

LES SURCOTES

Le niveau de la marée océanique à un instant et en un lieu donnés diffère plus ou moins du niveau qui peut y être calculé — avec beaucoup de précision — par les données astronomiques. Ces perturbations peuvent avoir des effets importants sur les hauteurs d'eau observés, notamment lors d'événements exceptionnels tels les tempêtes. Ces perturbations peuvent avoir des effets importants sur l'activité humaine près des côtes. C'est pourquoi l'enjeu est important. La prévision de ses phénomènes, qui peuvent être destructeurs, est primordiale.

I. Le phénomène physique

ORIGINE

Une surcote est, sur une région océanique, un soulèvement de la surface de la mer qui est généralement dû à l'effet d'une dépression météorologique, celle-ci venant élever le niveau de la mer par rapport au niveau que prévoyait le calcul de la seule marée astronomique.

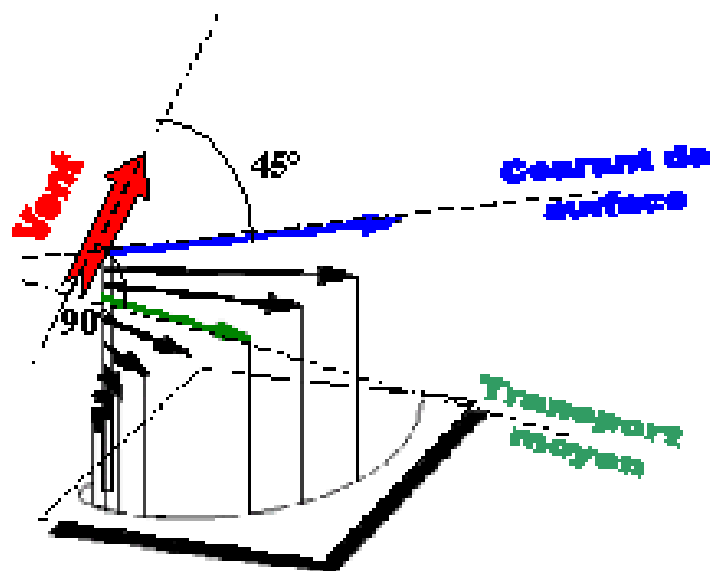
Ce décalage provient principalement des variations dans le poids de l'atmosphère, tel que le supporte la surface de l'océan. Pareilles variations sont mises en évidence par la répartition des valeurs de la pression atmosphérique au niveau de la mer : là où se dessine un anticyclone, la surface océanique se creuse sous l'effet d'une atmosphère plus lourde et l'on mesure une décote, c'est-à-dire une différence négative de niveau par rapport à la marée astronomique; là où apparaît au contraire une dépression, l'atmosphère plus légère qui surplombe la surface de la mer la fait se soulever, provoquant ainsi une surcote, c'est-à-dire une différence positive de niveau par rapport à la marée astronomique. L'action des vents se combine fréquemment à celle de la pression atmosphérique pour amplifier la valeur et les effets des décotes ou des surcotes.

- 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 ⁽¹⁾ 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...)

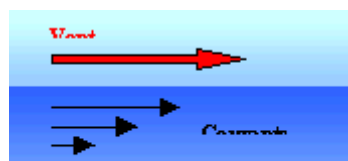


Fig 1 - Eaux profondes
pas de surcotes

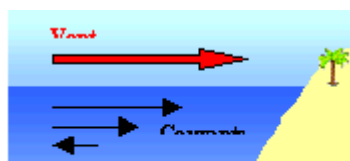


Fig 2 - Côte bordée d'eaux profondes
peu de surcotes

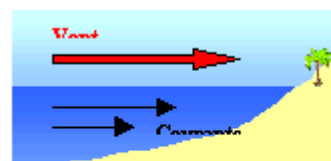


Fig 3 - Côte avec eaux peu profondes
fortes surcotes

- 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.

Une fois la surcote formée, elle peut se propager vers la côte et se superposer à l'onde de marée: on parle dans ce cas de **marée de tempête**.

Propagation de la surcote : onde de tempête

La profondeur des eaux océaniques suivant lesquelles se propage une onde de tempête est à prendre en compte pour anticiper le comportement de celle-ci. En eaux profondes, le mouvement de la masse d'eau emportée par l'onde de tempête tend à être dévié vers la droite dans l'hémisphère Nord, vers la gauche dans l'hémisphère Sud, en raison de l'action de la force de Coriolis : là où le vent souffle à peu près à angle droit dans le sens de cette déviation, il amplifie alors la surcote, qui peut atteindre des valeurs énormes (jusqu'à 7 mètres dans le cas de cyclones tropicaux), provoquant des catastrophes si l'onde rencontre ensuite une côte. En eaux peu profondes (en deçà d'une centaine de mètres de profondeur), c'est plutôt le frottement exercé par le vent sur la surface de la masse d'eau et l'amoncellement consécutif de celle-ci dans le sens de son propre déplacement le long de la côte qui contribuent à amplifier la surcote, comme il arrive lors des tempêtes des zones tempérées.

