



**HAL**  
open science

# Meteorological and marine conditions leading to coastal flooding along the French coast of the Eastern English Channel

Pauline Letortu, Stéphane Costa, Olivier Cantat, Olivier Planchon

► **To cite this version:**

Pauline Letortu, Stéphane Costa, Olivier Cantat, Olivier Planchon. Meteorological and marine conditions leading to coastal flooding along the French coast of the Eastern English Channel. *La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau*, 2016, 2 (2), pp.41-46. 10.1051/lhb/2016017 . hal-01295475

**HAL Id: hal-01295475**

**<https://hal.science/hal-01295475>**

Submitted on 15 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.

# CONDITIONS MÉTÉO-MARINES RESPONSABLES DES INONDATIONS PAR LA MER EN MANCHE ORIENTALE FRANÇAISE

Pauline LETORTU<sup>(1,2)</sup>, Stéphane COSTA<sup>(2)</sup>, Olivier CANTAT<sup>(2)</sup>

Olivier PLANCHON<sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Université de Bretagne Occidentale, LETG-Brest GÉOMER UMR 6554 CNRS – IUEM, Technopôle Brest-Iroise, Rue Dumont d'Urville, 29280 Plouzané, France – pauline.letortu@univ-brest.fr

<sup>(2)</sup> Université de Caen Basse-Normandie, LETG-Caen GÉOPHEN UMR 6554 CNRS – Esplanade de la Paix, 14032 Caen, France – stephane.costa@unicaen.fr, olivier.cantat@unicaen.fr

<sup>(3)</sup> Université de Rennes 2-Haute Bretagne, LETG-Rennes COSTEL UMR 6554 CNRS – Place du recteur H. Le Moal, 35043 Rennes, France – olivier.planchon@uhb.fr

*L'inondation par la mer (submersion marine) est le résultat d'une conjonction de facteurs : une faible pression atmosphérique, un fort vent d'afflux (ces deux facteurs peuvent déterminer une surcote ou « onde de tempête ») au moment d'une pleine mer de vive-eau.*

*Le littoral français de la Manche orientale a fait l'objet de travaux sur la caractérisation des submersions marines génératrices de dommages. À partir d'un inventaire de ces inondations entre 1949 et 2010, l'identification de paramètres météorologiques tels que le gradient de pression de nord-ouest et le passage du front froid permet de mieux appréhender la genèse de la majorité des submersions. Cependant, quelques cas ne peuvent pas être expliqués par ces seuls paramètres. Pour les comprendre, il est nécessaire d'intégrer un autre facteur à savoir les conditions météo-marines préalables à l'inondation par la mer. En effet, de quelques jours à quelques semaines avant l'inondation, la plage peut s'adapter à des conditions hydrodynamiques un peu plus fortes en subissant un abaissement de son profil. Cet abaissement peut favoriser les franchissements et les dommages associés.*

*La finalité de ce travail est de participer à l'amélioration du système d'alerte des inondations par la mer du secteur d'étude en utilisant des événements extrêmes mais aussi non extrêmes pour mieux comprendre la variabilité des phénomènes.*

**MOTS CLEFS :** submersion marine, Manche orientale, conditions météo-marines, conditions morphologiques

## *Meteorological and marine conditions leading to coastal flooding along the French coast of the eastern English Channel*

*Coastal flooding due to storm is the result of a combination of factors: a low air pressure, a strong wind with a direction perpendicular to the coast at the time of spring high tide (the average coefficient of spring tide is about 95).*

*Characterization of coastal flooding events leading to damages has received attention and many studies have been carried out along the coast of the eastern English Channel. Thanks to our inventory of coastal flooding events from 1949 to 2010, the identification of the meteorological parameters such as the north-west pressure gradient or the passage of an atmospheric cold front during the storm has been possible. This identification leads to a better warning of numerous coastal flooding events. However, some of them cannot be explained by these parameters. To understand them, it is necessary to integrate another factor: the meteorological and marine conditions before coastal flooding. For a few days or weeks before a coastal flooding event, the beach can adapt to stronger hydrodynamic conditions. This adaptation can be a lowering of the beach profile. Lowering can lead to flooding and damages.*

*The aim of the study is to improve prediction/warning of these events in using extreme events and non-extreme events that can end in major damages on these coastal areas.*

