

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 la baie de Somme

Résumé

Dans le nord-ouest de la France, en particulier le long des côtes de Haute-Normandie et de Picardie, les submersions de tempête résultent principalement d'un phénomène de « marée de tempête » (marée additionnée d'une surcote due à une perturbation atmosphérique) associée à de forts vents d'afflux, en période de déficit sédimentaire des plages de galets protégeant naturellement des côtes basses urbanisées. On observe qu'en règle générale, l'inondation se produit peu après le passage d'un front froid actif, qui draine dans son sillage de forts vents d'ouest à nord-ouest. La mer se creuse alors rapidement pour inonder les sites à risque. Cet article fait le point sur les causes générales de ces événements et met l'accent sur l'influence du passage frontal dans la genèse des inondations par la mer.

Rémi Caspar⁽¹⁾, Stéphane Costa⁽²⁾, Éric Jakob⁽³⁾

- (1) Météo-France - Centre départemental de la météorologie (CDM76)
Quai des Abeilles - 76600 Le Havre
remi.caspar@meteo.fr
(2) Laboratoire Géophen - Université de Caen Basse-Normandie - Caen
(3) Météo-France, Direction interrégionale Nord - Villeneuve d'Ascq

Les côtes haut-normandes et picardes, comprises entre l'estuaire de la Seine et la baie de Somme, revêtent un intérêt tout particulier pour l'analyse du risque lié aux inondations par la mer. Ce trait de côte présente en effet une vulnérabilité historique. La période 1967-1990 fut en particulier marquée par une multiplication d'événements parfois sévères (Caspar, 1990) dont on craint le retour, notamment dans la perspective d'une hausse du

niveau marin au cours des prochaines décennies. Les inondations par la mer dues aux tempêtes (« submersions de tempête ») résultent pour la plupart, sur ce littoral, de la conjonction d'une surcote à la marée et d'une forte agitation marine. Nous examinerons tout d'abord les conditions locales et les facteurs d'ordre météo-marin qui favorisent ces événements. Puis nous verrons l'apport d'un front froid dans la genèse d'une submersion.

Abstract

Cold fronts and storm floods in the north-west of France

In the north-west of France, particularly along the coasts of upper Normandy and Picardy, storm floods result mainly from a phenomenon of storm tide (astronomical tide plus storm surge) combined with very strong inshore wind, when pebble beaches which naturally protect low urban coastal areas have shrunk. It is generally observed that flooding occurs shortly after the passage of a vigorous cold front, which brings in its wake strong westerly or northwesterly winds. The sea rises rapidly to flood the threatened areas. This article discusses the general causes of these events and highlights the role of cold fronts in the origin of sea flooding.

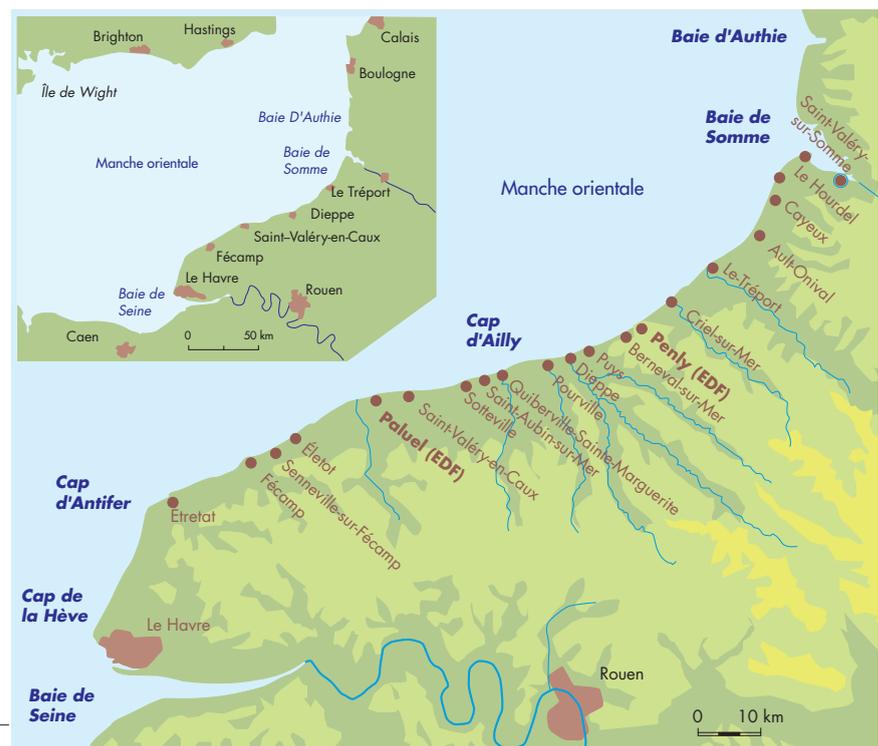


Figure 1 - Le secteur d'étude.

Le secteur d'étude et sa vulnérabilité aux inondations

Une côte globalement en recul

Le littoral étudié (figure 1) est délimité, au sud, par l'estuaire de la Seine, constitué de dépôts anciens et d'apports marins, et, au nord, par celui de la Somme, lui-même limité à l'ouest par les « Bas champs », polder bordé de dunes et de pouliers (flèches de galets tendant à fermer l'estuaire). Entre les deux, s'étire un ruban d'environ 130 kilomètres de long, constitué de falaises de craie d'une altitude moyenne de 70 à 100 mètres, plus ou moins riches en lits de silex. Celles-ci sont localement entaillées par de profondes vallées perpendiculaires au rivage, dont le débouché, d'un niveau généralement inférieur à celui des pleines mers d'équinoxe, est normalement protégé de l'assaut des vagues par un cordon de galets. Ces derniers proviennent de l'érosion des falaises sous l'effet d'agents météorologiques et marins, tels que la pluie, le gel, les vagues. Un pan de falaise qui s'effondre libère des « rognons » de silex qui sont ensuite repris et roulés par les vagues. Émousés, de forme arrondie ou ovale, les rognons, devenus galets, poursuivent un lent déplacement en zigzag, globalement dirigé vers la baie de Somme, en raison des houles dominantes : c'est le **transit littoral**. Il existe également une accumulation de galets héritée de la dernière période post-glaciaire. Or, on assiste depuis plusieurs décennies à une diminution des stocks de galets,

avec pour conséquence une accentuation du risque de submersion des côtes basses (Paskoff, 1985, 1996, 1998 ; Carter, 1988).

L'action de l'homme comme facteur aggravant

Le transit littoral, qui avait pour conséquence une répartition harmonieuse des volumes de galets le long de la côte, a été sensiblement entravé, vers le début du **xx^e** siècle, par la construction de jetées portuaires (Fécamp, Saint-Valéry-en-Caux, Dieppe, Le Tréport) et plus récemment par l'implantation de centrales nucléaires en bord de mer (Paluel et Penly). Lorsque le transit est totalement interrompu, les galets s'accumulent contre les jetées ouest et constituent un « stock mort ». Celui-ci représente 1,4 million de mètres cubes du cap d'Antifer au Tréport, soit près de la moitié des stocks présents dans cette zone. Le déséquilibre sédimentaire s'est également accentué au cours du **xx^e** siècle (jusqu'aux années 1970) en raison de prélèvements massifs destinés à l'industrie de la silice. D'après les chiffres officiels (LCHF, 1972), plus de deux millions de mètres cubes de galets ont été extraits des plages, soit 40 % du volume initial. Le prélèvement n'est désormais autorisé que dans la Somme, près de Cayeux. Dans les zones potentiellement inondables, l'essor démographique a accompagné la croissance des ports et le développement touristique, si bien que le recul du trait de côte et les inondations par la mer, autrefois acceptés, ne le sont plus aujourd'hui. Les populations ont poussé leurs élus à mettre en œuvre une politique de défense contre la mer, conduisant à fixer le rivage par un ouvrage

longitudinal (**perré**) souvent accompagné d'une batterie d'épis. Mais, de part et d'autre du perré, la falaise continue à reculer, de sorte que l'ouvrage se retrouve en saillie par rapport au trait de côte. Ce mur de défense est alors plus fréquemment attaqué par la mer, ce qui empêche le maintien du stock de galets devant l'aménagement. Dans certains cas, il devient même nécessaire de protéger le perré lui-même par des enrochements.

Depuis près de deux siècles, les interventions humaines ont considérablement modifié le volume, la répartition et le cheminement naturel des galets. Ces derniers n'assurent plus leur rôle de tampons naturels face aux assauts des vagues, de sorte que l'on assiste par endroits à une progression rapide de la mer vers le haut des plages, comme par exemple dans le secteur ouest de Fécamp, à Saint-Valéry-en-Caux, ou encore à Criel-sur-Mer...

