

Assurer la sécurité des personnes et des biens est une des missions prioritaires de Météo-France. Ce devoir s'applique notamment dans la prévision des **surcotes océaniques** afin que soient mis en œuvre des mesures propres à prévenir leurs effets néfastes : inondations du littoral, gêne pour la navigation et la gestion des ports...

Pour ce faire, la division Marine et Océanographie de la Direction de la Prévision observe et modélise depuis de nombreuses années les fluctuations des mers et océans. Quel est exactement le phénomène de surcotes ? Comment les mesure-t-on ? Comment les prévoit-on ? Autant de questions, et d'autres encore, auxquelles nous allons répondre.

**Qu'est ce que le phénomène de surcote ?**

Le phénomène de surcote consiste en une élévation du niveau de la mer provoquée par une faible pression atmosphérique ou par des vents forts soufflant de la mer vers la terre, ces deux phénomènes se combinant lorsqu'une perturbation active (ou un cyclone sous les tropiques) aborde une côte. La surcote est alors la différence entre le niveau de la marée astronomique théorique calculée et la hauteur réelle de la mer mesurée par exemple avec un marégraphe.

$$\text{Surcote} = \text{niveau de la mer} - \text{marée astronomique}$$

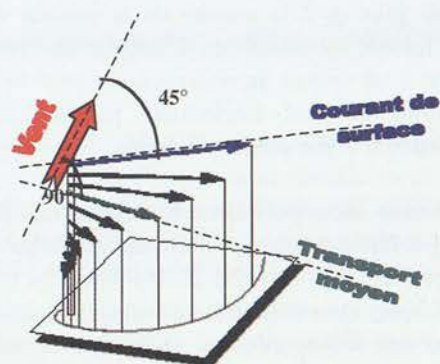
Lorsque cette différence est négative (moins d'eau que prévu), on parle de *décote*.

**Quels sont les paramètres générant la surcote ?**

- La pression atmosphérique.  
L'élévation du niveau de la mer due à de faibles pressions est appelée effet barométrique inverse. Une baisse de pression de 10 hPa provoque une hausse du niveau de la mer de 10 cm (en supposant le système stationnaire et après un temps suffisamment long pour obtenir l'équilibre). Cette valeur, bien vérifiée en eaux profondes, peut être amplifiée près des côtes, en raison de l'effet dynamique de la pression : une

dépression se déplaçant rapidement par petits fonds peut générer des surcotes importantes.

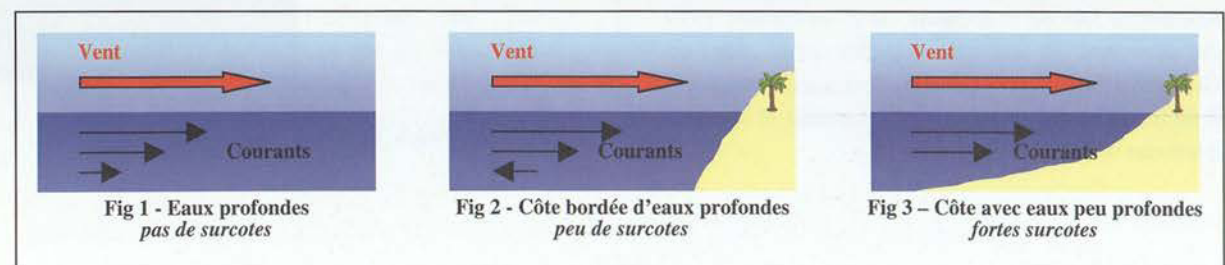
- Le vent de surface.  
Lorsqu'un vent souffle sur l'océan, il fait naître des courants entraînant les eaux de surface. Le courant ainsi généré se propage jusqu'à une centaine de mètres de profondeur environ : c'est la couche d'Ekman. Le courant moyen de cette couche est orienté à droite du vent dans l'hémisphère Nord et forme avec l'axe du vent un angle de 90°. Le courant de surface est à 45°, en théorie sur la droite du vent (dans l'hémisphère Nord).