**KEYWORDS :** coastal flooding, eastern English Channel, meteorological and marine conditions, morphological conditions

## **I INTRODUCTION**

Après le passage de la tempête Xynthia et l'inondation par la mer induite sur le littoral atlantique et en Manche, l'étude des phénomènes météo-marins à l'origine de ces franchissements et leur prévision/prévention

ont connu un net regain d'intérêt. Les côtes basses normano-picardes subissent de fortes submersions et les populations locales payent alors souvent un lourd tribut. La Manche orientale est une mer épicontinentale, caractérisée par un fort marnage (8 m à Dieppe) et des conditions d'agitation limitées (mer du vent) qui atteignent cependant 4,3 m (période de retour annuelle du  $H_{1/3}$  à Dieppe) [Allen, Delannoy, 1990]. Le rivage est constitué de côtes à falaises entrecoupées de vallées basses urbanisées dont le plancher est souvent inférieur aux pleines mers de vive-eau (parfois de plus d'un mètre). Ces vallées sont protégées par des cordons de galets fragiles adossés à des ouvrages longitudinaux (perrés). Lors de forts coups de vent d'afflux agissant durant une pleine mer de vive-eau, ce sont ces ouvrages qui sont franchis par la mer. L'objectif de ce travail est double. Il s'agit, d'une part, de définir une éventuelle évolution de la fréquence et de l'intensité des inondations par la mer (submersions marines) qui, pour une partie de la communauté scientifique, devraient s'accroître avec le réchauffement climatique contemporain ; et, d'autre part, de caractériser les divers paramètres météorologiques et morphologiques aboutissant à ces phénomènes générateurs de dommages.

## II INVENTAIRE DES SUBMERSIONS MARINES

De 1949 à 2010 (62 années), 78 submersions marines d'intensité faible (12 cas), modérée (12 cas), sévère<sup>1</sup> (48 cas) et indéterminée (6 cas) ont été recensées sur les 160 km de côte allant du Havre (Haute-Normandie) à Cayeux-sur-Mer (Picardie) [Letortu, 2013]. Toutes les intensités sont intégrées dans ce travail afin de comprendre les facteurs intervenant dans la genèse de l'ensemble des submersions.

Ce recensement n'est probablement pas exhaustif, malgré le recoupement méthodique des informations d'origines diverses<sup>2</sup>. L'approche historique adoptée met en évidence les sites particulièrement sensibles à cet aléa (au moins 10 submersions, toutes intensités confondues depuis 62 ans) : Mers-les-Bains, Le Tréport, Criel-sur-Mer, Dieppe (site affecté principalement par des submersions faibles), Hautot-sur-Mer, Quiberville, Etretat et Fécamp (figure 1).

---

<sup>1</sup> Rémi Caspar (Météo-France) a proposé trois degrés de gravité pour la rédaction du Plan ORSEC, sous l'égide de la Préfecture de Seine-Maritime [SIRACEDPC, 2008]. « Une submersion 'faible' correspond à un envahissement par la mer de l'ensemble d'une plage et de la digue promenade (perré), ou encore un dépassement faible de quais portuaires. Une submersion 'modérée' fait pénétrer les eaux sur la voie publique la plus proche d'un perré ou d'un quai portuaire. Une submersion dite 'sévère' pousse les eaux à l'intérieur d'une commune et y provoque des dégâts relevant de la 'catastrophe naturelle' ».

<sup>2</sup> Les sources de cet inventaire sont multiples : les journaux locaux (*Les informations dieppoises*, *Liberté de Normandie*), la base de données du MEEDAT, la thèse de S. Costa [Costa, 1997], les archives du C.E.T.E. de Rouen, les archives communales...

