la fin du XXI^e siècle, avec des résultats contrastés selon le modèle pour le nord de la métropole (Ouzeau *et al.*, 2014).

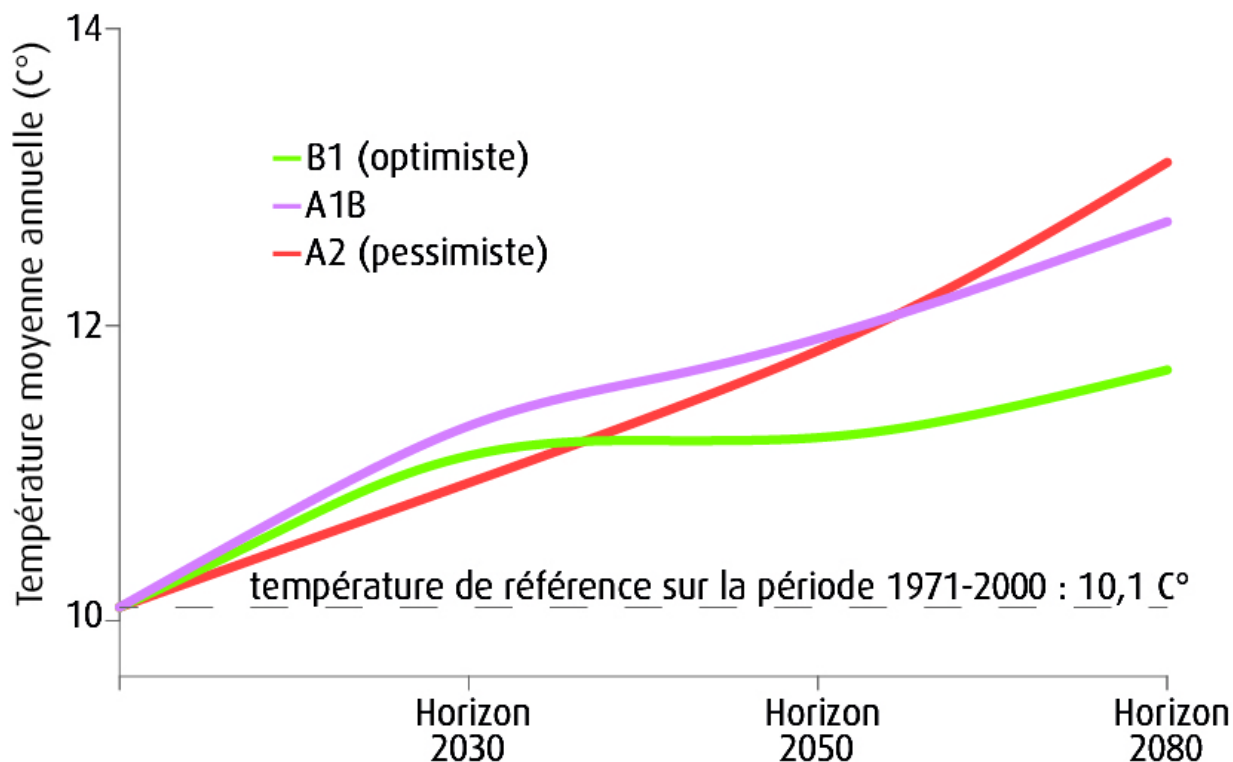


Figure 3.43 : Evolution de la température moyenne annuelle en Nord-Pas-de-Calais au cours du XXI^e siècle par rapport à la période de référence 1971-2000 selon les scénarii B1, A1B et A2 du GIEC 2007 (Source : Météo-France, 2011)

3.4.1.c. Précipitations et sécheresse

L'effet du littoral sur le régime de précipitations est plus complexe que celui sur les températures, en particulier lorsque la côte est bordée de zones montagneuses (Onerc, 2015). Il est aujourd'hui difficile d'apporter plus de précisions que celles déductibles des simulations globales réalisées pour le GIEC ou celles régionalisées sur l'Europe dans le cadre d'EURO-CORDEX²⁷ (Jacob *et al.*, 2014) ; ces évolutions sont par ailleurs moins consensuelles entre les différents modèles climatiques que pour les températures, hormis sur certaines régions du monde (Onerc, 2015).

