

## Avant-propos

Cette fiche a été rédigée dans le cadre du Groupe de travail « Tempêtes et submersions historiques » et plus particulièrement au sein du sous-groupe « Types de données » réunissant plusieurs organismes, et dont l'objectif est de mutualiser les informations de tempêtes et de submersions marines historiques, capitaliser les connaissances et expertiser les données associées à des événements historiques.

Cette fiche relative aux données de surcotes fait partie d'un catalogue de données pour accompagner et comprendre la base de données relative aux tempêtes historiques. Cet état de l'art pourrait nécessiter d'être complété en fonction de besoins ou applications particulières.

L'élaboration de cette fiche, fruit d'un travail collaboratif et pluridisciplinaire, a été pilotée par Nathalie Giloy, Alexa Latapy et Gaël André (Shom), et Franck Mazas (Artelia).

Nous remercions également ici l'ensemble des personnes ayant collaboré avec leurs contributions écrites et/ou leurs relectures : Sabine Cavellec (Cerema), Lise Bardet (IRSN), Marc Andreevsky (EDF), Emmanuelle Athimon (ISEN Ouest).

Les termes suivis d'un astérisque \* sont définis dans un glossaire spécifique associé au catalogue de données.

## Résumé

La différence entre le niveau marin observé et la prédiction de marée est appelée surcote si la différence est positive, et décote si la différence est négative.

De nombreux phénomènes physiques sont susceptibles de faire varier le niveau observé au marégraphe en sus de la marée astronomique (effets stériques, courants généraux, seiches côtières ou portuaires, déferlement des vagues, etc.), mais on parle généralement de surcote / décote pour qualifier les variations induites par les effets météorologiques : pression atmosphérique (effets statiques - baromètre inverse - et dynamiques - déplacement des dépressions -) et vent (*wind setup*).

Lors d'une tempête, une onde de tempête se forme et se propage sous la forme d'une onde longue, de façon similaire à l'onde de marée. À l'approche de la côte, la diminution de la profondeur tend à l'amplifier, d'autant plus dans les zones semi-fermées comme les pertuis, les baies, etc.

On différencie deux types de surcotes/décote :

- la surcote/décote instantanée qui est la différence, à un instant  $t$ , entre le niveau d'eau observé et le niveau d'eau prédit ;

- la surcote de pleine mer qui est la différence entre le niveau de pleine mer observé et le niveau de pleine mer prédit, les instants d'occurrence de ces deux niveaux pouvant être décalés dans le temps. De même, la décote de basse mer est la différence entre le niveau de basse mer observé et le niveau de basse mer prédit.

Actuellement, les surcotes sont largement caractérisées à partir des observations marégraphiques, mais les modélisations numériques permettent désormais de disposer de bases de données de surcote / décotes de large emprise spatio-temporelle. La validation de ces simulations aux marégraphes reste néanmoins fortement recommandée.



## Caractéristiques de la donnée

### Définition

#### Généralités

Le niveau de la mer, tel que mesuré par un marégraphe\* ou par altimétrie spatiale\* (c'est-à-dire hors effet des vagues), varie autour de son niveau moyen du fait de la marée astronomique\* d'une part, et les effets météorologiques, les tsunamis, les effets stériques\* et les variations en lien avec le changement climatique d'autre part (Wöppelmann *et al.*, 2011). Lorsque le niveau marin observé est supérieur au niveau de marée prédit, il s'agit d'une situation de surcote\* ; lorsqu'il est inférieur, il s'agit d'une situation de décote\* (cf. Figure 1).