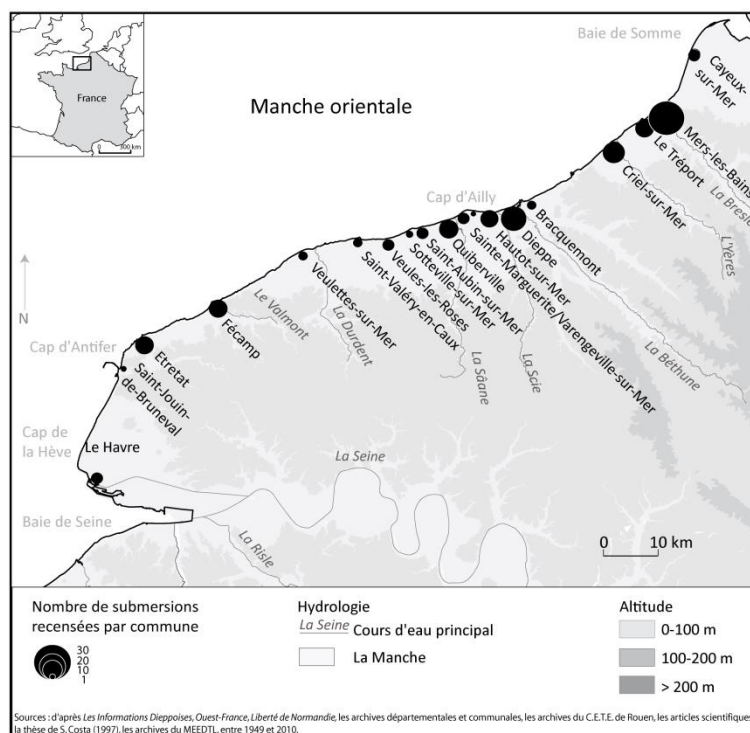


Figure 1 : Nombre de submersions marines recensées par commune entre Le Havre et Cayeux-sur-Mer (1949-2010)

### III ANALYSE DES FRANCHISSEMENTS

#### III.1 ÉVOLUTION DE LA FRÉQUENCE ET DE L'INTENSITÉ DES SUBMERSIONS

Au cours des 62 années d'observation, le nombre d'évènements semble connaître une légère tendance à l'augmentation. Cependant, cette évolution n'est pas statistiquement significative et peut correspondre à des phénomènes de résonance journalistique induite par la sensibilité des sociétés aux problématiques environnementales. De plus, l'appropriation parfois inconsidérée de la frange côtière par l'urbanisation peut accentuer artificiellement la tendance. Par ailleurs, nous pouvons constater une grande variabilité interannuelle, marquée par une pulsation positive du nombre de submersions sévères entre le milieu des années 1970 et l'année 2000 (figure 2).

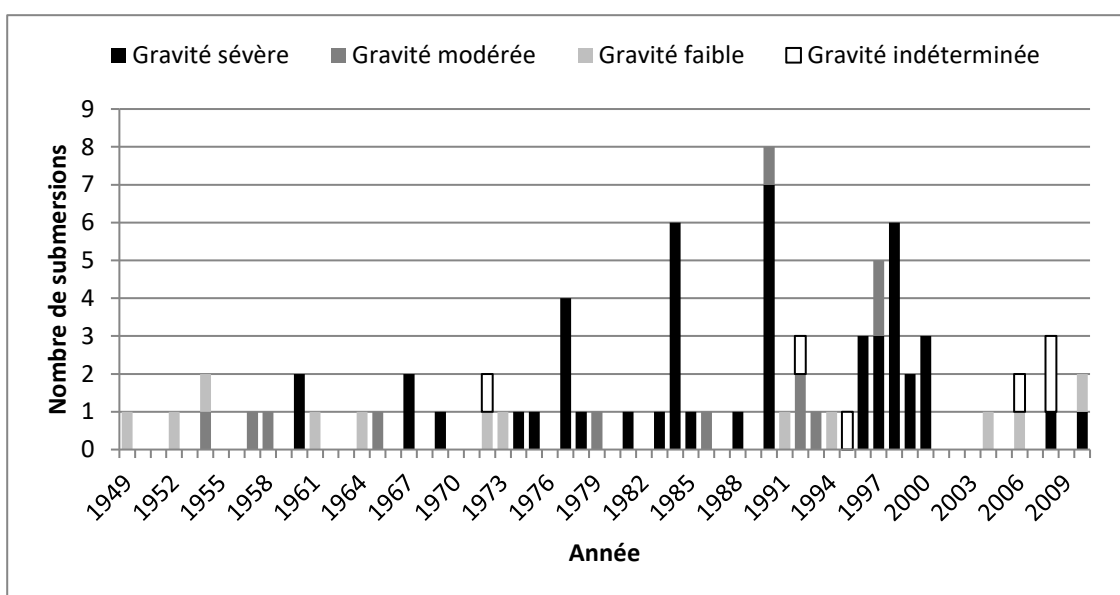


Figure 2 : Nombre de submersions marines recensées en Manche orientale selon leur intensité de 1949 à 2010

Cet inventaire précisément daté permet également de caractériser les paramètres météorologiques et marégraphiques des évènements à franchissement.