En métropole, l'évolution des précipitations modélisées est associée à une forte incertitude, ce qui nécessite de prendre avec précaution les valeurs moyennes qui peuvent masquer de fortes disparités locales (Ouzeau *et al.*, 2014). Néanmoins, la majorité des simulations indique une légère augmentation progressive des précipitations hivernales au cours du XXI^e siècle (de l'ordre de +0,1 à +0,85 mm/j à l'horizon 2071-2100 pour les modèles WRF et Aladin-Climat) et une augmentation plus faible, voire une diminution, l'été (les modèles WRF et Aladin-Climat montrent des résultats divergents à l'horizon 2071-2100 de -0,38 à +0,32 mm/j) (Ouzeau *et al.*, 2014). Le littoral de la province reste globalement dans la moyenne nationale avec une augmentation moyenne des précipitations hivernales ; en été, les modèles restent sans tendance nette.

La majorité des modèles prévoient une augmentation généralisée sur l'ensemble de la métropole du taux de précipitations extrêmes, avec des valeurs relativement faibles pouvant toutefois dépasser localement les 5 % voire 10 % à l'horizon 2071-2100 en fonction du modèle et du scénario testé ; dans le détail, les modèles montrent une forte disparité entre territoires, sans tendance locale nette (Ouzeau *et al.*, 2014).

Sur le Nord-Pas-de-Calais, le cumul annuel de précipitations est stable par rapport à la climatologie actuelle pour tous les scénarios jusqu'en 2050, avec toutefois une disparité significative entre l'hiver et l'été (Météo-France, 2011) :

- lors de la saison froide, une tendance à augmenter entre +15 et +40 mm (soit +2 % à +10 % suivant les zones) ;
- lors de la saison chaude, une tendance à diminuer dans une même proportion, entre -15 et -50 mm (soit -4 % à -14 % suivant les zones).

A l'horizon 2080, les précipitations pour les deux saisons diminuent, mais avec une amplitude plus faible et plus incertaine en hiver, entre 0 et -30 mm pour 6 mois ; la diminution des précipitations estivales se poursuivant, le cumul annuel a une tendance significative à la baisse entre -40 et -110 mm/an (soit -4 % à -14 % suivant les zones) (Météo-France, 2011).

Le nombre de pluies supérieures à 10 mm reste proche des normales actuelles au cours du XXI^e siècle (Météo-France, 2011). Par conséquent, le cumul de précipitations total baissant, la part relative de fortes pluies augmenterait. La diminution des précipitations, notamment estivales, s'accompagne d'une augmentation du nombre de jours connaissant une sécheresse (définie comme un déficit en eau au cours du cycle hydrologique modélisé). La proportion de jours secs augmente très fortement au cours du siècle, d'après les projections climatiques, de 8 % aujourd'hui à 40 à 75 % en 2080. Le paramètre « pluies efficaces » (différence entre les précipitations et l'évapotranspiration potentielle) confirme la tendance à l'augmentation d'épisodes secs : aux horizons 2030 et 2050, l'évolution du paramètre reste faible mais est en nette diminution à l'horizon 2080, de -90 à -220 jours par rapport à 2030, soit -30 % à -70 % selon les zones (Météo-France, 2011).

27 Coordinated regional climate downscaling experiment

3.4.1.d. Température, salinité et pH de l'eau

Alors que la hausse des températures de l'air au-dessus des océans et des continents est variable selon les régions, la hausse de la température de la surface de la mer est observée par les satellites depuis 1995 sur la quasi-totalité des domaines maritimes proches des territoires français métropolitains et ultramarins (Onerc, 2015). L'océan est naturellement stratifié en température, avec des eaux relativement chaudes en surface, séparées des eaux froides profondes par une zone de variation thermique rapide appelée thermocline. La stratification océanique contrôle les échanges entre l'océan de fond et les eaux de surface ; elle est importante pour les écosystèmes marins dont la plupart résident dans les eaux de surface. Elle impacte également la dynamique océanique : les projections sur la fin du siècle s'accordent sur un ralentissement de la grande boucle de circulation océanique qui entraîne les eaux chaudes et salées de surface de l'Atlantique nord vers les régions arctiques (Rignot *et al.*, 2008 ; CGDD, 2011). Cependant, il reste encore des marges de progrès importantes à réaliser pour comprendre les phénomènes et mieux reproduire avec confiance l'avenir de la circulation océanique en Atlantique nord (CGDD, 2011).