Les facteurs d'ordre météo-marin à l'origine des submersions

La **marée de tempête** est la valeur résultant de l'addition d'une **surcote** d'origine atmosphérique à la marée astronomique normale. C'est un paramètre que l'on peut lire sur une « échelle de marée » ou qui est mesuré par un marégraphe, appareil dont on extrait des données archivées que l'on peut confronter à une base météorologique. La hauteur de marée s'exprime en « cote marine » par rapport au zéro hydrographique qui correspond au niveau des plus basses mers. La plupart des submersions de notre secteur d'étude résultent de la superposition de l'agitation marine à la surcote. Après quelques rappels concernant la marée en Manche, nous verrons comment le niveau prédit peut être augmenté d'une surcote en raison d'une perturbation atmosphérique et quelle est la part de l'agitation de la mer dans une submersion. Nous terminerons ce chapitre par l'évocation de quelques situations atypiques qu'il faut cependant garder en mémoire.



Le « quai de la Quarantaine » dépassé à Honfleur le 17 décembre 2004 en raison d'une forte surcote s'additionnant à une marée de coefficient pourtant relativement faible (71). (Archive du quotidien *Ouest France*).

La marée en Manche

En Manche, la marée évolue d'ouest en est comme une onde progressive (elle se propage de l'Iroise au Pas-de-Calais en six heures environ) avec deux variations de niveau quotidiennes (Shom, 1968, 1996). Deux fois par jour, en effet, le niveau de la mer subit des évolutions à peu près identiques : la montée des eaux (flot) se stabilise à un niveau déterminé au cours de ce que l'on appelle l'étale, qui dure généralement moins de 20 minutes ; puis les eaux refluent : c'est le jusant. La durée d'un cycle (flot + jusant) est d'environ 12 h 20. Deux cycles successifs durent au total 24 h 45 : c'est la durée d'un jour lunaire, soit le temps nécessaire pour que la Lune retrouve dans le ciel une position identique à celle de la veille. Ainsi, de jour en jour, l'heure de la pleine mer se décale d'environ trois quarts d'heure. À cette composante dite « semi-diurne régulière » s'ajoute l'influence du Soleil qui combine ses effets à ceux de l'attraction lunaire : suivant les positions respectives des deux astres par rapport à la Terre, leurs actions se conjuguent (**vives-eaux**) ou se contrarient (**mortes-eaux**). On note également que le niveau atteint par le flot lors des marées de vive-eau varie lui-même au cours de l'année, atteignant un maximum au moment des équinoxes, lorsque la Terre est au plus proche du Soleil. L'importance de la marée est repérée par un coefficient sur une échelle théorique comprise entre 20 à 120. Par exemple, à une marée de vive-eau moyenne correspond un coefficient de 95.

La topographie des côtes et la configuration du bassin de la Manche expliquent quelques anomalies par rapport à la théorie cosmique : le resserrement du bassin vers le Pas-de-Calais provoque une amplification de l'onde de marée, de sorte que le marnage⁽¹⁾ passe de sept mètres au Havre à neuf mètres en baie de Somme. De plus, les petits fonds que rencontre l'onde de marée lors de sa progression, notamment en Manche orientale, font apparaître des ondes secondaires, dites hydrauliques, qui tendent à déformer sa courbe : le flot s'en trouve généralement raccourci et le jusant allongé. Rappelons aussi que l'estuaire de Seine connaît un phénomène particulier de « double pleine mer »⁽²⁾ qui fait que l'étale au Havre dure un peu plus de deux heures.

L'impact d'une perturbation atmosphérique : marée de tempête et agitation de la mer

Surcote et marée de tempête

Bien souvent, le niveau de marée théorique ne correspond pas à celui mesuré, du fait des conditions atmosphériques. C'est ainsi que des vents de secteur est, associés à un anticyclone situé au nord de la France, entraînent les eaux de la Manche vers le large, ce qui se traduit, sur nos côtes, par un niveau de marée plus bas que prévu : on parle de **décote**. À l'inverse, la **surcote** est une surélévation du niveau de l'eau résultant de

l'action conjuguée d'un vent du large et d'une basse pression atmosphérique. En effet, une chute barométrique se répercute sur un plan d'eau à raison d'une hausse d'un centimètre pour une baisse d'un hectopascal. C'est la règle dite du « baromètre inversé ». Concrètement, une dépression atmosphérique, en voie de creusement sur la mer et se déplaçant rapidement, s'accompagne d'un noyau de baisse barométrique et d'une zone de vents forts à l'origine d'une **onde de tempête** (Hontarrède et Galli, 2001) dont la célérité est fonction de la racine carrée de la profondeur de l'eau. À l'approche des côtes, la vitesse de l'onde diminue en raison du relèvement du fond, ce qui réduit sa longueur et augmente son amplitude (l'énergie se conservant). D'abord modérée au large, la surcote apparaît donc plus importante à la côte, notamment dans les estuaires par effet de concentration. La somme du niveau théorique de la marée et d'une surcote d'origine atmosphérique est appelée **marée de tempête**.

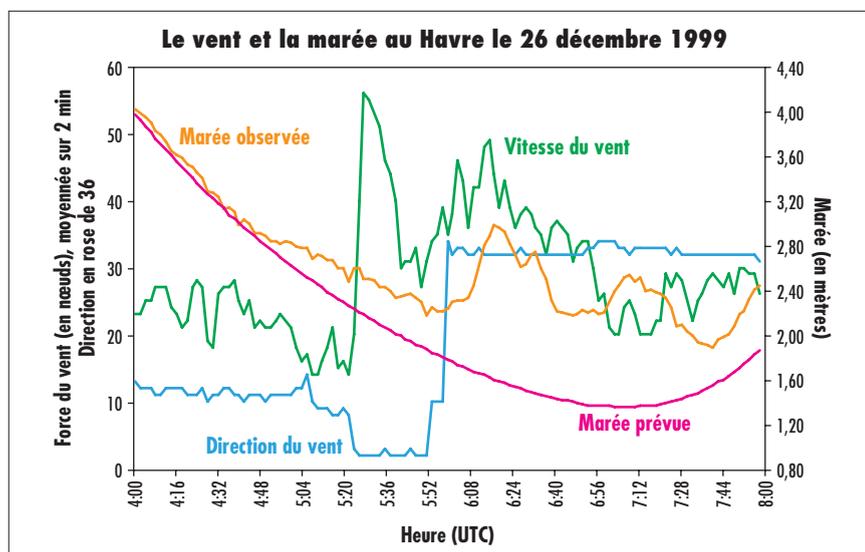
Les vents d'afflux

Sur les côtes comprises entre la Seine et la Somme, on observe que des vents d'ouest à nord-ouest prédominent lors d'une inondation. Ces vents marins sont dits **d'afflux** car ils favorisent l'amoncellement de l'eau sur les côtes, de deux façons :

- par effet de surcote, car, en mer peu profonde (moins de 100 mètres, cas de la Manche orientale), le frottement du vent entraîne de l'eau dans le même sens et il apparaît que, plus le vent est fort et la profondeur faible, plus haute est la surcote résultante ;
- par agitation marine, car ces vents, d'orientation globalement perpendiculaire aux rivages et dans l'axe des passes d'entrée portuaires (plutôt d'ouest au Havre et de nord-ouest ailleurs) bénéficient d'un fetch⁽³⁾ relativement long.

L'action des vagues contre les ouvrages de défense est d'autant plus efficace qu'existe une surcote préalable portant la mer à un niveau plus élevé que prévu. Des paquets de mer sont alors projetés, à intervalles plus ou moins réguliers (de l'ordre de 5 à 10 secondes), ce qui aggrave les effets du phénomène. L'impact

Figure 2 - Les conditions marégraphiques et aérologiques de la tempête du 26 décembre 1999. Peu après la mise en place d'un vent violent de type « afflux » vers 6 h 00 UTC le 26 décembre 1999, des oscillations de grande amplitude apparaissent dans l'avant-port du Havre, la première faisant remonter la mer (alors en phase de jusant) de 75 cm en 18 min. Sur l'échelle de gauche, on lit à la fois les valeurs de la force du vent en m/s et celles de la direction en rose de 36. (Sources : Météo-France, Shom et PAH)



(1) Amplitude entre pleine mer et basse mer.

(2) Dédoublément du maximum dû à des particularités locales dans la propagation de certains harmoniques de l'onde de marée.