### III.2 CONDITIONS MÉTÉO-MARINES MENANT AU FRANCHISSEMENT

L'analyse des évènements passés a montré que les submersions marines sévères sont majoritairement induites par deux grands types de circulation :

- 1) une circulation rapide d'ouest en est, à hauteur de la Manche, d'une dépression qui s'accompagne de vents de nord-ouest en position de traîne (1/3 des cas) ;
- 2) une pénétration en Mer du Nord d'une dépression atlantique de plus haute latitude, se dirigeant vers le Danemark ou les Pays-Bas (2/3 des cas). Le gradient de pression se renforce alors sur la Manche. Des forts vents de nord-ouest se lèvent et persistent tant que la dépression ne s'éloigne pas ou ne se comble pas [Costa, 1997].

Ces situations majoritaires induisent donc un fort gradient de pression de nord-ouest en surface. Afin d'aboutir à une évaluation globale et rapide sur un vaste espace maritime de ces situations barométriques, nous avons défini un transect imaginaire de 750 km de long allant de la Pointe du Raz à Cromer (Norfolk), perpendiculaire aux flux de nord-ouest (figure 3). L'analyse des cartes synoptiques des champs de pression de surface de l'ensemble des situations à submersion fait apparaître qu'il faut un gradient isobarique d'au moins 4 intervalles (soit une différence de 20 hPa) pour qu'il y ait inondation par la mer [Costa, 1997].

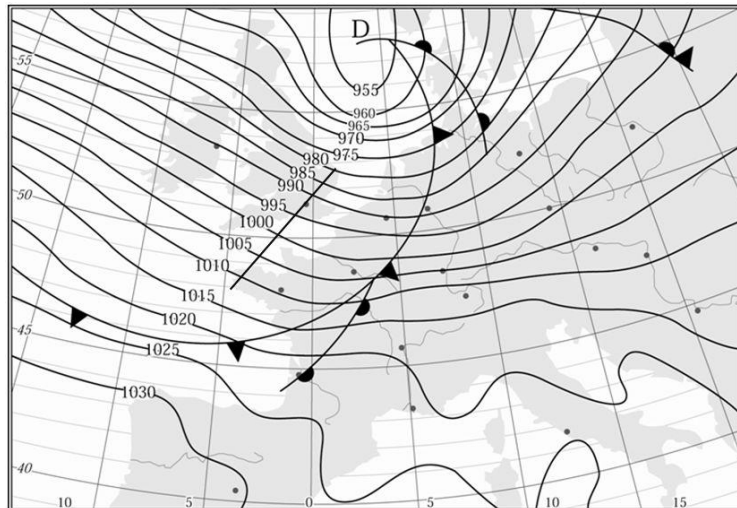


Figure 3 : Gradient de pression de nord-ouest de 30 hPa, soit 6 intervalles isobariques (indice 6) (situation du 26/02/1990, à 12 h UTC) [Costa, 1997]

Pour des raisons d'homogénéité des données sur la période 1949-2010, notre travail s'est porté sur les réanalyses NCEP<sup>3</sup> à 0 h et 12 h UTC, disponibles sur le site internet de Météociel (avec une résolution spatiale limitée de 2,5°x2,5°), et non sur divers documents difficilement comparables (bulletins quotidiens de renseignements (BQR), bulletins quotidiens d'études (BQE) ou bulletins météorologiques européens (BME)).

De 1949 à 2010, nous constatons que :

- parmi les submersions marines induites par les flux d'ouest à nord-ouest (69 cas), 28 sont induites par un gradient de pression de nord-ouest supérieur ou égal à 4, dont 20 sont sévères, 3 sont modérées, 3 de faible intensité et 2 indéterminées ;
- le nombre de situations d'indice de nord-ouest supérieur ou égal à 4 connaît une forte variabilité interannuelle (figure 4). Là encore, aucune tendance ne semble se dégager, hormis quelques oscillations d'ordre décennal peu corrélées à l'oscillation nord-atlantique (NAO) ;
- il n'existe pas de relation systématique entre le nombre de situations à fort gradient de pression et l'occurrence des submersions marines. Par conséquent, d'autres critères explicatifs sont à prendre en compte.