Sur la province, les données disponibles à proximité de la mer du Nord indiquent une augmentation moyenne de l'ordre de 0,17 à 0,23 °C par décennie sur la période 1995-2005 d'après IRD (Onerc, 2015). Cette augmentation est la plus importante enregistrée sur les territoires français de métropole et d'outre-mer. Aucune donnée n'est disponible sur la province concernant l'acidification des eaux marines (du fait de l'absorption du CO₂) ; cependant, comme la solubilité du CO₂ diminue avec l'augmentation des températures, il est possible que les eaux à proximité de la mer du Nord soient moins concernées que d'autres à l'échelle globale par l'acidification de l'océan.

3.4.2 Evolution des paramètres hydrodynamiques

Ne sont décrits ci-dessous que les paramètres hydrauliques pouvant avoir un impact direct ou indirect sur l'évolution du littoral, notamment :

- le niveau marin, dont l'élévation avérée du niveau moyen va modifier l'extension des

zones terrestres atteintes par la mer en conditions normales et pendant les tempêtes, la propagation des ondes marines à la côte, y compris la déformation des vagues, les surcotes/décotes et les courants marins, et ainsi modifier profondément l'ensemble des forçages hydrodynamiques affectant actuellement les côtes basses meubles et, dans une moindre mesure, les côtes rocheuses,

- les états de mer, impactés par l'élévation du niveau moyen de la mer et par les modifications potentielles des champs de vents et de surcotes, qui modifieront les conditions de transport sédimentaire à la côte,
- les courants marins généraux, en lien avec la circulation océanique générale, qui pourront modifier les transports sédimentaires du large à la côte,
- les débits liquides des cours d'eau, qui pourront modifier leurs apports en matières solides à la côte et par conséquent les stocks sédimentaires côtiers,
- l'hydrologie des estuaires, marais et lagunes, notamment la salinisation des eaux côtières souterraines, qui impactera la nature et la répartition des habitats naturels terrestres et marins.

3.4.2.a. Niveau marin

Depuis le minimum du dernier âge glaciaire environ 21 000 B.P., le niveau moyen de la mer s'élève à une vitesse moyenne au niveau mondial qui s'est stabilisée à 0,5 mm/an au cours des 2-3 derniers millénaires (avec des variations inférieures à 6 cm par siècle ; Planton *et al.*, 2015). Cette vitesse s'est accélérée au cours du XX^e siècle avec le réchauffement climatique, principalement du fait de la dilatation thermique des océans et de la fonte et/ou l'écoulement des glaciers de montagne et calottes du Groenland et de l'Antarctique, pour atteindre (Planton *et al.*, 2015) :

- 1,7 ± 0,2 mm/an sur la période 1901-2011 (Wöppelmann *et al.*, 2009 ; Church, White, 2011 ; Wenzel, Schröter, 2014),
- et 3,2 ± 0,4 mm/an sur la période 1994-2014 (Nerem *et al.*, 2010 ; Cazenave *et al.*, 2014).

Cette élévation mondiale connaît des disparités locales, mesurées par les marégraphes depuis le XIX^e siècle et par l'altimétrie spatiale depuis les années 1990 (Figure 3.44). La variabilité régionale des vitesses d'élévation de la mer est principalement due à l'expansion thermique non uniforme de l'océan (Church *et al.*, 2013 ; Planton *et al.*, 2015). Sur la province, aucun marégraphe n'est actualisé exploité pour des tendances à long terme de l'élévation du niveau de la mer ; cependant, les stations marégraphiques des côtes métropolitaines atlantiques et méditerranéennes montrent des taux d'élévation sensiblement proches des valeurs mondiales mais légèrement inférieures sur la période 1993-2013 (Planton *et al.*, 2015).