(3) Distance au-dessus de l'eau sur laquelle le vent souffle avec la même vitesse et dans la même direction.

Le « wave set-up »

L'agitation marine contribue également à une surélévation locale du niveau de la mer vers le haut d'une plage, par un phénomène dit de « wave set-up ». On observe en effet qu'après le déferlement d'une vague sur une plage, l'eau projetée en avant atteint un niveau plus élevé que celui qui le précède. La différence, qui dépend de l'amplitude de la vague, est de l'ordre de plusieurs décimètres. Ce facteur, non négligeable pour une plage, échappe aux marégraphes, généralement installés dans des ports. Il fait actuellement l'objet d'études (communication orale de P. Lebreton du Centre d'études maritimes et fluviales, Cetmef).

d'un vent d'afflux sur le plan d'eau d'un avant-port est illustré par la figure 2, relative aux effets de la tempête du 26 décembre 1999 au Havre. La profonde dépression en cause (962 hPa à Caen à 5 h 00 UTC) évoluait très rapidement d'ouest en est, le long d'une trajectoire terrestre, un peu au sud de la latitude du Havre. Cela explique la rotation progressive du vent mesuré dans le port, passant de l'est au nord-est lors de l'approche de la dépression, puis du nord au nord-ouest après son passage sur le méridien du Havre. La comparaison de la marée prédite à celle enregistrée par le marégraphe de l'avant-port montre une surcote progressive – jusqu'à 40 cm, essentiellement due à la baisse de pression – durant la phase d'approche, puis, après l'établissement du vent au nord-ouest (qui est une composante proche du vent d'afflux optimal pour ce site), une oscillation remarquable du bassin, puisque la mer – pourtant en phase de jusant – remonta de 75 cm en 18 minutes, la surcote à la marée prédite atteignant alors 1,38 mètre.

En Manche, dans la plupart des cas, les vents forts d'ouest à nord-ouest se lèvent dans le sillage d'un front froid météorologique. Nous verrons plus loin que le suivi d'une telle perturbation est essentiel dans l'estimation du risque de submersion. Mais, auparavant, il nous faut mentionner trois cas de figure, certes rares, mais qui peuvent conduire à des submersions sévères sans l'apport d'un vent d'afflux.

Le cas d'une marée de tempête sans vent d'afflux à la côte

Une marée de tempête sans agitation marine notable est un phénomène rare dans notre secteur, mais plausible. Il a été notamment détecté par les marégraphes des ports du Havre, d'Antifer, et de Dieppe, dans la nuit du 15 au 16 octobre 1987, à l'échelle d'une pleine mer, heureusement de morte-eau. Est en cause une tempête mémorable qui affecta le nord-ouest de la France et le sud de l'Angleterre. La dépression, née un peu au large du golfe de Gascogne, fut enregistrée à 953 hPa sur Ouessant avant de gagner Plymouth, puis la mer du Nord en longeant le sud de l'Angleterre. La trajectoire du minimum fit qu'à aucun moment ne se leva un vent d'afflux entre la Seine et la Somme. En revanche, une onde de tempête, en phase avec la marée, traversa la Manche, de sorte que fut notée une surcote quasi identique dans les trois ports précités, de l'ordre de 1,60 m. Une étude menée par la mairie du Havre montra que, si cette valeur s'était produite sur une pleine mer d'équinoxe, plusieurs quartiers de la ville auraient été inondés. Un plan d'intervention local fut d'ailleurs élaboré à partir de cette hypothèse, alors jugée extrême.

Notons qu'une simulation récente de Météo-France (Daniel, 2001) rend plausible une surcote de deux mètres dans l'estuaire de la Seine. Celle-ci, ajoutée à une pleine mer de coefficient maximal 120 correspondant à 8,40 m au Havre (cote marine), porterait la marée de tempête à 10,40 m dans ce port, soit 90 cm au-dessus des plus hautes défenses. Il est cependant difficile d'estimer la durée de retour d'un

tel événement. Une hauteur de 9,20 m aurait au Havre une période de retour centennale (Simon, 1994). De brèves surélévations supérieures à 2 mètres ont bien été notées dans ce secteur (Pirazzoli, 2005 *in* Costa et Delahaye, 2005 ; Pirazzoli et al., 2006), mais en marée de morte-eau ou à basse mer.

La présence d'une houle d'origine atlantique

Dans la nuit du 28 au 29 octobre 1996, Pourville (située un peu à l'ouest de Dieppe) fut inondée, pendant que la jetée ouest du port de Dieppe subissait des dommages importants, malgré un vent local de dominante sud-ouest, c'est-à-dire « de terre » pour ce trait de côte. Le marégraphe de Dieppe n'enregistra qu'une surcote de 0,55 m au moment de la pleine mer. Le sémaphore de Dieppe signala cependant une mer forte (soit 2,5 à 4 mètres sur l'échelle d'état de la mer de Douglas) et des témoins, à Pourville, mentionnèrent des groupes de fortes vagues, intermittents, d'environ 3 à 4 mètres. Du fait de l'absence d'un vent d'afflux au moment de la submersion, de même que dans la journée précédant l'événement, une enquête menée par Météo-France, à la demande de la préfecture, permit de conclure à la présence d'une houle d'origine atlantique d'environ 2 mètres, interférant avec une mer du vent locale du même ordre.

La houle *stricto sensu* est un train de vagues se propageant loin de son aire de génération. S'il est rare d'observer une houle d'origine atlantique dans le sud de la Manche orientale en raison de la diffraction imposée par le Cotentin, sa présence a pu être détectée par des houlographes dans les parages de Dieppe qui se situe plus haut en latitude. La houle du 28 octobre 1996 était entretenue en Manche par la stagnation d'une profonde dépression à l'ouest de l'Irlande, issue d'un ancien cyclone. Le croisement entre la houle et la mer du vent local forma des groupes de fortes vagues alternant avec des passages atténués.

Les tempêtes de nord à nord-est

Les vents de nord à nord-est ne créent pas de surcote notable sur les rivages de notre secteur, mais, lorsqu'ils atteignent le degré 9 de l'échelle de Beaufort (à partir de 75 km/h établi) et qu'ils soufflent durablement, ils génèrent une mer dite « entièrement formée » capable de produire des submersions en période de grandes marées (coefficient supérieur à

Marée de tempête

Niveau de marée résultant de l'addition d'une surcote d'origine atmosphérique à la marée théorique.

Agitation marine

Fortes vagues dues à un vent d'afflux (vent marin de direction perpendiculaire au rivage, dans le sillage d'un front froid météorologique).

Abaissement du profil des plages

Diminution de l'épaisseur des cordons de galets par blocage du transit littoral en amont (jetées portuaires) ou par accélération temporaire du transit (flux d'ouest rapide établi depuis plusieurs jours).

Tableau 1 - Principaux facteurs (souvent concomitants) en cause dans une submersion de tempête entre l'estuaire de la Seine et la baie de Somme.

Tableau 2 - Principaux cas de submersions de tempête entre l'estuaire de la Seine et la baie de Somme.

100). Au cours des trente dernières années, deux événements majeurs de ce type ont affecté le littoral de la côte d'Albâtre : le 12 janvier 1978 et le 19 février 1996 (Caspar et Poullain, 1996).

Les situations météorologiques favorables aux submersions

L'étude de cas au service de la prévision

Un inventaire des tempêtes à l'origine de débordements survenus entre 1981 et 1984 dans l'arrondissement du Havre (du Havre à Veulettes-sur-Mer) avait été initié en 1985 par la sous-préfecture, en liaison avec la Météorologie nationale (station du Havre) et la Direction départementale de l'équipement (DDE, service maritime). L'objectif était : mieux connaître pour mieux prévoir, et élaborer un système d'alerte aux populations. La station du Havre fut alors chargée d'alerter les services de l'État dès que les caractéristiques d'un coup de vent prévu (direction et force du vent) s'apparentaient à des conditions archivées ayant abouti à une inondation. La surcote annoncée n'était pas calculée car on ne disposait pas alors d'un modèle numérique de prévision pour ce paramètre, mais estimée sur la base de la marée de tempête impliquée dans la situation d'archive.