L'angle du vent par rapport à la côte est un facteur déterminant. La surcote sera plus importante si l'écoulement du courant est perpendiculaire à la côte que s'il se fait de manière tangentielle. De plus, c'est intuitif, l'ampleur de la surcote augmente avec le renforcement du vent.

- La bathymétrie<sup>(1)</sup> et la configuration de la côte.  
En pleine mer, les courants de surface ne provoquent pas de surcotes car ils peuvent s'écouler librement à toute profondeur. De même, près des côtes bordées par des eaux profondes, car le surplus d'eau peut être évacué en profondeur par un « contre courant ». Par contre, les eaux accumulées par les vents contre un littoral bordé d'eaux peu profondes génèrent des surcotes importantes.

La forme de la côte intervient également dans l'ampleur de la surcote : une baie, un estuaire ou un golfe favorise le phénomène (baie de Somme, rade de Brest, estuaire de la Gironde...) alors qu'un cap le réduit (pointe de Penmarc'h, cap Fréhel...)





- Autres effets.

D'autres éléments, difficiles à appréhender, peuvent avoir un effet significatif sur l'élévation du niveau de la mer : les états de mer (mer du vent et houles), les précipitations, le débit des fleuves et rivières.

### Comment mesure-t-on les surcotes ?

Pour mesurer une surcote, il faut connaître la hauteur du niveau de la mer et lui soustraire la marée astronomique qui est la réponse des océans à l'action gravitationnelle de la lune, du soleil et, dans une moindre mesure, des planètes voisines de la Terre. Le mouvement de ces astres étant connu avec précision, des formules de prédiction de marée ont été établies et l'estimation de surcote ne se résume plus qu'à la mesure de la hauteur d'eau. Cette mesure est effectuée en fonction du temps par rapport à un niveau de référence qui peut être, par exemple, le plan horizontal passant par la graduation 0 d'une échelle de marée.

En France métropolitaine, le réseau du SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine) regroupe environ 25 Marégraphes Côtiers Numériques qui enregistrent de manière continue le niveau des océans et mers. Différents organismes mesurent également la hauteur d'eau pour leurs besoins propres : les Ports Autonomes (Dunkerque, le Havre, Bordeaux...), les services maritimes de la DDE (Direction De l'Équipement), certaines compagnies pétrolières, EDF...

Toutes ces données permettent d'avoir une connaissance assez précise du niveau des mers à un instant précis.

### Pourquoi prévoir les surcotes ?

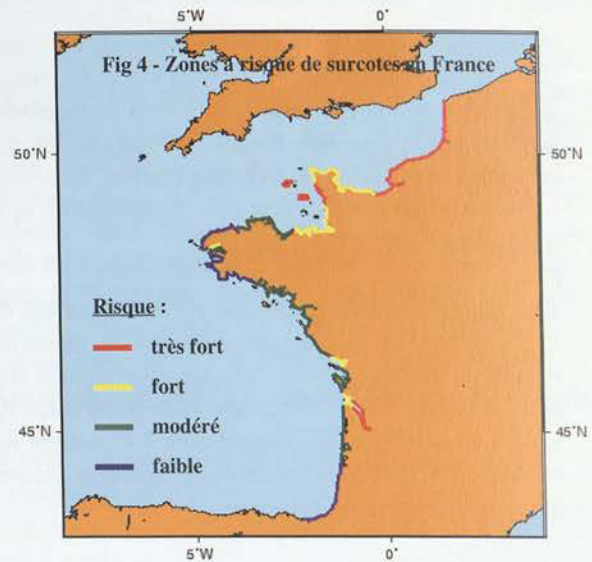
- Des hauteurs d'eau considérables.

Le record absolu de surcotes, estimé à 13 mètres, semble avoir eu lieu en mars 1899 quand un ouragan majeur passa sur la côte nord-est de l'Australie, près de Bathurst Bay.