Les projections d'élévation moyenne du niveau de la mer à l'échelle mondiale sont estimées entre 0,26 et 0,82 m à la fin du siècle selon le scénario RCP envisagé, par rapport au niveau actuel (Tableau 3.26 et Figure 3.45) ; le niveau continuera de monter au-delà de ces valeurs au XXII^e siècle, du fait de la forte inertie des océans (Planton *et al.*, 2015). Il est ainsi très probable que le taux d'augmentation du niveau moyen global de la mer au XXI^e siècle sera supérieur au taux observé au cours de la période 1971-2010, pour tous les scénarii RCP (Planton *et al.*, 2015). La distribution régionale de la montée des océans reste cependant difficile à prévoir car elle dépend de nombreux paramètres : température de l'océan, salinité, courants marins, pression

atmosphérique de surface, apports d'eaux continentales, mais aussi des déformations de la surface du sol et du champ de gravité (GIEC, 2013 ; Planton *et al.*, 2015). Le 5^e rapport du GIEC présente néanmoins les disparités régionales d'élévation du niveau de la mer à l'horizon 2090, telles que prévues par la moyenne d'ensemble des modèles climatiques globaux, en tenant compte de ces phénomènes. Cette avancée récente constitue un progrès pour estimer à l'échelle régionale l'évolution future de la mer mais elle reste associée à certaines incertitudes liées à la variabilité interne du système. Ce travail de descente d'échelle sur les côtes françaises reste à produire (Onerc, 2015). Pour Brest, l'élévation à l'horizon 2100 serait comprise entre 30 et 70 cm (intervalle de confiance à 90 %), avec un taux moyen compris entre 2,5 et 6,5 mm/an suivant les scénarii (Figure 3.45).

L'élévation du niveau moyen de la mer pourra avoir des répercussions sur la propagation de l'onde de marée, y compris en milieu estuarien. Par ailleurs, les modifications attendues pour les champs de vent et de pression pourront impacter les niveaux marins à la côte au travers des surcotes marines (liées à la dépression, au vent, aux seiches...) et de la surcote liée aux vagues. Cependant, ces effets indirects sont d'un ordre de grandeur inférieur aux conséquences de l'élévation du niveau marin (Ullman, 2008 ; CGDD, 2011 ; Nicholls *et al.*, 2014 ; Onerc, 2015) et sont peu traités actuellement.

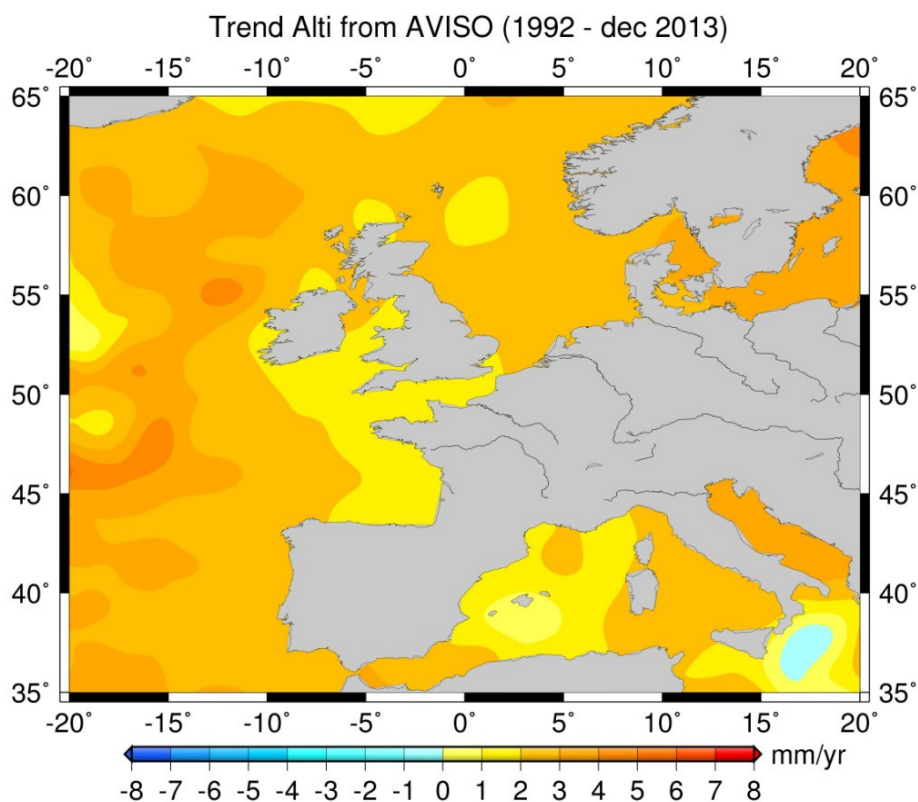


Figure 3.44 : Distribution géographique des vitesses de variation du niveau de la mer (1992-2013) d'après les mesures altimétriques de Topex/Poséidon, Jason-1 et 2, ERS-1 et 2 et Envisat, le long des côtes de l'Europe occidentale. (Source : LEGOS ; Planton *et al.*, 2015)