Cette méthode de prévision, certes approximative, permit toutefois l'annonce d'événements sévères tels que celui du 22 janvier 1988 (Caspar, 1988), de sorte que la préfecture de la Seine-Maritime décida l'extension du système d'alerte à l'arrondissement de Dieppe (de Saint-Valéry-en-Caux au Tréport) sous la forme d'un « Règlement départemental d'annonce des inondations par la mer ». Pratiquement, le littoral de ce département fut divisé en trois secteurs principaux : Dieppe, Fécamp et Le Havre. Les secteurs de Dieppe et de Fécamp regroupent chacun plusieurs communes à risque présentant des aspects communs, comme l'orientation de la côte ou la propagation

Types de submersion	Causes	Conséquences et principaux sites concernés
Dépassement du niveau supérieur des quais dans un avant-port.	Marée de tempête (marée prédite + surcote due à une perturbation atmosphérique) + agitation marine dans l'avant-port.	Inondation de secteurs habités contigus aux bassins portuaires. Le Havre, Fécamp, Saint-Valéry-en-Caux, Dieppe, Le Tréport, Saint-Valéry-sur-Somme.
	Marée de tempête sans agitation marine notable (pas de vent d'afflux). Rare.	
Dépassement du niveau supérieur d'un perré (ouvrage de défense longitudinal entre un site et sa plage).	Marées de tempête + fortes vagues.	Projection de « paquets de mer » par-dessus les structures de défense. Concerne l'ensemble des sites à risque (figure 2).
	Marée de tempête + fortes vagues + abaissement du profil des plages (diminution de l'épaisseur des cordons de galets adossés aux perrés).	

de la marée. Le secteur du Havre est un cas particulier qui concentre plusieurs quartiers de cette ville, inondables de par la proximité des bassins portuaires. La marée de tempête pouvant être connue dans les « ports de référence » des trois grands secteurs – grâce à des marégraphes (Le Havre et Dieppe) et à une échelle de marée (Fécamp) – la DDE, en collaboration avec Météo-France, définit des seuils d'alerte propres à chacun des secteurs. Par exemple, pour le secteur dit de Dieppe, un message est émis par Météo-France en direction de la préfecture si l'on prévoit un coup de vent de force 8 Beaufort au moins (soit plus de 34 nœuds établi, ou 63 km/h), d'une direction appartenant à

un arc d'ouest à nord-nord-est, et sous réserve que la marée de tempête prévue dans le port atteigne au moins 9,00 m (cote marine de Dieppe).

À noter qu'à l'instar de son voisin haut-normand, la préfecture de la Somme a mis en œuvre, en 2006, un « Règlement départemental d'annonce des inondations par la mer » impliquant le SIRPM Nord (voir l'encadré ci-dessous pour la nature des bulletins émis). Aujourd'hui, les prévisionnistes ne se contentent plus de la « méthode comparative » évoquée plus haut. Ils s'inspirent notamment des modèles numériques de surcote et de vagues développés par Météo-France, comme nous le verrons plus loin.

Les ATFV : Avis de très fortes vagues à la côte

Les Services interrégionaux de prévision marine (SIRPM) de Météo-France rédigent des bulletins côtiers réguliers et des BMS (Bulletins météorologiques spéciaux) pour une bande côtière allant jusqu'à 20 milles au large. Ils sont, en métropole, au nombre de quatre : Villeneuve-d'Ascq, Brest, Bordeaux et Aix-en-Provence. Ils ont également vocation à délivrer des Avis de très fortes vagues à la côte (ATFV) dont les seuils diffèrent d'une région à l'autre. Ces bulletins sont transmis aux COZ (Centres opérationnels de zone) et disponibles au réseau météo. La responsabilité du SIRPM Nord (actuellement organisé autour de trois centres : Villeneuve-d'Ascq, Boulogne-sur-Mer et Le Havre) s'exerce sur le littoral compris entre la frontière belge et le cap de la Hague (pointe occidentale du Nord-Cotentin). Sur cette côte d'orientations diverses, les seuils d'émission d'ATFV varient notablement d'un endroit à un autre. Par exemple, on considère actuellement que des vagues d'une hauteur caractéristique d'au moins six mètres, sur une pleine mer de coefficient 95 ou plus, et dues à un vent de secteur ouest-nord-ouest à nord-est, sont susceptibles de provoquer des inondations pour la côte comprise entre le cap de la Hague et la pointe de Barfleur. Alors que, pour les rivages de Ouistreham à Honfleur, on peut s'attendre à des submersions par vent d'ouest-nord-ouest lorsque sont prévues des vagues de plus de quatre mètres associées à un coefficient de marée supérieur à 100. D'autre part, deux départements bénéficient d'un Règlement départemental d'annonce des inondations par la mer : la Seine-Maritime et la Somme, pour lesquels des études plus fines (incluant la notion de surcote) ont été réalisées à la demande des préfectures. Pour ces deux départements, les ATFV sont des Avis de très fortes vagues à la côte et de marée de tempête.



Les deux grands types de circulation atmosphérique en cause

En parallèle avec les actions menées par les services de l'État, un inventaire des inondations de 1949 à 1995 fut réalisé à l'université Paris-1 (Costa, 1997), puis au laboratoire Geophen de l'université de Caen (Costa et al., 2004), où fut étendu le champ de recherche jusqu'à l'année 2003. La méthode d'investigation consistait à repérer les dates pour lesquelles le vent avait dépassé 25 nœuds (46 km/h) dans les sémaphores, puis à rechercher dans la presse régionale d'éventuels comptes-rendus de submersion. Un recoupement des informations fut effec-

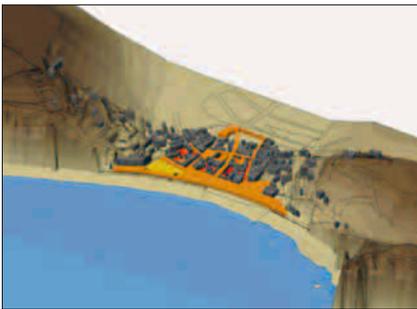


Figure 4 - Extension de la submersion de tempête du 27-28 février 1990 à Étretat. La hauteur d'eau selon les quartiers inondés est représentée en jaune (40 cm), orange (60 cm) et rouge (80 cm). (D'après DDE 76, 1995 ; Costa, 1997 ; Costa et Delahaye, 2005)

tué à partir des témoignages de personnes affectées par les inondations (dont les remboursements d'assurance font foi) ou d'archives municipales lorsque des frais de nettoyage des espaces inondés avaient été notifiés. L'enquête permit notamment

Figure 3 - Les sites sensibles aux submersions de tempête en Haute-Normandie. En rouge, des sites particulièrement vulnérables. En bleu, des sites moins affectés.

de répartir les sites à risque en deux catégories : ceux particulièrement sensibles aux submersions de tempête et ceux plus faiblement affectés (figure 3). Outre la récurrence de l'aléa, le regard sur le passé permet de déterminer l'extension des inondations selon les sites (figure 4).

De plus, en confrontant chacune des submersions répertoriées à la situation météorologique du jour et des jours

précédents (cartes synoptiques de pression en surface), les auteurs purent définir deux types principaux de circulation atmosphérique menant au débordement : le premier correspond à la progression rapide en Manche d'une jeune dépression, s'accompagnant de vents forts d'ouest à nord-ouest à l'arrière immédiat du minimum barométrique (environ un tiers des cas observés, figure 5). Le second correspond à la pénétration en mer du Nord d'une dépression atlantique de plus haute latitude, se dirigeant vers les Pays-Bas, puis la basse Scandinavie, et générant un rapide flux de nord-ouest en Manche (environ deux tiers des cas, figure 6).

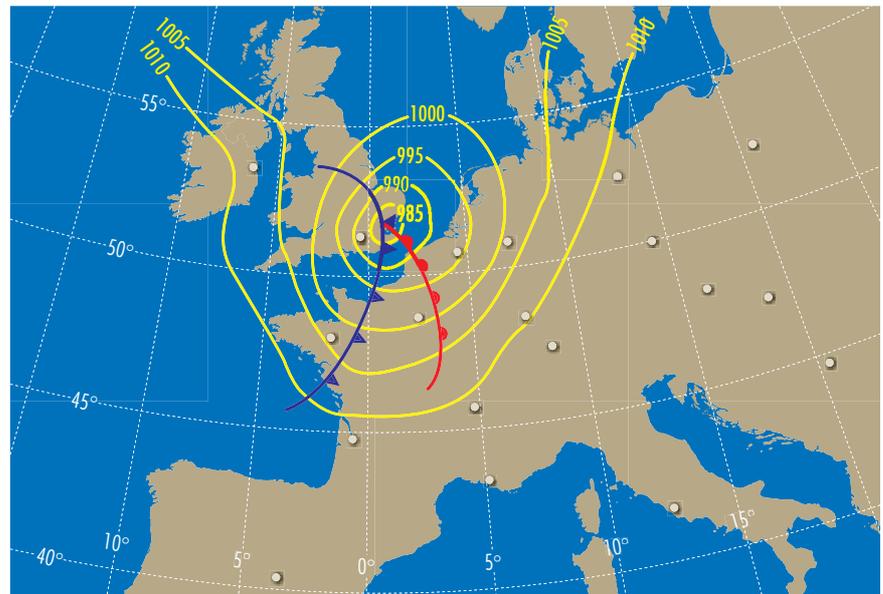


Figure 5 - Représentation schématisée du champ de pression de surface en Manche lors de l'inondation par la mer du 22 janvier 1988. Près d'une inondation sur trois est associée à une cyclogenèse en Manche.