La surcote la plus forte enregistrée dans l'Atlantique Nord s'est produite lors du passage du cyclone Camille en 1969 sur la Louisiane avec plus de 7 mètres.

En France métropolitaine également, les surcotes peuvent être importantes. Par exemple, les valeurs de l'ordre de 1,5 mètres enregistrées sur la côte Atlantique lors de la tempête du 27 décembre 1999 ont provoqué de nombreux dégâts sur la côte : en Gironde, l'effet de surcote s'est propagé et a atteint 2 mètres à Pauillac et à Blaye, inondant la centrale nucléaire du Blayais.

Il existe plusieurs zones à très fort risque de surcotes en métropole :



- Baie de Somme
- Baie de Quiberon
- Baie de Seine
- Estuaire de Loire
- Ouest Cotentin
- Pertuis Charentais
- Rade de Brest
- Estuaire de Gironde

- Des conséquences graves.

Les conséquences sociales et économiques des surcotes, véritable invasion des terres par les océans, sur la frange littorale où sont concentrées l'essentiel des populations et des activités, peuvent être très lourdes.

En effet, les raz de marée comptent parmi les phénomènes naturels les plus meurtriers et touchent de plein fouet de nombreux pays du tiers monde :

- En 1876, la marée de tempête produite par le cyclone Bakerganj aurait tué environ 2 millions de personnes au Bangladesh. La surcote fut évaluée à une valeur exceptionnelle de 12 m !
- En 1970, 300 000 personnes périrent dans le delta du Gange suite à une énorme marée de tempête estimée à plus de 9 mètres.



Fig 5 - Folly Beach (USA) avant et après une forte surcote...



La prévision des surcotes est un enjeu capital. Tant dans les DOM-TOM qu'en métropole, des systèmes s'appuyant sur la modélisation des océans ont été développés et sont opérationnels à Météo-France. Les prévisionnistes disposent maintenant, à l'approche d'un cyclone ou d'une tempête, d'une évaluation du risque de surcotes, ce qui permet de conforter les éléments d'aide à la décision fournis aux autorités préfectorales.

### Comment prévoit-t-on les surcotes ?

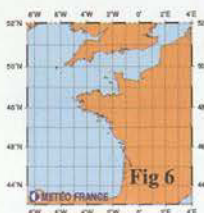
Deux types de modèles peuvent être utilisés pour prévoir les surcotes : les modèles statistiques et les modèles dynamiques.

L'utilisation d'un modèle statistique nécessite un enregistrement continu du niveau de la mer sur une longue période, ce qui permet de calibrer le modèle en fonction d'un certain nombre de paramètres atmosphérique. Un tel modèle a été utilisé à Météo-France pour quelques ports de la Manche. Ce système est peu coûteux en temps de calcul, mais ne permet pas de faire des prévisions en dehors des points où il existe des points de mesures.

Météo-France s'est donc tourné vers les modèles dynamiques permettant de palier au manque de mesures (notamment dans les zones tropicales). L'apparition des stations de travail puissantes permet maintenant l'utilisation de ces modèles hydrodynamiques dans les centres de prévisions opérationnels.

L'utilisation de modèles numériques pour la prévision de surcotes est une technique bien établie et forme la base de systèmes opérationnels de prévision tels que le modèle SLOSH codé en 1992 aux Etats-Unis ou le modèle du BMRC en Australie (1991).

Le système développé par DPREVI/MAR<sup>(2)</sup> a d'abord été installé à la Direction Antilles-Guyane en novembre 1993 pour prévoir les surcotes dues aux cyclones. Il a ensuite été étendu aux autres directions d'Outre Mer (Nouvelle Calédonie en décembre 1994, Polynésie Française en novembre 1995 et Réunion en décembre 1996).