Tableau 3.26 : Projections de l'élévation du niveau moyen global de la mer à la fin du XXI^e siècle (en mètres pour 2046-2065 et 2081-2100 par rapport à 1986-2005). Les fourchettes de valeurs données pour chaque scénario d'émission correspondent à une probabilité de 67 % (changement « probable ») (d'après GIEC, 2013 ; Planton et al., 2015)

Scénario	Fourchettes des moyennes d'élévation du niveau de la mer (en m)	
	2046-2065	2081-2100
RCP2.6	0,17-0,31	0,26-0,55
RCP4.5	0,19-0,33	0,32-0,63
RCP6.0	0,18-0,32	0,33-0,63
RCP8.5	0,22-0,37	0,45-0,82

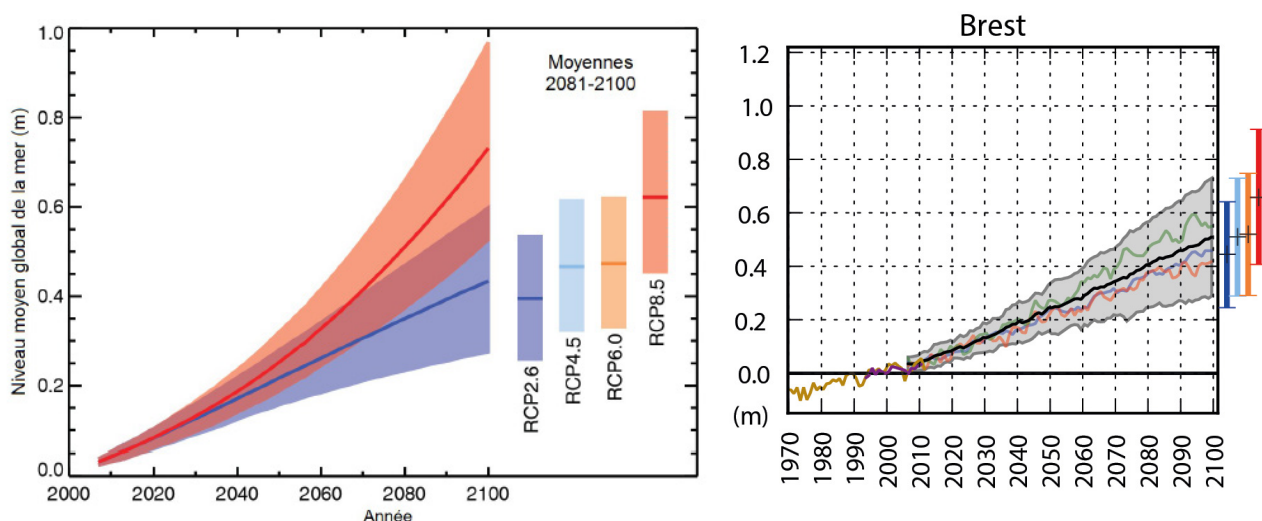


Figure 3.45 : Projection de l'élévation du niveau moyen global de la mer au XXI^e siècle relativement à 1986-2005 pour les deux scénarii d'émission RCP2.6 et RCP8.5 (à gauche) et projection de la variation du niveau de la mer à Brest (à droite). A gauche, les plages de couleur autour des courbes correspondent à l'intervalle d'un changement « probable » (67 % de chances) ; les barres verticales correspondent à un changement « probable » de la moyenne sur la période 2081-2100 pour tous les scénarii RCP, et les barres horizontales aux valeurs médianes associées (d'après GIEC, 2013 ; Planton et al., 2015). A droite, les lignes jaune puis mauve représentent respectivement les niveaux observés au marégraphe, puis par satellite à partir de 1993 ; la région grisée représente l'intervalle de confiance à 90 % pour 21 simulations utilisées dans Climate Models Intercomparison Project 5 (CMIP5) pour le scénario RCP4.5, les lignes de couleur représentant les réalisations de 3 modèles tirés au hasard et la ligne noire la moyenne de l'ensemble ; les barres verticales de couleur représentent la dispersion de l'ensemble (intervalles de confiance à 5 % et à 95 %) obtenue en 2100 pour les scénarii RCP2.6 (bleu foncé), RCP4.5 (bleu clair), RCP6.0 (jaune) et RCP8.5 (rouge) (d'après GIEC, 2013 – Church et al., 2013).