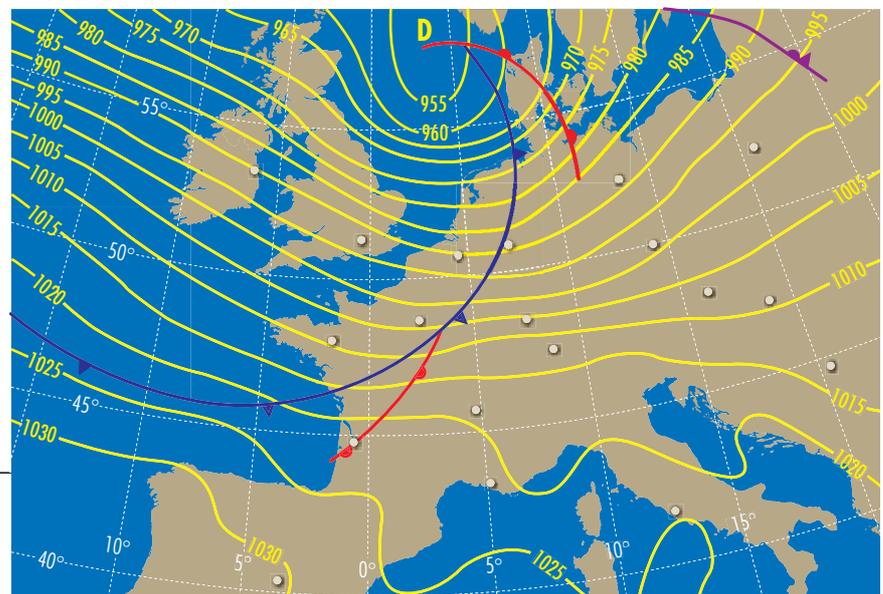


Figure 6 - Représentation schématisée du champ de pression de surface sur l'Europe du Nord-Ouest lors de l'inondation par la mer du 26 février 1990. Environ deux tiers des submersions résultent d'un fort flux de nord-ouest.

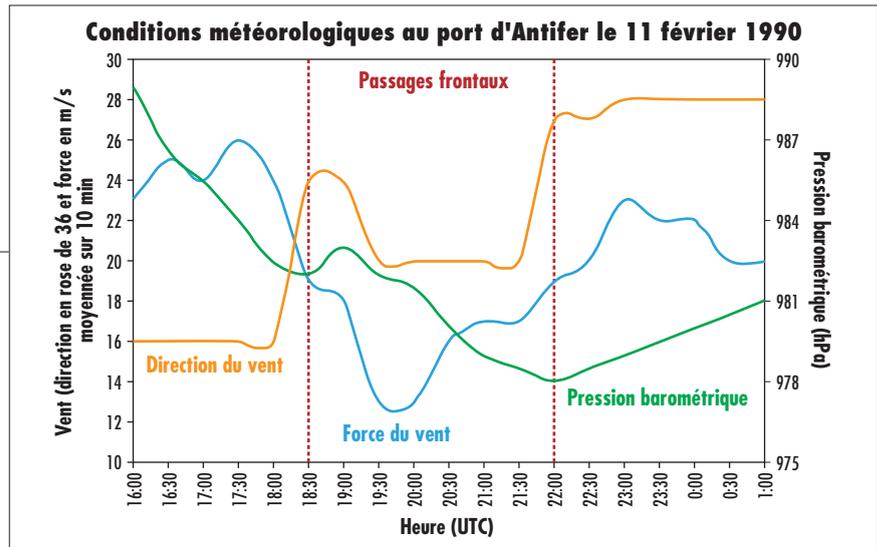
Figure 7 - Conditions météorologiques au port d'Antifer lors des inondations marines du 11 février 1990 marquées par deux passages frontaux (anafronts). Le second, proche de la pleine mer, entraîna un net renforcement du vent, devenant d'afflux. Sur l'échelle de gauche, on lit à la fois les valeurs de la force du vent en m/s et celles de la direction en rose de 36. (Source : Météo-France)

Le rôle déterminant des fronts froids

Les chercheurs du Geophen, de même que les prévisionnistes de Météo-France, avaient noté l'implication quasi systématique d'un front froid météorologique dans une submersion de tempête. Les deux principaux types de fronts froids sont concernés, à savoir l'**anafront**, le plus souvent observé, et le front froid dit **dédoublé**, moins fréquent mais parfois dangereux (encadré ci-contre). L'arrivée d'un front froid actif s'accompagne d'un vent d'afflux, fort et turbulent, qui crée rapidement de la surcote, malgré une hausse rapide de la pression atmosphérique.

Les anafronts du 11 février 1990

Pour illustrer notre propos, nous avons choisi deux exemples qui ont marqué les mémoires. Le premier événement remonte au mois de février 1990, qui demeure parmi les plus ventés qu'ait connu le nord-ouest de la France au cours du XX^e siècle. Il se distingue par une série d'inondations désastreuses les 11, 26, 27 et 28 qui affectèrent l'ensemble des sites à risque dont 3 000 hectares inondés dans les Bas-Champs picards. Nous reproduisons ici les conditions météorologiques à l'origine de la première submersion, le 11 au soir, qui



Les types de fronts froids

Il existe deux types principaux de fronts froids. L'anafront, le plus courant, correspond au front froid type dit « front d'école ». Caractérisé par un courant chaud ascendant incliné vers l'arrière par rapport au front, il génère une bande étroite de pluies intenses fréquemment convectives. Précédé d'un jet de basses couches, son passage s'exprime notamment par une brusque rotation du vent, avec des rafales. Le second type, moins fréquent mais parfois issu de la transformation du premier, est le front froid dédoublé (en anglais *kata split front*) : entraîné par des vents violents de moyenne ou de haute troposphère, de l'air froid et sec s'avance au-dessus d'un air chaud et humide de basse couche, ce qui déstabilise ce dernier, provoquant des pluies convectives bien en avant de la véritable trace au sol du front. Celle-ci est pauvre en précipitations et ne s'accompagne généralement pas de fortes rafales ; il arrive toutefois que l'irruption au sol de l'air froid de moyenne troposphère fasse virer et se renforcer notablement le flux de surface.

affecta notamment la ville d'Étretat. La figure 7 résume l'historique de l'événement au port du Havre-Antifer, situé à proximité de la célèbre cité normande.

Après une chute barométrique de 23 hPa en moins de neuf heures, un front froid gagnait le site vers 18 h 30 UTC. On observa alors une brusque rotation du vent, qui passa du sud-sud-ouest à l'ouest-sud-ouest, ainsi qu'une forte précipitation suivie d'une hausse barométrique de un hectopascal. Le marégraphe du Havre enregistra une surcote d'environ un mètre. Puis la pression amorça rapidement une nouvelle baisse, comparable à la première, jusqu'à 22 h 00. Pendant ce temps,

le vent revenait au sud-sud-ouest en prenant de la vigueur, signe de l'approche d'une nouvelle perturbation. Celle-ci s'accompagna d'une brève mais intense précipitation et d'un renforcement brutal du vent, virant ouest, force 9 Beaufort (au moins 75 km/h établi), évoquant de nouveau une empreinte de type anafront froid. Durant les deux premières heures de la hausse barométrique consécutive, les rafales atteignirent jusqu'à 68 noeuds (126 km/h). Or cet intervalle coïncidait avec le « plein » d'une marée de coefficient 95, attendue pour 23 h 30. La mer se creusa de près de trois mètres supplémentaires, dans une direction un peu plus nord-ouest, avec pour effet l'apparition de paquets de vagues croisées de grande amplitude. Cette agitation, associée à un second pic de surcote d'environ 80 cm et à un état de déficience des stocks de galets (photos ci-contre et page suivante), entraîna des submersions dramatiques dans la plupart des sites à



La tempête qui s'est produite le 3 février 1990 en morte-eau (coefficient de marée 57) n'a pas provoqué de submersion à Étretat, mais elle a contribué au déséquilibre du profil de la plage avec pour conséquence une plus grande vulnérabilité du site aux tempêtes ultérieures. (Photo R. Caspar)



risque de la Côte d'Albâtre, qui ne se seraient pas produites en l'absence du deuxième front.