II. La mesure

La surcote est la différence entre le niveau de la marée astronomique théorique calculée et la hauteur réelle de la mer mesurée par exemple avec un marégraphe.

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

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.

III. Conséquences

Les phénomènes de décotes et de surcotes ont des conséquences sur l'activité humaine. Concernant les premières, ces effets se manifestent surtout par la gêne alors apportée à la navigation lors des entrées ou des sorties de port. Concernant les secondes, c'est le risque d'inondation des régions côtières qui est à redouter, et ce risque ne se réalise que trop souvent

lorsque de fortes perturbations soulèvent une onde de tempête qui se superpose à l'onde de marée et propage la surcote vers la terre ferme : on parle dans ce cas de marée de tempête (celle-ci se mesure par un nombre égal à la somme de la surcote et de la valeur, positive ou négative, du niveau de la marée astronomique).

Les conséquences sociales et économiques des surcotes, véritables invasions des terres par les océans, sur la frange littorale où est concentré l'essentiel des populations et des activités peuvent être très lourdes, notamment en zone inter tropicale (DOM, TOM) mais également en zone tempérée (France métropolitaine).

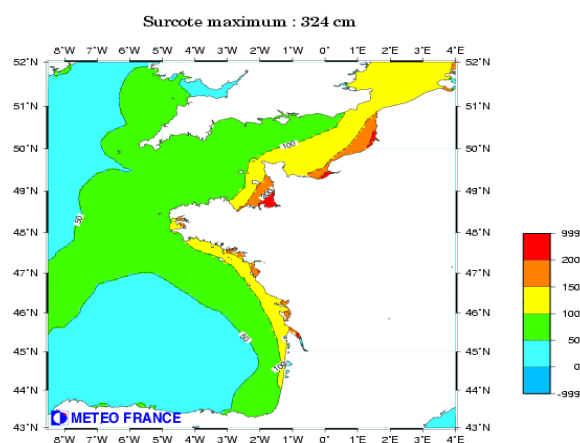
IV. Impacts observés

- Des hauteurs d'eau considérables :

Voici quelques ordres de grandeurs :

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

- Quelles sont les manifestations de ce risque en Gironde ?

L'ensemble du département girondin est bien concerné par le risque tempête d'autant que le département présente une longue façade maritime. En effet, les zones littorales sont particulièrement sensibles au risque tempête car elles sont plus proches en général des perturbations venant de l'Atlantique. Le passage d'une tempête crée une surcote océanique dangereuse pour les populations et les biens. De plus la configuration en " entonnoir " de l'estuaire de la Gironde, renforce l'onde de surcote, ce qui explique que l'on observe des phénomènes plus importants à Bordeaux qu'au Verdon.

Les tempêtes extra-tropicales surviennent généralement en automne-hiver, d'où leur appellation de tempête d'hiver. Elles peuvent néanmoins se produire en toute saison sous l'influence d'un cyclone ayant quitté les régions tropicales.

Les deux tempêtes successives des 26 et 27 décembre 1999 (Lothar et Martin) ont fait plusieurs victimes et occasionné de graves dommages sur la majeure partie du territoire national.

La Gironde, frappée le 27 décembre 1999, n'a pas été épargnée :

- 3 victimes décédées, 36 blessés graves et 2 299 personnes secourues ;
- de nombreuses habitations inondées en bordure d'estuaire et des digues endommagées
- 400 000 foyers privés d'électricité (arbres abattus sur les lignes et pylônes détruits), dont plusieurs établissements sensibles (maisons de retraite) - le rétablissement complet de l'alimentation n'a pu intervenir que 20 jours après ;
- 60 000 foyers sans téléphone - le retour à la normale s'est opéré 25 jours après ;
- 111 000 habitations privées d'eau potable, conduisant les autorités à distribuer 400 000 bouteilles par jour et à installer 390 citernes ;
- les réseaux routiers (surtout en Médoc et Haute Lande) et ferroviaire (y compris lignes TGV) fortement perturbés ;
- 30% (18 millions de m³) de la forêt abattue (la sylviculture est un secteur majeur de l'économie locale) nécessitant l'intervention des forces armées (jusqu'en mars) pour dégager plus de 3 400 kilomètres de pistes forestières.

V. La prévision : méthodes numériques

La prévision des valeurs des décotes et surcotes joue un rôle essentiel dans le suivi de situations de crise telles que la cyclogenèse d'une tempête exceptionnelle dans l'Atlantique nord ou, plus encore, l'évolution d'un cyclone tropical. Divers centres météorologiques ont par suite élaboré des modèles numériques de prévision à courte échéance des surcotes sur les régions côtières ; c'est en particulier le cas de Météo-France pour ce qui est des zones océaniques intertropicales où sont situés des Départements et Territoires d'Outre-Mer. On utilise en outre les modèles de ce genre pour examiner les résultats qu'ils fournissent après simulation systématique des trajectoires possibles de tempête ou de cyclone : de tels résultats fondent une climatologie des surcotes et décotes sur ces mêmes régions côtières, permettant alors de mieux organiser leur aménagement et leur sécurité civile.