<sup>3</sup> National Centers for Environmental Prediction

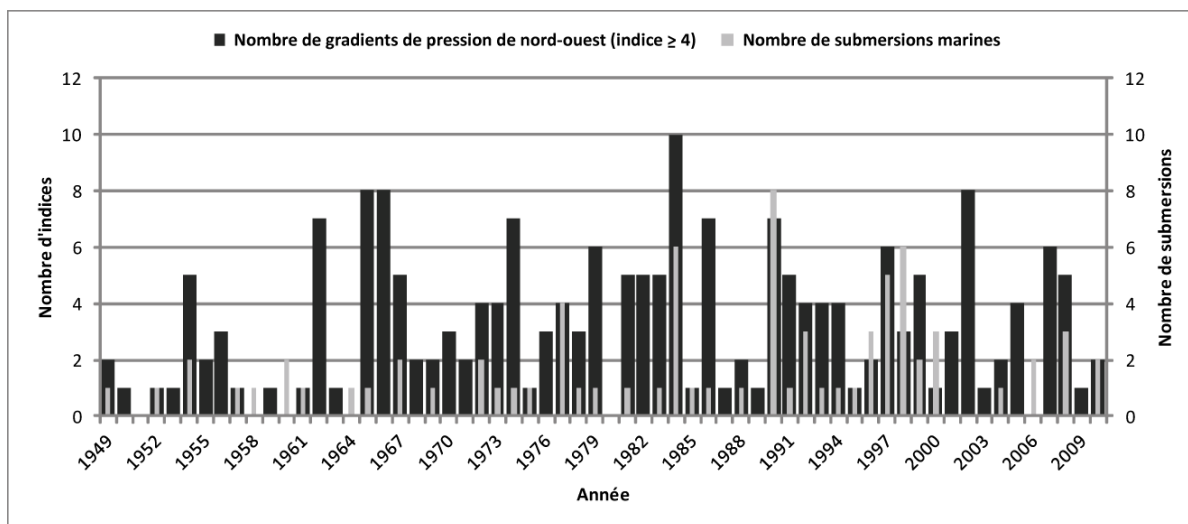


Figure 4 : Nombre de gradients de pression de nord-ouest (indice  $\geq 4$ ) et de submersions marines en Manche orientale de 1949 à 2010

Le travail sur le gradient de pression nord-ouest possède une limite qu'il convient d'évoquer. Le basculement des champs de pression ouest à nord-ouest peut se produire à un pas de temps parfois plus fin que le pas de temps des réanalyses NCEP (0 h et 12 h). Pour pallier ce biais, une analyse par les données ERA 40 et ERA 75 sera entreprise prochainement car ces données sont maintenant plus accessibles.

L'analyse de chacune des submersions (53 entre 1981<sup>4</sup> et 2010 dont 36 sévères, 7 modérées, 5 faibles et 5 indéterminées) permet de caractériser les conditions météo-marines minimales au moment du franchissement. Il s'agit finalement de définir les seuils marégraphiques (hauteur donnée par le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine) et aérologiques (vitesse du vent donnée par Météo-France) au-delà desquels il y a risque de submersion.

En Manche orientale, la station Météo-France du Cap de la Hève (Le Havre) et le sémaphore de Dieppe sont les seuls postes de mesures en contexte littoral. Préalablement à l'analyse, ils ont été expertisés afin d'évaluer leur fiabilité et leur représentativité géographique. Stéphane Costa en 1997 évoque un phénomène connu des prévisionnistes de la station du Havre, à savoir que la position de chacune des stations sous-estime des secteurs de vent. Le sémaphore de Dieppe minore les flux de sud, tandis que la station du Cap de la Hève minimise ceux de nord. En raison de l'importance des conditions anémométriques préférentiellement d'afflux (ici d'ouest à nord-est), le sémaphore de Dieppe constitue notre référence. De plus, l'orientation sud-ouest/nord-est de son trait de côte est représentative de la grande majorité des côtes basses du secteur d'étude. Au regard de la figure 5, les seuils anémométriques (au moment du franchissement) seraient de l'ordre de 6 m/s et de 8,50 m pour la hauteur de la marée prédite à Dieppe.

<sup>4</sup> Pour garantir la fiabilité des résultats, l'analyse de la vitesse et de la direction des vents mesurés s'est limitée à la période postérieure à 1981, conformément aux préconisations techniques de Météo-France (harmonisation des instruments et des procédures de mesure).