Ce modèle a été adapté aux côtes de la métropole suite aux tempêtes de l'hiver 1990 à l'origine de fortes inondations du littoral. Il est actuellement opérationnel et fournit depuis octobre 1999 des prévisions quotidiennes pour les côtes de la Manche et du Golfe de Gascogne (fig. 6)..



Etendu à la mer du Nord et validé pour le calcul de la marée, le modèle n'est pas encore opérationnel sur ce secteur (fig. 7). Mais une étude positive a été menée en juin 2002, laissant augurer un passage rapide en mode opérationnel du modèle sur tout le domaine.

Le modèle fonctionne également en mode pré-opérationnel depuis juin 2001 sur l'ouest de la méditerranée (fig.8).



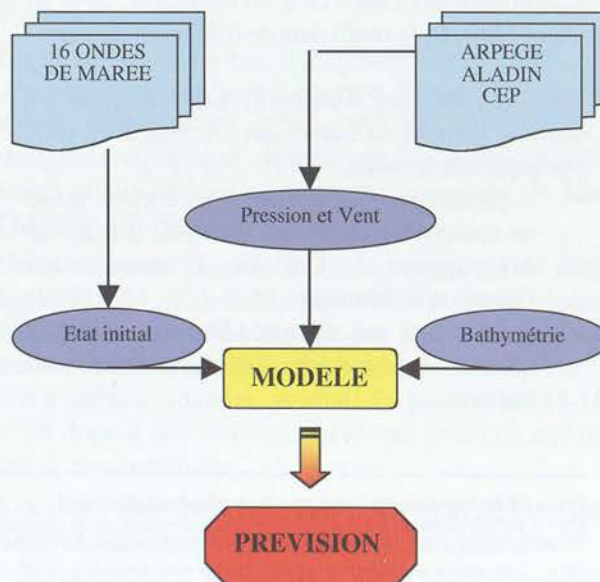
### Comment fonctionne le modèle de prévision ?

#### • Principe.

Le modèle de prévision numérique de surcotes utilisé par Météo-France est un modèle forcé par le vent, la pression atmosphérique et la marée. Les calculs d'élévation de la mer sont initialisés par 16 ondes de marées connues réparties le long des frontières du domaine auxquelles est ajouté l'effet barométrique inverse. La bathymétrie (profondeur de la mer) utilisée pour les calculs a une résolution de 5 minutes en latitude-longitude. Cette bathymétrie a ensuite été améliorée à l'aide de cartes marines.

Ensuite, le modèle évalue en chaque point de grille et pour chaque pas de temps, une élévation du niveau de l'eau (marée + surcotes) à partir du forçage atmosphérique issu des modèles de prévision du temps<sup>(3)</sup>.

Voici le schéma simplifié du fonctionnement du modèle :





• Les équations du modèle.

Les principales variations, à court terme, de la circulation océanique, en particulier sur un plateau continental, sont dues au vent et à la pression atmosphérique. Ainsi, les effets baroclines<sup>(4)</sup> peuvent être négligés pour la prévision de la circulation océanique sur des périodes de quelques jours. Un modèle intégré sur la profondeur a donc été adopté par DPREVI/MAR pour la prévision des surcotes.

Celui-ci utilise, pour modéliser le forçage atmosphérique (vent et pression), les équations de Saint Venant :

$$\begin{cases} \frac{\partial q}{\partial t} + q \nabla q + f \cdot k \wedge q = -g \nabla \eta - \frac{1}{\rho} \nabla Pa + \frac{1}{\rho H} (\tau_s - \tau_b) + A \nabla^2 q \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla (H \cdot q) = 0 \end{cases}$$

avec : *t* le temps, *q* le courant intégré sur la profondeur, *η* l'élévation de la surface libre, *H* la hauteur d'eau totale, *f* le paramètre de Coriolis, *k* le vecteur unité vertical, *Pa* la pression atmosphérique en surface, *τ<sub>s</sub>* la tension du vent, *τ<sub>b</sub>* le frottement au fond, *ρ* la masse volumique de l'eau, *g* l'accélération de la pesanteur, *A* le coefficient de diffusion horizontale.