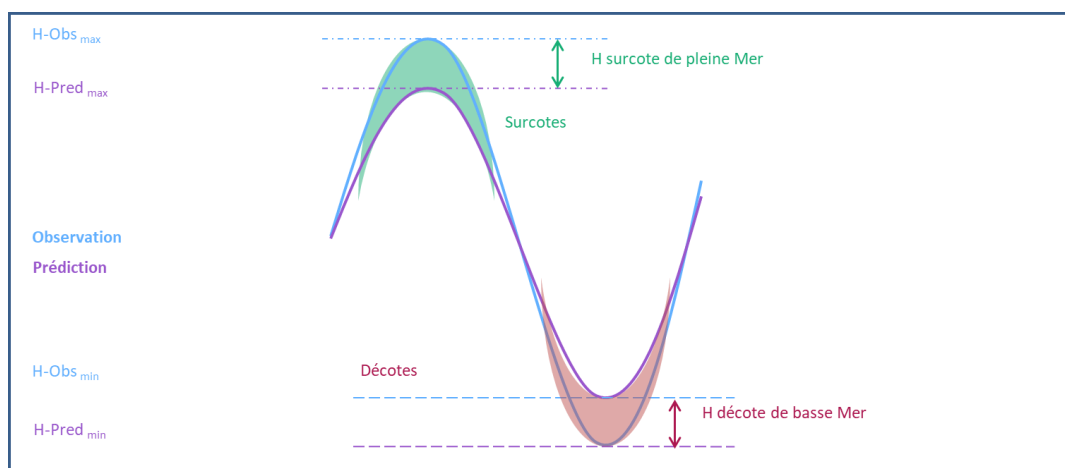
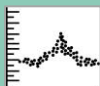


Figure 1 - Représentation schématique des surcotes / décotes (REFMAR).

Le signal de surcote peut donc inclure tous les phénomènes physiques non astronomiques susceptibles de générer des ondes longues mesurées par un marégraphe :

- Variations saisonnières du niveau moyen dus aux effets stériques si non pris en compte dans le traitement du niveau moyen ou dans la composante astronomique,
- Circulation océanique générale,
- Effets météorologiques dus à la pression et au vent,
- Surélévation du niveau moyen due au déferlement des vagues (*wave set-up*)\* si celui-ci s'étend jusqu'au marégraphe (habituellement ; les marégraphe sont situés dans des zones protégées, mais ils peuvent être touchés par le *wave set-up* dans quelques cas exceptionnels (marégraphe d'Arcachon-Eyrac, par exemple),
- Ondes basse fréquence lorsque leur période est suffisamment grande (par exemple seiches côtières, ondes infra-gravitaires),
- Phénomènes exceptionnels, causés par des séismes, éruptions volcaniques, glissements de terrain, etc.



Cependant, dans la très grande majorité des cas, le signal de surcote / décote correspond aux effets météorologiques liés à la pression atmosphérique et au vent. Dans toute la suite de la présente fiche, le terme surcote (resp. décote) est utilisé pour décrire la surélévation (resp. abaissement) du niveau marin du fait des effets météorologiques (dits aussi atmosphériques).

## Génération des surcotes

Lors de la génération de surcotes, trois mécanismes moteurs entrent principalement en jeu :

1. L'effet de baromètre inverse



Figure 2 - Les effets du baromètre inverse.

Un des principaux facteurs contribuant à la surcote est la pression atmosphérique\* (**Figure 2**). La pression moyenne au niveau de la mer est de 1013 hPa. (voir **fiche "Pression atmosphérique"**). Selon la règle du baromètre inverse, si la pression atmosphérique augmente (ou diminue) d'un hectopascal à échelle locale, il en résulte respectivement une diminution (ou une augmentation) du niveau de la mer d'un centimètre (Ponte, 2006; Woodworth et al., 2019; Wunsch & Stammer, 1997) :

$$\Delta\zeta = \frac{\Delta P_a}{\rho g}$$

Avec

$\rho$  la densité de l'eau et  
 $g$  accélération de la pesanteur

2. Les effets barométriques dynamiques

Le déplacement des dépressions\* (très rapide pour les tempêtes atlantiques, très lent pour les cyclones) induit un effet dynamique amplifiant les surcotes. En effet, une surcote de tempête\* se comporte comme une onde longue dont la célérité vaut  $\sqrt{gh}$ , soit environ 730 km/h en bassin océanique et 80 km/h en zone côtière par 50 m de fonds. Lorsque cette célérité correspond à la vitesse de déplacement de la dépression atmosphérique à son origine, l'onde de tempête est amplifiée par effet de résonance, appelé résonance de Proudman.