Le front froid dédoublé du 17 décembre 2004

Le deuxième exemple est daté du vendredi 17 décembre 2004. En début d'après-midi, s'abattait sur la France une tempête d'une rare violence, provoquant la mort de six personnes et des dégâts considérables, notamment dans le département de la Somme où fut relevée, à Abbeville, une rafale de 76 nœuds (140 km/h) vers 15 heures. Au plus fort du coup de vent, qui coïncidait avec la pleine mer, fut enregistrée une forte surcote : 1,37 m au Havre ; 1,34 m à Dieppe. Par chance, le coefficient de marée était faible : 71. Il y eut cependant des dépassements de quai et le franchissement de quelques perrés, notamment à Onival, près de Ault, où une partie de la digue fut détruite. En vive-eau (coefficient supérieur à 95), cet événement aurait entraîné des submersions majeures. Il nous a donc paru intéressant d'en étudier les mécanismes à l'aide des outils actuels de l'analyse et de la prévision, qui permettent

que la surface frontale progresse plus vite en altitude que dans les basses couches : de l'air froid d'altitude vient surplomber de l'air chaud et humide, conduisant à une atmosphère instable à l'origine de nuages convectifs et d'averses éparses. La véritable trace au sol se trouve en arrière, là où l'air froid pénètre dans les basses couches, souvent mollement, mais parfois de manière spectaculaire lorsqu'il provient d'un haut niveau de l'atmosphère. Dans un premier temps, nous nous intéresserons aux principaux champs de modèle météorologique révélant l'existence et la localisation de ce type de front lors de la tempête de 2004, puis nous verrons son impact sur le plan d'eau de Dieppe.

L'analyse en surface

L'analyse « surface » du modèle de prévision numérique Arpège du 17 décembre 2004 à 12 h 00 UTC (figure 8, isobares tracées de 2,5 en 2,5 hPa) fait apparaître un centre dépressionnaire (981 hPa) au sud immédiat de Newhaven. Il se trouvait, à 6 h 00 UTC, dans la partie sud de la mer d'Irlande. La trace au sol du front froid de la perturbation associée n'est pas évi-

Cette photographie a été prise neuf jours plus tard, le 12 février 1990, par coefficient de marée plus élevé : 90. L'image est spectaculaire, pourtant la submersion est relativement modeste. En fait, c'est durant la nuit précédente que la ville fut sévèrement inondée, au passage d'un front froid. (Photo R. Caspar)

notamment de détecter un front froid dédoublé.

Ce type de front diffère du front classique en ce

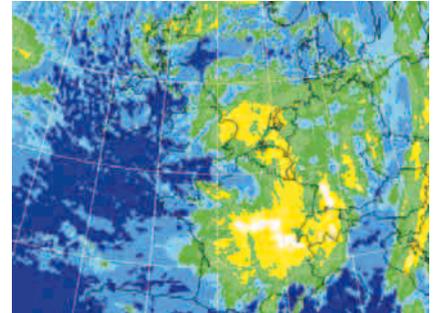


Figure 9 - Image infrarouge du 17 décembre 2004 à 12 h UTC. La zone d'ascendance la plus forte (en jaune et en blanc) correspond à la trace d'altitude d'un front froid dédoublé. (Source : Météo-France)

présence de précipitations, amorce de stationnarité des tendances de pression, rotation du vent, apparition de nuages convectifs... Mais, en arrière, notamment sur les côtes haut-normandes, persiste une forte baisse barométrique et une humidité importante (l'écart entre la température de l'air et le point de rosée restant faible). De fait, l'air froid et sec n'apparaît nettement que vers le Cotentin.

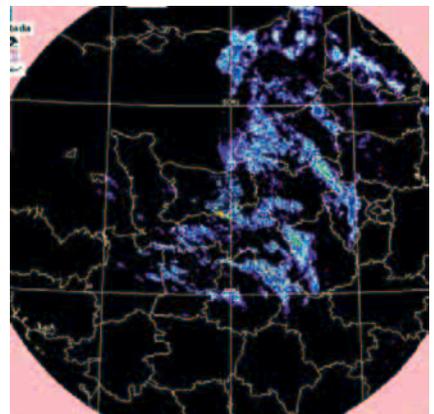
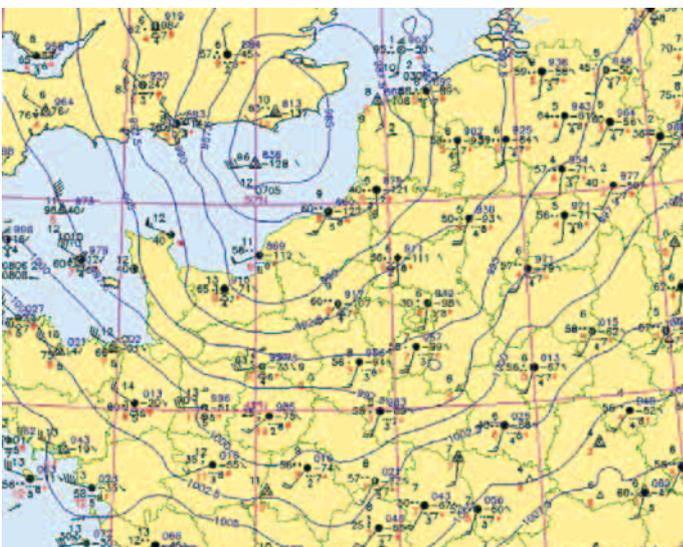


Figure 10 - Image radar du nord-ouest de la France le 17 décembre 2004 à 12 h 00 UTC. Le radar local de Caen détecte des précipitations peu organisées et de nature plutôt convective, bien en avant de l'intrusion froide qui affecte alors le Cotentin. (Source : Météo-France)



dente. Il est tentant de l'étrier de la baie de Somme à la Vendée — en passant par le sud du département de l'Orne — si l'on se réfère aux éléments classiques du codage inhérent à ce type de document :

La confrontation des images infrarouge (figure 9) et des échos radar (figure 10) de 12 h 00 UTC renforce la singularité de cette situation : la zone d'ascendance la plus forte se situe bien en avant de la trace au sol supposée du front froid et les échos de pluie apparaissent pour le moins erratiques.

Figure 8 - Analyse « surface » du modèle Arpège de 12 h, pour 12 h 00 UTC le 17 décembre 2004. L'analyse suggère la présence d'un front sur un axe Abbeville/Le Mans ; mais, en réalité, l'air froid et sec vient seulement d'aborder le Cotentin. (Source : Météo-France)

Analyse d'altitude et front froid dédoublé

Il convient alors de s'intéresser au champ de température potentielle pseudo-adiabatique du thermomètre mouillé (θ^*w) à 850 hPa analysé par le modèle Aladin (figure 11). Ce paramètre, qui est un critère d'identification de masse d'air (pour sa température et son humidité), présente l'avantage d'être conservatoire, ce qui en autorise l'utilisation comme marqueur de déplacement. En effectuant sur le champ de 12 h 00 UTC une coupe axée

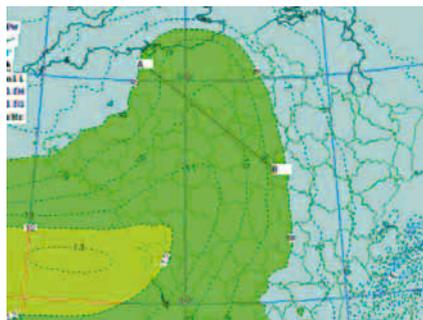


Figure 11 - Champ de θ^*w analysé par le modèle Aladin de 12 h, pour 12 h 00 UTC le 17 décembre 2004. Le champ de θ^*w , représentatif de la dynamique des masses d'air, ne permet pas ici de trancher entre un anafront et un front froid dédoublé. On effectue sur ce champ une coupe spatiale le long d'un axe nord-ouest/sud-ouest (segment AB) qui déterminera la nature du front. (Source : Météo-France)

nord-ouest/sud-est sur la Haute-Normandie (dans une tranche allant de 1 000 hPa à la tropopause) et en y intégrant l'humidité relative (figure 12), on observe que de l'air frais et sec (vers 700/600 hPa) surplombe de l'air chaud et humide de basses couches. Cette représentation est caractéristique d'un front froid dédoublé.