Pour remonter du vent à 10 mètres issu de modèles atmosphériques (ARPEGE, ALADIN), jusqu'à la tension du vent en surface, le modèle de prévision de surcotes utilise une loi quadratique :

$$\begin{cases} \tau_{sx} = \rho_a \cdot C_d \cdot |W_{10q}| \cdot W_{10x} \\ \tau_{sy} = \rho_a \cdot C_d \cdot |W_{10q}| \cdot W_{10y} \end{cases}$$

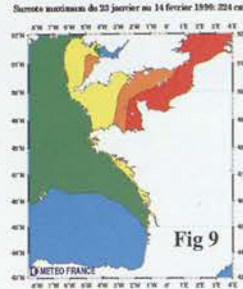
avec : *W<sub>10x</sub>* et *W<sub>10y</sub>* les composantes horizontales du vent à 10 m, *ρ<sub>a</sub>* la masse volumique de l'air saturé à température moyenne (15°C en métropole, 25°C en Outre-Mer), *C<sub>d</sub>* le coefficient de frottement air-eau.

Ces équations (et d'autres !) sont intégrées en utilisant un schéma numérique fractionné en trois pas explicites séparés :

- le premier pas, appelé pas d'ajustement, prend en compte les effets des ondes de gravités et des termes de Coriolis. Il résout aussi l'équation de continuité.
- le deuxième pas, dit pas advectif, calcule les termes d'advection (déplacement) non linéaires.

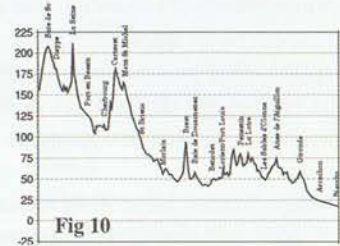
- le troisième pas, le pas physique, tient compte des effets de la tension due au vent, du frottement au fond et de la pression atmosphérique.

Quels sont les produits fournis par Météo-France ?



Météo-France fournit à ses clients abonnés des prévisions quotidiennes de surcotes sous forme de cartes de maximums (fig. 9), de tableaux ou de graphiques (fig. 10). Ceux-ci disposent des résultats calculés chaque jour à partir des trois modèles atmosphériques opérationnels de Météo-France (CEP, ARPEGE et ALADIN).

Les prévisions sont disponibles soit pour l'ensemble d'un littoral soit par port.



Où en est la recherche sur ce phénomène ?

La prévision de surcotes est un enjeu capital pour la sécurité des personnes et des biens. Météo-France est bien sûr très impliquée dans la recherche et la prévision des surcotes océaniques.

Tous les littoraux des DOM-TOM sont couverts par les prévisions du modèle numérique et quasiment toutes les côtes de la métropole (la Mer du Nord est actuellement en phase de test).

L'amélioration des prévisions de surcotes passe avant tout par une meilleure prise en compte du forçage atmosphérique. C'est donc sur un **perfectionnement des modèles atmosphériques** (notamment en terme de resserrement de la maille temporelle et spatiale) qu'il faut compter.

*Grégory FIFRE*

(1) : La bathymétrie est la mesure des profondeurs marines.  
 (2) : DPREVI/MAR est une division de la direction de la production basée à Toulouse qui s'occupe exclusivement de la recherche et du développement opérationnel dans le domaine maritime (dérive de polluants, houle, surcotes, courants...)  
 (3) : 3 modèles de prévision opérationnels sont utilisés à Météo-France : le modèle du Centre Européen de Prévvision (CEP), le modèle global ARPEGE, et le modèle à aire limitée (centré sur la France) ALADIN.  
 (4) : L'océan est dit barotrope (antonyme de barocline) lorsque la force de pression et la force de Coriolis sont en équilibre parfait.