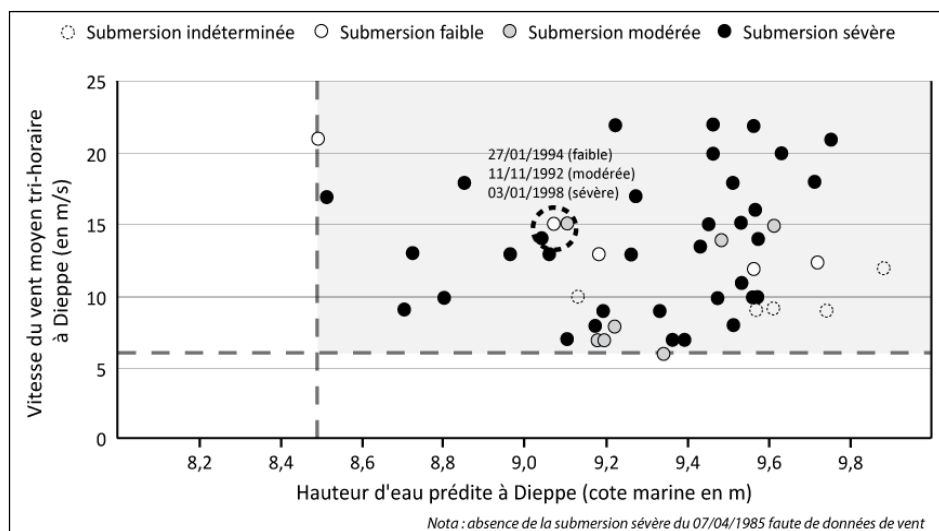


Figure 5 : Submersion marine, marée prédite et vitesse du vent (tri-horaire et horaire) à Dieppe (1981-2010)

De plus, la figure 5 montre que pour des seuils de marée et de vent équivalents, il est possible d'observer des submersions marines sévères, modérées et faibles. Cette situation suggère que l'intensité des facteurs vent et hauteur d'eau n'induit pas une relation linéaire et systématique quant à l'intensité de la submersion. Par conséquent, d'autres facteurs que la hauteur de la marée et la vitesse du vent sont susceptibles de contribuer à l'intensité des inondations par la mer.

#### IV FRONT FROID ET CONDITIONS METEO-MARINES PREPARATOIRES : FACTEURS EXPLICATIFS COMPLÉMENTAIRES

##### IV.1 PASSAGE DU FRONT FROID AU MOMENT DE LA PLEINE MER

Des études sur le littoral normano-picard ont montré que 70 % des inondations par la mer s'effectuaient lors du passage d'un front froid actif [Costa et al., 2004 ; Pirazzoli et al., 2006 ; Caspar, Costa, Jakob, 2007].

De fait, à l'approche du front froid, la pression baisse considérablement et atteint son minimum devant le front, alors que dans le même temps le vent forcé progressivement. Par ailleurs, juste à l'arrière de ce front, la pression amorce une nette remontée tandis que le vent subit une rotation importante et tourne à l'ouest, voire au nord-ouest, restant très fort et avec de violentes rafales. Cette situation a deux conséquences. D'une part, une forte surcote se crée au droit du front froid en raison du minimum barométrique et, surtout, l'afflux d'eau à la côte augmente du fait du renforcement du vent et de sa rotation vers l'ouest. Enfin, à la faveur du changement brutal de direction du vent, le passage du front froid (pouvant produire ses effets durant 2 à 3 h) peut former une houle croisée (chaotique et très cambrée) particulièrement efficace pour le démaigrissement des plages et la projection d'eau au-delà des ouvrages [Costa, 2005 ; Caspar et al., 2009].

La position du front froid<sup>5</sup> peut avoir des conséquences variées le long du littoral de la Manche. En effet, sa progression peut être en phase ou non avec celle de l'onde de marée. La conjonction front froid/onde de marée est favorable à de forts franchissements (37 cas sur 53).

Mais, au total, parmi ces 53 inondations par la mer, 10 ne s'expliquent pas par un fort gradient de pression de nord-ouest et/ou le passage d'un front froid. Les conditions météo-marines seules ne peuvent expliquer ces cas. Un autre facteur explicatif doit être pris en considération.