En associant à l'image vapeur d'eau réalisée à la même heure par le satellite MSG la prévision instantanée de l'alti-

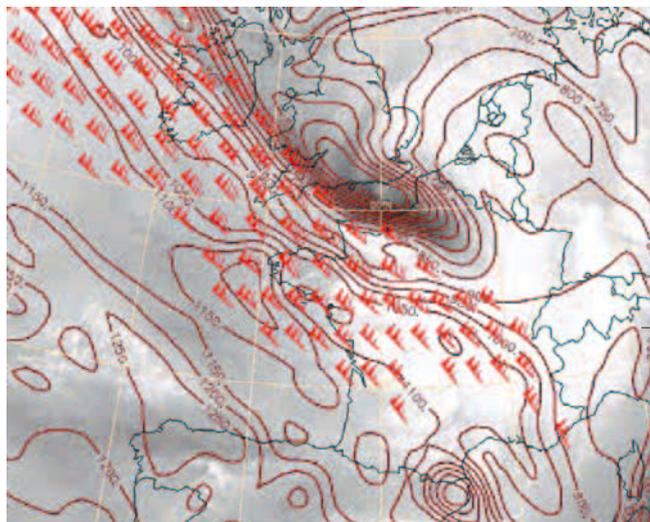


Figure 13 - Image vapeur d'eau du satellite MSG du 17 décembre 2004 à 12 h 00 UTC (les zones les plus sombres correspondent à de l'air sec) et altitude de la tropopause dynamique (modèle Arpège ; isolignes en marron, cotées en décimètres géopotentiels). Un net affaissement de la tropopause accompagne de l'air sec au-dessus de la Manche, en sortie gauche d'un courant-jet d'altitude très rapide (pointages de vent en nœuds, en rouge) peu avant le paroxysme de la tempête sur les côtes. (Source : Météo-France)

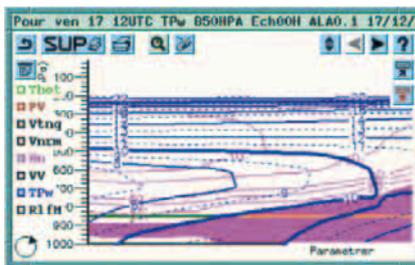


Figure 12 - Coupe réalisée sur le champ de θ^*w de la figure 11. La coupe, effectuée sur une épaisseur allant de la surface à la tropopause, révèle la progression d'un air froid et sec vers 700/600 hPa (en bleu) surplombant de l'air chaud et humide de basses couches (en rose). Cette coupe est caractéristique d'un front froid dédoublé. (Source : Météo-France)

tude de la tropopause dynamique du modèle numérique Arpège (figure 13), nous découvrons un affaissement de celle-ci au-dessus de la Manche orientale, en phase avec de l'air sec. Dans les heures qui vont suivre, cet air va se précipiter dans les toutes basses couches de la troposphère pour s'épandre sur les côtes.

Le graphe de la figure 14 a été bâti à partir des relevés horaires du sémaphore de Dieppe, entre 4 h 00 et 20 h 00 UTC le 17 décembre. Nous observons que l'irruption de l'air froid et sec a bien coïncidé avec la rotation au nord-ouest, de même que la surcote horaire maximale.

L'action du vent d'afflux

La figure 15 met en valeur l'influence du vent d'afflux sur la durée de l'étalement de pleine mer à Dieppe. L'étalement théorique devait débuter à 15 h 31 locale avec une hauteur prédite de 8,48 mètres (cote marine), la pleine mer devant durer précisément 20 minutes. Or cette cote fut atteinte dès 14 h 14 en raison de la progression de l'onde de tempête. Et elle se maintint au-dessus de cette valeur jusqu'à 16 h 53 avec un maximum de 9,82 mètres à 15 h 45. Le niveau de l'étalement prédit fut donc dépassé durant près de 2 h 40. L'évolution de la surcote montre un maximum

Anomalie de tropopause dynamique et tempête en surface

La tropopause, limite supérieure de la troposphère, n'est pas un couvercle plat. Elle présente des irrégularités, souvent faibles, zones de bas géopotentiel de nature tourbillonnaire, appelées « anomalies latentes de tropopause ». Celles-ci peuvent se transformer en « anomalies dynamiques » en raison de la circulation de grande échelle. Les régions polaires connaissent de forts tourbillons, de par la force de Coriolis (d'autant plus efficace que l'on s'éloigne de l'équateur). Lorsque de l'air porteur d'un fort tourbillon (par conséquent souvent associé à de l'air froid) s'approche d'une zone de vent fort (courant-jet d'altitude aux moyennes latitudes) la tropopause « se creuse » davantage, ce qui accentue en retour la vitesse de l'air dans le jet (Santurette, 2001). La perturbation peut se faire sentir jusque dans les basses couches de l'atmosphère, notamment s'il s'y trouve déjà une dépression mineure, qui, de ce fait, risque de se transformer en tempête. L'intrusion d'air sec et froid (subsidence) se retrouve généralement dans le quadrant sud-ouest d'une dépression en voie de creusement. Elle peut alors s'exprimer par de violentes rafales. Les prévisionnistes bénéficient d'une imagerie satellitaire dans le canal vapeur d'eau, qui représente le champ d'humidité en haute troposphère (au-dessus de 600 hPa). Sur leur écran, une zone sombre révèle la présence d'une subsidence (figure 13).

vers 14 h 40 (1,59 mètre), heure à laquelle le vent virait nord-ouest en devenant violent (plus de 50 nœuds en moyenne, soit 92 km/h : force 10 sur l'échelle de Beaufort). On observa, dès la rotation, une hausse rapide de la pression barométrique, mais la surcote ne s'atténua que lentement, conservant un niveau supérieur à un mètre durant 1 h 30. On notera que la performance du modèle de surcote de Météo-France – fonctionnant à partir du modèle Arpège – a été très correcte (figure 16), avec notamment un pic prévu de 1,10 mètre (Arpège) pour le site de

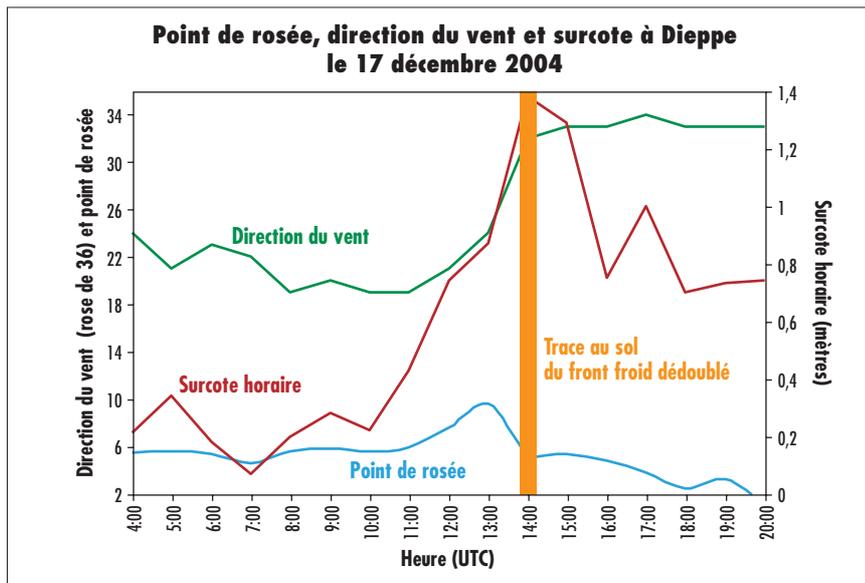


Figure 14 - Direction du vent, points de rosée et surcote à Dieppe le 17 décembre 2004. L'irruption d'air froid et sec, la rotation du vent au nord-ouest marquant la trace au sol du front froid dédoublé ainsi que le maximum de surcote en coïncidence avec la pleine mer auraient pu entraîner de graves submersions. Par chance, le coefficient de marée était faible. Sur l'échelle de gauche, on lit à la fois les valeurs de la direction en rose de 36 et celles de point de rosée en °C. (Sources : Météo-France, Shom et DDE maritime de Dieppe)

Dieppe, certes en dessous du maximum enregistré, mais plutôt satisfaisant compte tenu d'une légère sous-estimation des vents prévus.