### 3. Le *wind set-up*\*

À l'approche des côtes, le *wind set-up*\* induit par le vent devient un facteur majeur dans la composition de la surcote (Kohno *et al.*, 2007 ; Rego & Li, 2010) En effet, le vent soufflant sur la surface libre de l'océan engendre un déplacement des masses d'eau. En eau profonde la composante verticale due au vent est négligeable car très faible, et le transport horizontal s'effectue en moyenne à 90° du sens du vent, sous l'influence de la force de Coriolis. Cependant, comme l'élévation de la surface de l'eau due au vent est fortement corrélée à la profondeur de l'eau, cette composante verticale va devenir de plus en plus importante à zone côtière à faible profondeur. La bathymétrie des côtes aura donc une grande importance sur l'évolution de la surcote du large vers la côte.

#### Propagation des surcotes

Lorsqu'une tempête génère une forte surcote nommée onde de tempête, celle-ci se propage sous la forme d'une onde longue, de manière similaire à la marée astronomique. Elle est donc soumise aux mêmes processus de transformation, notamment en zone côtière, avec une tendance à l'amplification lorsque la profondeur d'eau diminue (donc à l'approche des côtes), en particulier dans les pertuis, baies et bassins semi-fermés, ainsi qu'aux interactions avec la côte (diffraction et réflexion) (voir **fiche "Etats de mer"**).

#### Surcotes à la côte

La variabilité des surcotes va de quelques centimètres à plusieurs mètres en cas de situations météorologiques exceptionnelles. Les tempêtes tropicales\* (cyclones\*) ayant un diamètre d'environ 500 km, se déplacent très lentement mais avec une pression atmosphérique pouvant descendre largement sous les 940 hPa et des vents atteignant plus de 300 km/h : par effet de baromètre inverse et *wind setup*, les cyclones peuvent ainsi générer des surcotes atteignant 9-10 m à la côte. Sous les latitudes moyennes, les tempêtes extratropicales\*, plus larges en diamètre (environ 1000 km), peuvent se déplacer très rapidement mais sont moins creuses en termes de pression atmosphérique et les vents associés sont moins violents ; elles génèrent des surcotes de l'ordre de 1 à 3 m.

#### Estimation des surcotes

L'effet de baromètre inverse peut être très facilement estimé en considérant la relation décrite plus haut : une variation d'1 hPa se traduisant par une variation inverse de 0,01 m du niveau.

En ce qui concerne le *wind set-up*\*, la formule semi-analytique suivante, proposée par Sogreah (1984, non publié), permet une première estimation dans le cas simple d'une côte rectiligne, avec une bathymétrie cylindrique à pente constante :

$$h_{wind} = \frac{1.1\tau_w}{\rho_w g s} \ln\left(\frac{h_c + sF}{h_c}\right)$$

où :

- $\tau_w$  (Pa ou  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$ ) est la contrainte de cisaillement du vent sur la surface ;
- $\rho_w$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) est la masse volumique de l'eau ;
- $g$  ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ) est l'accélération de la pesanteur ;
- $h_c$  (m) est la hauteur d'eau, considérée proche de la côte ;
- $s$  (-) est la pente des fonds ;
- $F$  (m) est la distance de fetch (longueur du plan d'eau sur lequel souffle le vent).