3.4.2.b. États de mer

L'évolution en fréquence et en intensité des houles extrêmes ne peut pas être analysée par les données de mesure de houle, car la période d'observation disponible est insuffisante pour ce type d'analyse. Les impacts possibles du changement climatique sur les états de mer peuvent toutefois être analysés grâce aux simulations numériques des états de mer passés et « du futur », à partir de « champs de vents du futur » issus des scénarii du GIEC. Le résultat de ces simulations est donc très dépendant du/des scénarii choisi(s). Plusieurs bases de données ont ainsi été développées sur les côtes françaises de l'Atlantique nord-est (façades Atlantique, Manche et mer du Nord) à partir des scénarii B1, A1B et A2 du 4^e rapport du GIEC entre 2010 et 2014 (Tableau 3.27).

Ces simulations concordent sur les aspects suivants issus de Laugel (2014) :

- la répartition spatiale des tendances d'évolution du climat moyen futur est proche entre les scénarios B1, A1B et A2, à l'exception de l'hiver où les tendances varient entre les scénarii ;
- pour la variabilité saisonnière (évolution des moyennes saisonnières) :
 - une décroissance générale du climat moyen de H_{m0} est observée le long des côtes Atlantique et Manche pour les quatre saisons, à l'exception des scénarii B1 et A1B en hiver ;
 - l'augmentation (respectivement la diminution) la plus forte du climat moyen des H_{m0} , T_{02} et θ_m intervient en hiver (respectivement en été) pour le scénario B1 (respectivement A2) le long de l'Atlantique ;

- une augmentation du climat moyen de H_{m0} est observée aux abords de la mer du Nord en hiver, au printemps pour B1 et en été pour B1 et A1B ;
- pour l'évolution du climat extrême (paramètres associés aux quantiles 95 % de H_{m0}) :
 - les tendances sur les hauteurs de vagues en hiver varient entre les scénarii le long de l'Atlantique : une augmentation de l'évolution de H_{m0} et T_{02} pour B1, mais une diminution dans la partie sud de l'Atlantique pour A1B et A2 ;
 - en mer du Nord, une augmentation des paramètres d'états de mer associés au climat extrême est observée, à l'exception des côtes anglaises où la diminution des paramètres H_{m0} , T_{02} et θ_m est significative.

Le scénario A2 lié au plus fort taux d'émission de gaz à effet de serre ne génère pas systématiquement les changements les plus importants : par exemple, en hiver, le scénario B1 présente la majorité des changements de plus forte intensité sur l'évolution des paramètres moyens d'états de mer (bien que ces derniers ne soient pas significatifs au sens statistique du terme) et pour les trois autres saisons, un tiers des évolutions les plus fortes sont liées au scénario A1B et seuls les deux tiers restants au scénario A2.

Toutefois si les tendances d'évolutions d'états de mer décrites ci-dessus sont cohérentes entre les différents travaux cités, des incertitudes en termes d'intensité existent également.

Tableau 3.27 : Bases de données existantes sur les côtes de la province pour les simulations d'états de mer futurs issus des champs de vent futurs liés aux scénarii du GIEC

Zone géographique	Scénarii simulés	Modèle utilisé	Références bibliographiques
Nord-est de l'océan Atlantique	B1, A1B et A2 (GIEC, 2007)	Maillage océanique ANEMOC-1 Logiciel TOMAWAC	http://etatsdemerfuturs.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/ Morellato <i>et al.</i> , 2010
		BOBWA-10kH	Charles, 2012 ; Charles <i>et al.</i> , 2012
		Maillage ANEMOC-2 Logiciel TOMAWAC	Laugel, 2014

3.4.2.c. Courants marins

La circulation thermohaline de l'Atlantique Nord, à laquelle le Gulf Stream participe, transporte un flux de chaleur vers le nord égal à celui de l'atmosphère et contribue à maintenir des températures relativement douces en Europe du Nord-Ouest. Bien que des observations ponctuelles aient suggéré une diminution de 30 % depuis les années 1990 de cette circulation vers le nord, des données complémentaires sont nécessaires pour confirmer cette interprétation du fait de sa forte variabilité naturelle (CGDD, 2011). La circulation thermohaline dans l'Atlantique Nord ralentira très probablement au cours du XXI^e siècle ; mais il est très peu probable que cette circulation connaisse une transition brusque de grande ampleur sur cette période (GIEC, 2007 ; CGDD, 2011). L'incertitude demeure importante sur ce phénomène et des changements à plus long terme de la circulation thermohaline de l'océan Atlantique ne peuvent être évalués avec confiance (GIEC, 2007 ; CGDD, 2011).