<sup>5</sup> L'étude du front froid s'est effectuée grâce à la consultation :

- des bulletins météorologiques européens (00 h et 12 h UTC) de 1952 à 2004 ;
- des météo.hebdo (12 h UTC) et des bulletins d'UKMO (00 h UTC) sur le site internet de la Wetterzentrale de 2005 à 2008 ;
- des bulletins d'UKMO (00 h UTC) sur le site internet de la Wetterzentrale et des isofronts de Météo-France (06 h UTC) de 2009 à 2010.

## IV.2 CONDITIONS MÉTÉO-MARINES PRÉPARANT LE NIVEAU DE PLAGE

Dans la littérature, il est souvent fait référence aux conditions morphologiques des plages. Elles ont un rôle important pour expliquer la survenue ou non des inondations par la mer [Paskoff, 1985]. En effet, un budget sédimentaire déficitaire est un facteur aggravant et fortement favorable aux franchissements. À l'inverse, les conditions morphologiques peuvent parfois empêcher la survenue ou limiter l'intensité des submersions marines (en cas de rehaussement du profil de plage) [Letortu et al., 2012]. D'anciens levés de profils de plages de galets [Costa, 1997 ; Costa et al., 2008] montrent l'existence d'importantes variations altimétriques lors de forts coups de vent, pouvant atteindre 3 m à leur sommet lors d'un seul cycle tidal [Costa, 2005 ; Caspar et al., 2009] (figure 6). C'est la raison pour laquelle, nous nous sommes intéressés à l'état des stocks de sédiments peu avant l'inondation. Faute de suivi topographique régulier, nous avons cherché un indicateur susceptible de retranscrire les conditions météo-marines capables de générer des abaissements de profils de plage avant la date de submersion.



Figure 6 : Évolution du profil de plage à Étretat en fonction des conditions météo-marines : avant la tempête et après la tempête

À partir d'une approche exploratoire, des conditions anémométriques d'afflux [230° ; 060°] semblent un indicateur pertinent. La vitesse minimale requise est de 8 m/s (vent tri-horaire). Le pas de temps d'analyse s'étend sur les 28 jours précédant la submersion pour prendre en compte l'inertie du système côtier au cours d'un cycle de marée complet.

Avec l'étude des 10 submersions, dont les conditions météo-marines seules ne peuvent expliquer leur gravité, deux situations sont observées (figure 7) :

- 1) des vents forts d'afflux et fréquents tout au long des 28 jours analysés (cumul minimum de 84 h de vents forts, y compris dans les dernières 48 h) (5 cas),
- 2) des vents forts d'afflux mais concentrés sur les dernières 48 h avant le franchissement (5 cas).

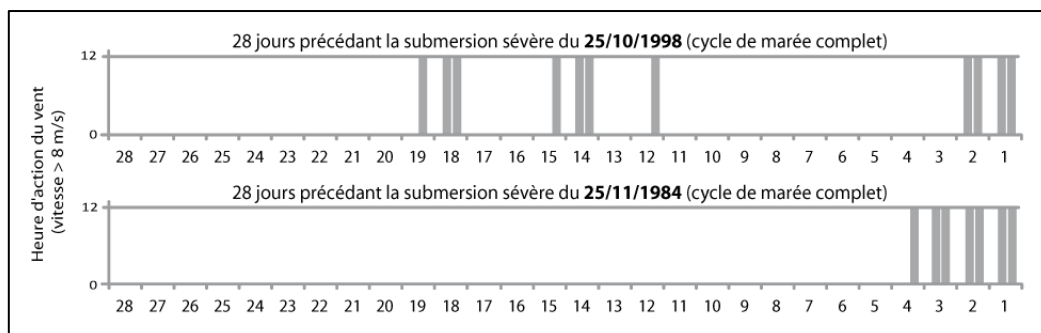


Figure 7 : Submersions sévères du 25/10/1998 et du 25/11/1984 et les deux types de temps de préparation

S'agissant du temps de préparation morphologique de la plage, les dernières 48 h d'action de vent fort peuvent donc être particulièrement efficaces et suffire pour établir un profil de plage favorable au franchissement.



Ces résultats, issus d'une démarche exploratoire, devront être confirmés par des levés topographiques réguliers (DGPS), notamment avant et après tempête. Cela permettra d'améliorer la connaissance des ajustements permanents entre la lithosphère, l'atmosphère et l'hydrosphère.