La contrainte de cisaillement  $\tau_w$  peut se paramétrer comme suit :

$$\tau_w = C_{10} \rho_{air} U_{10}^2$$

avec :

- $\rho_{air}$  ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) la masse volumique de l'air ;
- $U_{10}$  ( $\text{m.s}^{-1}$ ) la vitesse du vent à 10 m moyennée sur 10 min ;
- $C_{10}$  (-) un coefficient de traînée estimé comme suit :
  - o  $C_{10} = 26.10^{-4}$  pour  $U_{10} \geq 20 \text{ m.s}^{-1}$ ,
  - o  $C_{10} = (U_{10} + 6). 10^{-4}$  pour  $5 \leq U_{10} < 20 \text{ m.s}^{-1}$ ,
  - o  $C_{10} = 11.10^{-4}$  pour  $U_{10} < 5 \text{ m.s}^{-1}$ .

La surcote due au vent peut ainsi être exprimée ainsi :

$$h_{wind} = \frac{1.1 \rho_{air}}{\rho_w g s} C_{10} U_{10}^2 \ln \left( \frac{h_c + sF}{h_c} \right)$$

Alternativement, Tilburg et Garvine (2004) proposent la formule suivante :

$$h_{wind} = \frac{U_x F}{16300} \sqrt{\frac{U}{|U_x|}} - \frac{U_y U}{10^8 s} \ln \left( \frac{h_c + sF 10^3}{h_c} \right)$$

avec :

- $x$  axe orienté le long de la côte et  $y$  axe orienté vers le large ;
- $s$  (-) pente moyenne du plateau continental, typiquement  $10^{-3}$  (1:1000) ;
- $h_c$  (m) hauteur d'eau, considérée proche de la côte (typiquement 1 à 5 m) ;
- $U_x$  (km/h) composante du vent parallèle à la côte ;
- $U_y$  (km/h) composante du vent perpendiculaire à la côte ;
- $U$  (km/h) vitesse du vent ;
- $F$  (km) largeur du plateau continental depuis le talus (typiquement 100 m).

## Autres phénomènes

La **Figure 3** montre, en plus de la surcote dite atmosphérique, les l'élevation liées à l'interaction avec le littoral : le jet de rive\* et le *wave set-up\**, dont la signature dans les données marégraphiques est généralement faible, voire négligeable, étant donnée la localisation abritée des sites marégraphiques et le traitement effectué sur la donnée. (voir **fiche « Run-up »**).



# SURCOTES



Figure 3 - Facteurs constituant un niveau d'eau. Source Shom

## Moyen(s) d'acquisition

### Mesure

Les surcotes/décotes\* étant définies comme la différence entre le niveau marin observé et le niveau marin astronomique prédit, il faut que ces deux types de données soient dans un même système horaire et avec le même référencement vertical. Les données de niveau marin sont actuellement majoritairement enregistrées à l'aide de marégraphes, très souvent installés en zone portuaire des villes côtières (voir **fiche « Mesure du niveau marin »**).

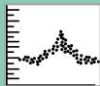
Le niveau marin astronomique est le résultat d'un calcul basé sur les connaissances du phénomène de marée\* : il peut être calculé, en un point donné, à partir de composantes harmoniques issues d'une analyse des données marégraphiques (la qualité de la prédiction dépend alors de la qualité de la donnée et de la longueur d'observation), ou issu d'un modèle calculant et propageant l'onde de marée depuis ses frontières ouvertes sur une plus grande emprise. Dans ce dernier cas, l'incertitude liée à la prédiction sera plus importante.

### *Surcotes / décotes instantanées\**

Lorsque les données d'observation et de marée astronomique sont dans un même référencement temporel et vertical, la différence entre ces deux données permet d'obtenir les surcotes / décotes instantanées. Selon les pas de temps disponibles elles peuvent être horaires ou données par exemple à 10 ou 6 minutes.