3.4.2.d. Débits liquides et solides des cours d'eau

Il n'existe pas de tendance généralisée discernable à l'échelle de la métropole sur les débits des cours d'eau dans la seconde moitié du XX^e siècle, que ce soit en termes de hautes et basses eaux, régimes, etc. (Renard, 2006 ; Boé, 2007). Certaines évolutions, cohérentes au niveau des régions hydroclimatiques, sont néanmoins notées, notamment une augmentation des maxima annuels dans la région continentale du nord-est, qui pourrait être cohérente avec l'augmentation des pluies sur la région et une aggravation des crues en région océanique (nord de la France), apparemment liée au remplissage des nappes d'accompagnement (Renard, 2006 ; Boé, 2007).

Les projections de débits liquides des cours d'eau de métropole au cours du XXI^e siècle (Boé, 2007 ; MEDDE, 2012 ; Chauveau *et al.*, 2013) convergent vers :

- une diminution significative globale des débits moyens annuels, de l'ordre de 10 % à 40 % selon les modèles entre les périodes 1961-1990 et 2046-2065,
- une baisse prononcée des débits d'étiage pour une grande majorité des cours d'eau,
- des évolutions plus hétérogènes et globalement moins importantes sur les crues.

Ces évolutions globales varient au cours de l'année, suivant les saisons. La quasi-totalité des modèles testés par Boé (2007) issus des projections climatiques du 4^e rapport du GIEC (2007) sur la métropole s'accorde sur (Boé, 2007 ; Boé *et al.*, 2009) :

- une diminution généralisée des débits en été et en automne (de l'ordre de 30 % en moyenne pour les deux saisons, et jusqu'à 60 % dans le sud), avec une faible dispersion inter-modèles pour ces saisons (de l'ordre de 10 %),
- en hiver et au printemps, des changements de moindre amplitude (avec une faible diminution des débits en hiver sur l'ensemble de la métropole, excepté sur le sud-est), mais une dispersion inter-modèles un peu plus forte.

Pour certains territoires, comme le nord de la France, l'augmentation des précipitations dans les modèles du GIEC en moyenne d'ensemble ne suffit pas pour augmenter les débits, compte tenu de l'augmentation conjointe de l'évaporation (Boé, 2007). Des impacts forts sont à attendre sur les débits dès le milieu du XXI^e siècle, avec des diminutions importantes en été et en automne et une forte augmentation du nombre de jours d'étiage ; les impacts ne s'aggravent que faiblement après 2060 (Boé, 2007). Les débits intenses diminuent moins que les débits moyens, voire augmentent dans certains cas (Boé, 2007). Par ailleurs, la montée des eaux marines, associée à une augmentation des précipitations, laisse craindre des épisodes plus difficiles d'évacuation des eaux continentales par le système des waterings.

Les conséquences du changement climatique sur les projections de débits solides, dont les variations sont liées à la pluviométrie mais également aux usages des sols (usages agricoles ou aménagements fluviaux tels que seuils et barrages), n'ont a priori pas fait l'objet de modélisation (Ifremer-UBO-Artélia-GIP Loire Estuaire, 2014). Il existe néanmoins des modèles de prédiction des apports solides couplés à des modèles hydrologiques forcés par les évolutions climatiques à l'échelle de plusieurs milliers d'années (par exemple Syvitski, Kettner, 2008). Ces prédictions de transport sédimentaire reposent sur des formulations semi-empiriques qui requièrent le paramétrage d'informations moyennées sur le bassin (lithologie, usage des sols, volume des réservoirs susceptibles de piéger des sédiments), données dont la détermination s'avère néanmoins difficile en pratique (Ifremer-UBO-Artélia-GIP Loire Estuaire, 2014).