Ajoutons que la mer se creusa rapidement : un vent de nord-nord-ouest soufflant force 9 à 10, peut lever une mer de 2 à 2,50 mètres sur le site de Dieppe en moins de deux heures. Or le modèle numérique VAG de Météo-France prévoyait pour 13 heures une hauteur significative de 3 mètres devant Dieppe (dite « mer totale » car intégrant la houle) et de 4 mètres pour 19 heures (avec un vent atténué à force 8 pour cette échéance). On peut donc estimer qu'au plus fort de la tempête (vers 16 heures) régnait un état de mer totale d'environ 5 mètres. Une inondation majeure aurait donc pu se produire si le coefficient de marée avait été plus élevé.

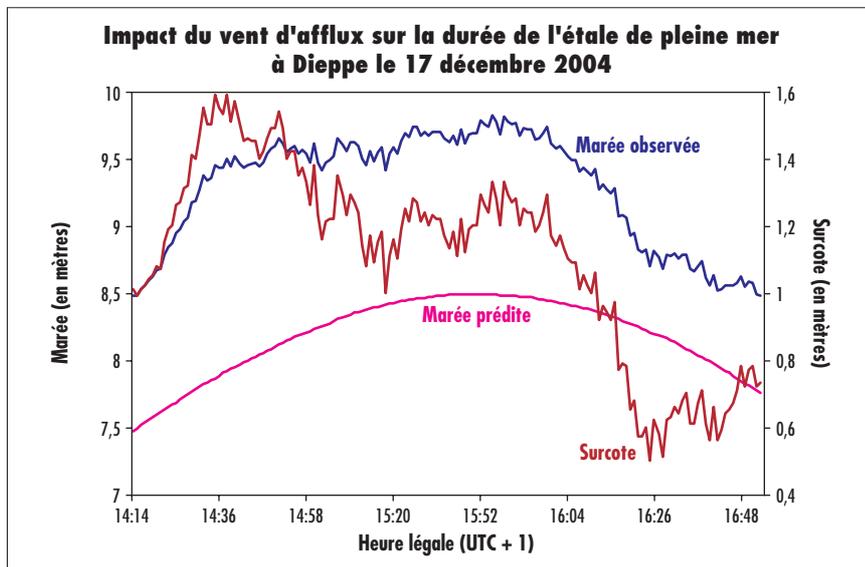
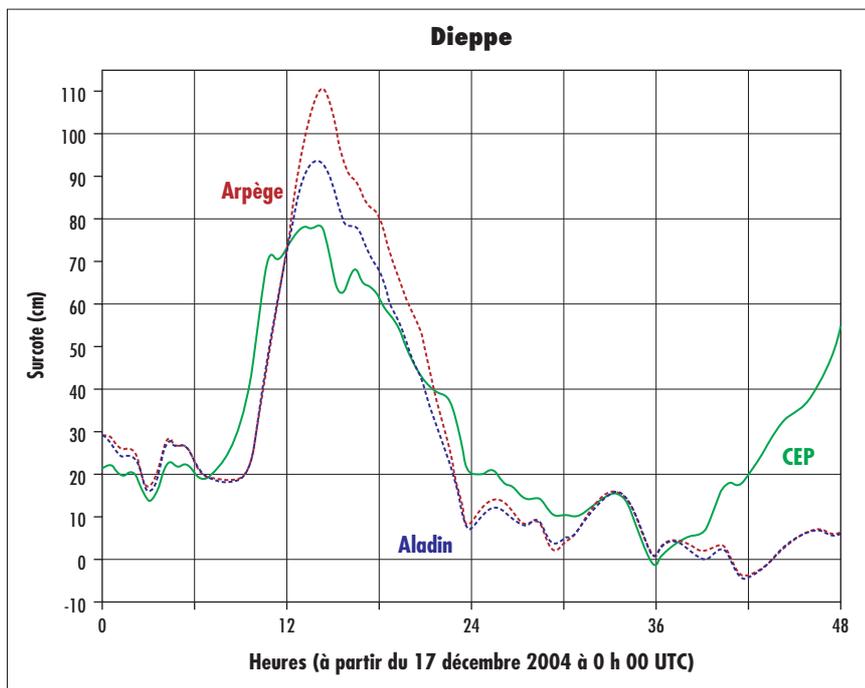


Figure 15 - Impact du vent d'afflux sur la durée de l'étale de pleine mer à Dieppe le 17 décembre 2004 : le niveau de l'étale prédit fut dépassé durant près de 2 h 40. (Sources : Shom et DDE maritime de Dieppe)



Conclusion

Nous avons souhaité, dans cet article, présenter la complexité d'un phénomène de submersion marine sur les côtes de Haute-Normandie et de Picardie. Ici, l'inondation résulte le plus souvent de la concomitance de plusieurs facteurs (pouvant être interdépendants), tels que vent, vagues, surcote et abaissement du profil des plages. Lorsque, dans le sillage d'un front froid, les vents s'orientent ouest à nord-ouest, ils sont dits « d'afflux » pour ce littoral, car ils génèrent une surcote à la marée et creusent la mer qui submerge les quais et les perrés. Une bonne prévision, par Météo-France, de la progression et de l'intensité d'un front froid en période de marée à risque est un élément majeur pour la mise en alerte des populations concernées par une submersion de tempête.

Figure 16 - Extrait du modèle de surcote de Météo-France du 17 décembre 2004. Bien qu'ayant sous-estimé le pic de surcote à Dieppe, c'est le modèle Arpège qui, ce jour-là, s'est montré le plus performant.

Bibliographie

- **Bournerias M., C. Pomerol et Y. Turquier**, 1983 : *La Manche de Dunkerque au Havre*. Guides naturalistes des côtes de France, Delachaux et Niestlé, Paris, 242 p.
- **Carter R. W. G.**, 1988 : *Coastal environments: an introduction to the physical, ecological and cultural systems of coastlines*. Academic Press, London, 617 p.
- **Caspar R.**, 1988 : Marée de tempête sur le littoral de Haute-Normandie, 22 janvier 1988. *Met Mar*, 141, 12-18.
- **Caspar R.**, 1990 : Marées de tempête dans le nord-ouest de la France. *Neptunia*, Amis des musées de la Marine, Paris, 178, 8-15.
- **Caspar R.** et **H. Poullain**, 1996 : Coups de vent de nord à nord-est sur les côtes normandes. *Met Mar*, 172, 33-38.
- **Costa S.**, 1997 : *Dynamique littorale et risque naturel : 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 Thesis, université de Paris-1, 376 p.
- **Costa S., O. Cantat, P. A. Pirazzoli, M. Lemaitre et D. Delahaye**, 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.** et **D. Delahaye**, 2005 : *Beaches at risk*. Rapport final du programme européen « interreg 3a », Conseil régional de Haute-Normandie, 187 p.
- **Daniel P.**, 2001 : *Cartographie des zones à risque de surcotes sur les côtes de la Manche et de l'Atlantique*. Météo-France, rapport interne, 80 p.
- **Hontarrède M.** et **F-L Galli**, 2001 : Des inondations meurtrières, exemples de marées de tempêtes à travers le monde. *Met Mar*, 190, 18-21.
- **LCHF**, 1972 : *Étude de la production des galets sur le littoral haut-normand*. Laboratoire central d'hydraulique de France, 63 p.
- **Météo-France, station du Havre**, 1996 : *Rapport pour la préfecture de la Seine-Maritime suite aux inondations de la nuit du 28 au 29 octobre 1996*. Document interne.
- **Paskoff R.**, 1985 : *Les littoraux : impact des aménagements sur leur évolution*. Masson, Paris, 184 p.
- **Paskoff R.**, 1996 : Littoraux, mers, océans. In Derruau M., *Composantes et concepts de la géographie physique*. Armand Colin, Paris, 115-130.
- **Paskoff R.**, 1998 : La crise des plages : pénurie de sédiments. *Mappemonde*, 52, 11-15.
- **Pirazzoli P. A.**, 2005 : Niveaux marins, surcotes et tendances climatiques sur les côtes de la Manche Est. In Costa S., D. Delahaye, 2005: *Beaches at risk*, rapport final du programme européen « interreg 3a ». Conseil régional de Haute-Normandie, 35-82.
- **Pirazzoli P. A., S. Costa, U. Dornbush et A. Tomasin**, 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, mars 2006, 1-15.
- **Santurette P.**, 2001 : À propos des fronts froids. *Met Mar*, 191, 8-13.
- **Shom**, 1968 : Courants de marée dans la Manche et sur les côtes françaises de l'Atlantique, N° 550.
- **Shom**, 1996 : Courants de marée. Baie de Seine. De Cherbourg à Fécamp. N° 561-UJA.
- **Simon B.**, 1994 : *Statistique des niveaux marins extrêmes le long des côtes de France*. Rapport d'études et de recherches, Service technique central des ports maritimes et voies navigables, Compiègne.