## V CONCLUSIONS

L'étude des submersions marines, extrêmes mais aussi non extrêmes, en Manche orientale a permis de déterminer, d'une part, les conditions anémométriques, barométriques et marégraphiques au-delà desquelles il y a franchissement et, d'autre part, que la fréquence de ces conditions n'a pas connu de tendance évolutive significative au cours des 62 dernières années. En revanche, quelques oscillations pluriannuelles, plus ou moins acycliques, s'individualisent nettement, faisant plus appel à la variabilité climatique, inhérente à nos latitudes, qu'à une quelconque variation. Il convient de souligner qu'il existe une grande variabilité des intensités des submersions en lien avec l'ajustement des nombreux facteurs qui y participent.

La définition des seuils anémométriques et marégraphiques au-delà desquels il y a submersion est intéressante mais elle doit être couplée à une analyse faisant appel à diverses échelles de temps (de la submersion, jusqu'aux 28 jours la précédant) et d'espace (de la position des centres d'action, au suivi de la position du front froid ou de la surcote par rapport à l'onde de marée). Sans cette démarche, il est difficile de comprendre les situations durant lesquelles aucun franchissement n'est observé, alors que les seuils sont atteints, ou les phasages réalisés. En effet, un troisième facteur, dépendant en partie des conditions météorologiques, détermine la fréquence et l'ampleur de la submersion : les conditions morphologiques des plages. L'évolution morphologique de ces plages peut être extrêmement rapide. Les dernières 48 heures suffisent à un abaissement du profil de plage, synonyme d'un rapprochement à la côte du point de déferlement des vagues de tempête.

Afin d'affiner la compréhension des phénomènes générateurs de submersions marines, il conviendra d'utiliser des documents d'échelles spatiale et temporelle plus fines.

## VI RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- Allen H., Delannoy B. (1990). - *Mesure de houle en différents sites du littoral français*. Rapport EDF-LNH HE-45/88.03.532.
- Caspar R., Costa S., Jacob E. (2007). - Fronts froids et submersions de tempête dans le nord-ouest de la France : le cas des inondations par la mer entre l'estuaire de la Seine et de la Somme. *La Météorologie*, **57**:37-47.
- Caspar R., Costa S., Lebreton P., Letortu P. (2009). - Les submersions de tempête de la nuit du 10 au 11 mars 2008 sur la côte d'Albâtre (Haute-Normandie, France) : détermination météo-marine. *Norois*, **2**:115-132.
- Costa S. (1997). - *Dynamique littorale et risques naturels : l'impact des aménagements, des variations du niveau marin et des modifications climatiques entre la Baie de Seine et la Baie de Somme*. Thèse de Doctorat, Université de Paris I.
- Costa S. (2005). - *Falaises à recul rapide et plages de galets : de la quantification des dynamiques d'un système complexe à la caractérisation des risques induits*. Habilitation à Diriger les Recherches, Université de Bretagne Occidentale.
- Costa S., Cantat O., Pirazzoli P.A., Lemaitre M., Delahaye D. (2004). - Vents forts et submersions de tempête en Manche orientale : analyse météo-marine sur la période historique récente. *Actes du Colloque de l'Association Internationale de Climatologie « Climat, mémoire du temps. Les relations climat-espace-société »*:277-280.
- Costa S., Levoy F., Monfort O., Curoy J., De Saint Léger E., Delahaye D. (2008). - Impact of sand content and cross-shore transport on the morphodynamics of macrotidal gravel beaches (Haute-Normandie, English Channel). *Zeitschrift für Geomorphologie*, **Suppl.-vol. 3**:41-62.
- Letortu P., 2013. - *Le recul des falaises crayeuses haut-normandes et les inondations par la mer en Manche centrale et orientale : de la quantification de l'aléa à la caractérisation des risques induits*. Thèse de doctorat, Université de Caen Basse-Normandie.

Letortu P., Costa S., Cantat C., 2012. Les submersions marines en Manche orientale : approche inductive et naturaliste pour la caractérisation des facteurs responsables des inondations par la mer. *Climatologie.*, **9**:31-57.

Paskoff R. (1985). – *Les littoraux : impact des aménagements sur leur évolution*. Paris, Masson.

Pirazzoli P.A., Costa S., Dornbush U., Tomasin A. (2006). - Recent evolution of surge-related events and assessment of coastal-flooding risk on the eastern coasts of the English Channel. *Ocean Dynamics*, **Special Issue 56**:498-512.

SIRACEDPC (2008). - *Plan ORSEC*. Préfecture de Seine-Maritime. Document interne.