Pour ce faire, à Météo-France, la division Marine et Océanographie de la Direction de la Prévision a élaboré un modèle de prévision numérique de surcotes. Celui-ci est opérationnel depuis le milieu des années 90 dans les Directions Météorologiques d'Outre mer, depuis 1999 pour les côtes de la Manche et du Golfe de Gascogne et depuis 2000 sur la Méditerranée.

Comment prévoit-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 atmosphériques. 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(2) 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).

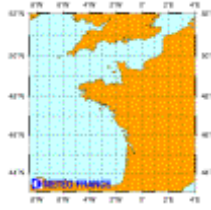


fig. 6

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.

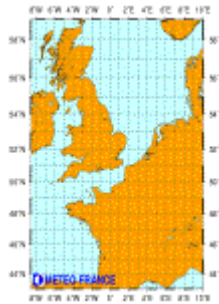


fig. 7

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

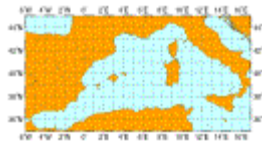


fig. 8

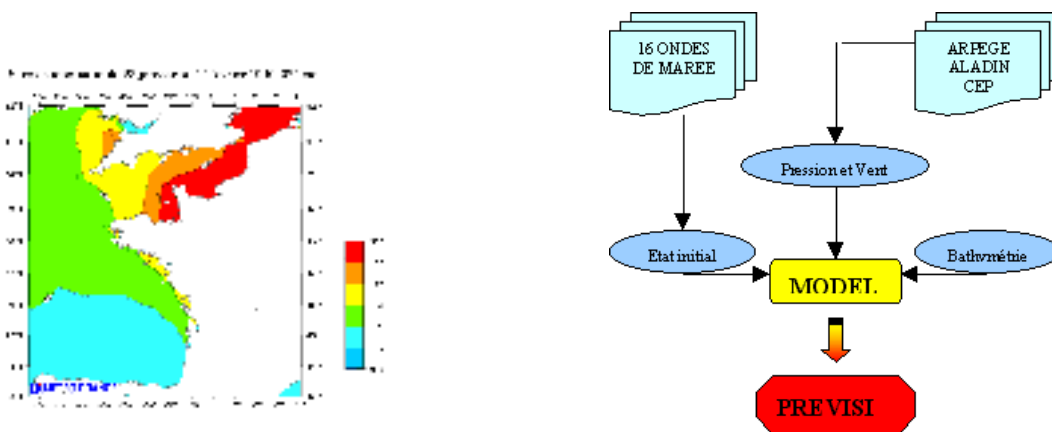
Comment fonctionne le modèle de prévision ?

- 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 ⁽³⁾.

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⁽⁴⁾ 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* :

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

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, P_a la pression atmosphérique en surface, τ_s la tension du vent, τ_b 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* :

$$\begin{cases} \tau_{sx} = \rho_a C_d |\mathcal{W}_{10}| \mathcal{W}_{10,x} \\ \tau_{sy} = \rho_a C_d |\mathcal{W}_{10}| \mathcal{W}_{10,y} \end{cases}$$

avec : W_{10x} et W_{10y} les composantes horizontales du vent à 10 m, ρ_a la masse volumique de l'air saturé à température moyenne (15°C en métropole, 25°C en Outre-Mer), C_d 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).

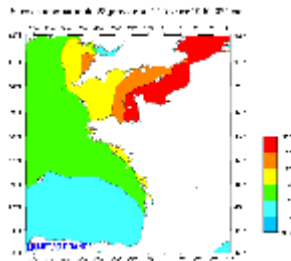


fig. 9

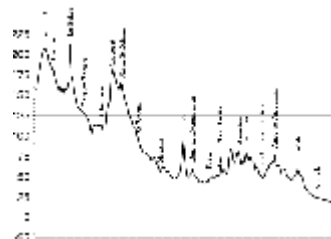


fig. 10

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 impliqué 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.

- (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 Prévision (*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.

Références :

* Glossaire météoFrance :

http://www.meteofrance.com/FR/glossaire/designation/687_curieux_view.jsp

http://www.meteofrance.com/FR/glossaire/designation/689_initie_view.jsp

http://www.meteofrance.com/FR/glossaire/designation/689_curieux_view.jsp

* Site de l'association des anciens de Météo-France :

http://www.anciensmeteos.info/prix_aam_2002.htm

* Dossier départemental des risques majeurs en Aquitaine (DDRM) :

http://www.aquitaine.pref.gouv.fr/politiques/securite/civile/ddrm/ddrm_tempete.shtml