### *Surcotes / décotes de pleine mer\**

Lors du traitement du signal de mesure marégraphique, d'éventuels décalages temporels entre la prédiction et la mesure au moment de la pleine mer peuvent mener à des valeurs de surcotes / décotes instantanées peu représentatives du phénomène. Ce problème peut être résolu en considérant uniquement les niveaux prédits et observés de pleine mer (ou de basse mer), en autorisant un léger écart temporel (de l'ordre de +/- 1 h) entre ces deux grandeurs. La surcote / décote de pleine mer (ou de basse mer) est alors la différence entre le niveau maximum (ou minimum) observé et la marée haute (ou basse) astronomique, dans un même référencement vertical et pour une même pleine mer (ou basse mer). Ainsi, il n'y aura qu'une seule valeur par cycle de marée, cf. **Figure 1**.



## Modélisation

Les surcotes issues d'observations marégraphiques auxquelles sont retranchées les prédictions de marée sont des surcotes dites « observées », qui diffèrent, dans leur définition et construction, des surcotes dites « modélisées ».

La prévision d'une surcote par un modèle océanographique nécessite deux jeux de données : le premier signal est issu d'une simulation de marée pure par le modèle, et le second est obtenu dans la même configuration que le premier mais en prenant en compte les forçages météorologiques (pression, vent, voire d'autres effets thermo-bariques pour les modèles 3D) et éventuellement les forçages par les états de mer. La différence entre les deux jeux de données fournit la surcote modélisée.

Dans le cas où une modélisation ne fournit que le jeu de données issu d'une simulation combinant les forçages astronomique et atmosphérique, il est possible de réaliser une analyse harmonique du niveau marin total ainsi modélisé. La part harmonique correspond à la marée astronomique tandis que le résidu non-harmonique correspond à la surcote / décote météorologique.

La validation de ces simulations par les observations marégraphiques reste vivement recommandée.

## Traitements nécessaires

### Vérification du même référencement vertical

Les données de prédiction de marée et d'observations utilisées pour l'estimation de surcotes doivent être dans le même référencement vertical.

En France, les données marégraphiques mises à disposition par le Shom sont référencées par rapport au zéro hydrographique (ZH), un niveau proche du niveau des plus basses mers astronomiques. Ce ZH ne correspond pas au zéro des altitudes terrestres, déterminé par l'IGN. Dans son ouvrage sur les Références Altimétriques Maritimes (RAM), le Shom publie les côtes du ZH dans les systèmes de référence altimétriques légaux (IGN) pour de nombreux ports (voir *fiche « Références verticales »*).

### Vérification du même système horaire

En plus du référencement vertical, les données doivent être dans le même système horaire, afin de ne pas induire un déphasage temporel qui pourrait introduire des erreurs de hauteurs

## Incertitudes et limites

### Incertitudes surtout dans le passé

La qualité du calcul des surcotes dépend de la qualité des observations de niveaux disponibles et des prédictions de marée. Pour des événements passés, il n'existe pas forcément de données de mesures contemporaines de l'événement. Le recours à des jeux de composantes harmoniques non-contemporains de l'événement est nécessaire, cependant, suite à des modifications morphologiques d'origine naturelle et / ou anthropiques, ces composantes peuvent ne plus représenter les caractéristiques de la marée de l'époque. Cette étape peut induire des incertitudes lors du calcul de surcotes. (voir *fiche « Prédiction de marée »*)



# SURCOTES

Les niveaux marins reconstruits à partir de sources historiques écrites peuvent être sujets à des incertitudes (précision de la mesure, unités de mesure, référencement vertical, localisation et datation) qui se répercutent lors de l'estimation des surcotes (Athimon *et al.*, 2022) (voir *fiche « Sources historiques écrites »*).

## Surcote modélisée

L'incertitude de la surcote modélisée aura de multiples composantes :

- l'incertitude du forçage météorologique (qualité du modèle météorologique, choix du réseau de prévision ou d'analyse, emprise de forçage...),
- l'incertitude liée aux hypothèses du modèle : équations résolues, schémas numériques, discrétisations spatio-temporelles, paramétrisations physiques multiples, incertitudes liées aux conditions limites,
- l'incertitude de la surcote observée qui sert de référence.