3.4.2.e. Hydrologie des estuaires et marais

En dehors de l'élévation de la température qui peut impacter la faune et la flore des secteurs estuariens et de marais, l'influence du changement climatique sur les estuaires se manifestera surtout par un changement (Ifremer-UBO-Artélia-GIP Loire Estuaire, 2014) :

- des facteurs hydrodynamiques, tels que l'élévation du niveau moyen de la mer et les modifications éventuelles dans le régime des tempêtes, pouvant engendrer notamment des intrusions salines, des changements de salinité de l'eau ou une remontée du « bouchon vaseux » dans l'estuaire,
- des apports liquides et solides (sables et vases) des fleuves en amont de l'estuaire, dont les évolutions temporelles ne sont pas nécessairement semblables, et qui peuvent, pour partie, être dépendants des usages au niveau du bassin versant et du lit majeur du fleuve.

L'intrusion saline correspond à une avancée vers les terres de la zone d'interface entre l'eau douce plus légère et l'eau de mer sous-jacente (dont la densité est plus importante) ; l'augmentation du niveau marin déstabilisera les équilibres actuels et facilitera les intrusions salines (Werner, Simmons, 2009 ; Onerc, 2015). Les aquifères côtiers sont plus ou moins sensibles aux intrusions salines en conditions naturelles ou sous influence anthropique (prélèvement pas pompage), en fonction de leur structure, de leur hétérogénéité et de leur relation avec les eaux de surface : l'impact d'une invasion d'eau salée dans un aquifère littoral peut en effet se révéler irréversible (Onerc, 2015). En métropole, les aquifères côtiers et insulaires sont constitués de 95 aquifères superficiels et de 17 aquifères profonds côtiers (Petit *et al.*, 1996 ; Onerc, 2015). La vulnérabilité spécifique des nappes souterraines vis-à-vis d'une intrusion marine en contexte de surélévation du niveau marin de plus de 2 m a été cartographiée par Dörfliger *et al.* (2011) ; elle intègre les données relatives à la nature des terrains réservoirs souterrains et la pression des

prélèvements (Figure 3.12).

Avec l'élévation du niveau de la mer, des simulations hydrodynamiques menées sur les estuaires de la Seine (Le Hir, 2000 ; Lemoine, 2014) et de la Loire (Bassoullet, Le Hir, 1996 ; Dribault, Peltier, 1996) montrent que la salinité devrait progresser en amont des estuaires ; ces effets semblent cependant faibles en comparaison des variations qui ont affecté le front de salinité de ces deux estuaires au cours des dernières décennies (Ifremer-UBO-Artélia-GIP Loire Estuaire, 2014). De telles simulations n'ont pas été menées sur les estuaires de la province.

Le bouchon vaseux correspond à une zone de turbidité maximale dans les estuaires tidaux. Son positionnement dans l'estuaire est susceptible de remonter vers l'amont si le débit du fleuve diminue. Par ailleurs, son extension amont-aval est susceptible d'augmenter, compte tenu du rétrécissement des sections vers l'amont du fleuve (Ifremer-UBO-Artélia-GIP Loire Estuaire, 2014). Avec l'élévation du niveau de la mer, les simulations hydrosédimentaires menées sur les estuaires de la Seine (Le Hir, 2000), de la Loire (Bassoullet, Le Hir, 1996) et de la Gironde (Laborie *et al.*, 2014 ; Planton *et al.*, 2015) sur la pénétration des eaux marines et le bouchon vaseux montrent, en conservant la bathymétrie initiale, que ceux-ci se déplaceraient également vers l'amont de l'estuaire.

Ces changements d'apports solides et du bouchon vaseux sont susceptibles de modifier la couverture sédimentaire, dans le chenal mais aussi sur les rives et estrans latéraux, jusqu'aux zones littorales adjacentes à l'embouchure des estuaires (Ifremer-UBO-Artélia-GIP Loire Estuaire, 2014). Ces impacts d'ordre hydrosédimentaire sont aussi susceptibles de modifier le fonctionnement écologique des milieux estuariens, à travers la qualité de l'eau (oxygénation des eaux estuariennes) et la transformation des biotopes (répartition des estrans sous forme de slikke vaseuse ou de schorre végétalisé, chenaux plus ou moins mobiles recouverts ou non de champs de dunes migrantes) (Ifremer-UBO-Artélia-GIP Loire Estuaire, 2014).