L'observation contient quant à elle l'ensemble de la dynamique captée au marégraphe ; les processus inclus dans les surcotes modélisées et observées peuvent ainsi différer et engendrer des différences notables entre les deux variables.

Si la surcote observée reste la valeur de référence, il est à noter que la qualité de la prédiction utilisée pour la calculer affecte significativement le résultat, notamment par effet de déphasage ; une surcote observée peut ainsi être « améliorée » après ré-analyse ou correction de la prédiction. Cette source d'erreur ne concerne pas la surcote modélisée, dont le calcul repose sur des jeux de données de hauteurs d'eau dont le calcul de la marée doit être strictement identique. Une prédiction peu précise pourra ainsi engendrer des oscillations de plusieurs dizaines de centimètres sur la surcote observée, oscillations non visibles dans la surcote modélisée.

## Organisme(s) clés / en jeu

Service hydrographique et océanographique de la marine (Shom)\*

## Sources, vecteurs de diffusion/de porter à connaissance

Shom – REFMAR : <http://refmar.shom.fr/> et <https://data.shom.fr/>

<https://marc.ifremer.fr/resultats/niveaux>





## Références clés

Athimon, E., Giloy, N., Sauzeau, T., Andreevsky, M., & Frau, R. (2022). Quantification of Historical Skew Surges: Challenges and Methods. In P. Gourbesville & G. Caignaert (Éds.), *Advances in Hydroinformatics* (p. 159-174). Springer Nature. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-1600-7\\_10](https://doi.org/10.1007/978-981-19-1600-7_10)

Kohno, N., Kamakura, K., Minematsu, H., Yorioka, Y., Hisashige, K., Shimizu, E., Sato, Y., Fukunaga, A., Taniwaki, Y., & Tanijo, S. (2007). *The Mechanism of the Storm Surges in the Seto Inland Sea Caused by Typhoon Chaba (0416)*. 18.

Ponte, R. M. (2006). Low-Frequency Sea Level Variability and the Inverted Barometer Effect. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 23(4), 619-629. <https://doi.org/10.1175/JTECH1864.1>

Rego, J. L., & Li, C. (2010). Nonlinear terms in storm surge predictions: Effect of tide and shelf geometry with case study from Hurricane Rita. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C6). <https://doi.org/10.1029/2009JC005285>

Tilburg, C.E., & Irvine, R.W. (2004). "A simple model for sea level prediction." *Weather and Forecasting*, vol. 19, American Meteorological Society, USA, pp. 511-519.

US Army Corps of Engineers. (2006). *Performance evaluation of the New Orleans and southeast Louisiana hurricane protection system: Draft final report of the Interagency Performance Evaluation Task Force: Volume I - executive summary and overview - Technical Reports - USACE Digital Library*. <https://usace.contentdm.oclc.org/digital/collection/p266001coll1/id/2844/>

Woodworth, P. L., Melet, A., Marcos, M., Ray, R. D., Wöppelmann, G., Sasaki, Y. N., Cirano, M., Hibbert, A., Huthnance, J. M., Monserrat, S., & Merrifield, M. A. (2019). Forcing Factors Affecting Sea Level Changes at the Coast. *Surveys in Geophysics*, 40(6), 1351-1397. <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09531-1>

Wöppelmann, G., Testut, L., & Créach, R. (2011). La montée du niveau des océans par marégraphie et géodésie spatiale: contributions françaises à une problématique mondiale. *Annales Hydrographiques 6ème Série*, 8(777), 11-14.

Wunsch, C., & Stammer, D. (1997). Atmospheric loading and the oceanic "inverted barometer" effect. *Reviews of Geophysics*, 35(1), 79-107. <https://doi.org/10.1029/96RG03037>

## Fiches en lien

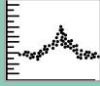
**Fiche « Prédications de marée »**

**Fiche « Mesure du niveau marin »**

**Fiche « Sources historiques écrites »**

**Fiche « Références Verticales »**

**Fiche « Run-up »**



# SURCOTES

