



## Tolosa : un nouveau modèle à volumes finis pour la prévision des submersions marines

Roman LE BELLEGUIC<sup>1</sup>, Maya CIAVALDINI<sup>1</sup>, Audrey PASQUET<sup>1</sup>,  
Héloïse MICHAUD<sup>1</sup>, Fabien BROSSE<sup>1</sup>, Rémy BARAILLE<sup>1</sup>, Yann KRIEN<sup>2</sup>

1. Shom, 42 Avenue Gaspard Coriolis, 31100 Toulouse, France

*roman.le.belleguic@shom.fr ; maya.ciavaldini@shom.fr ; audrey.pasquet@shom.fr ;  
heloise.michaud@shom.fr ; fabien.brosse@shom.fr ; remy.baraille@shom.fr*

2. Université de Toulouse, LEGOS (CNES/CNRS/IRD/UT3), 31400 Toulouse

*yann.krien@univ-tlse3.fr*

### Résumé :

Une représentation fine de la géométrie complexe des zones côtières dans les modèles numériques est primordiale pour reproduire les processus physiques à l'origine des submersions marines. Ces dernières années, l'utilisation de maillages non-structurés a permis de mieux reproduire les processus à petite échelle comme à plus grande échelle tels que les marées ou les ondes de tempêtes, tout en conservant des coûts de calcul limités. Bien qu'ils constituent une avancée majeure, ces modèles souffrent encore de défauts, tels que de fortes contraintes de stabilité, ou une dissipation excessive des courtes longueurs d'onde. Le projet Tolosa vise à construire une boîte à outils multi-modèles plus adaptés à la prévision des submersions marines opérationnelle. Le modèle à volume finis Tolosa-sw, qui résout les équations non-linéaires shallow water sur des maillages non-structurés, utilise un schéma de premier ordre dit « bas Froude » original. Celui-ci permet, de par sa faible dissipation d'énergie aux hautes fréquences et un faible coût de calcul, une représentation robuste et efficace des écoulements océaniques à grande échelle. Dans le cadre du projet HOMONIM une configuration de Tolosa-sw couvrant les côtes atlantiques françaises, a été développée afin de simuler les niveaux d'eau et les courants. Elle remplacera en 2024 le modèle HyCOM dans le système national de Vigilance Vagues Submersions (VVS) opéré par Météo-France. Le modèle de marée a été significativement amélioré, en amplitude comme en phase, et à l'échelle de la façade Atlantique française, tout comme les ondes de tempête historiques, mieux reproduites à la fois pour des périodes longues hivernales et pour les événements extrêmes, sauf dans les zones où la composante de wave-setup ne peut pas être négligée. D'autres développements et applications sont attendus comme la version couplée de Tolosa-sw avec le modèle spectral de vagues WaveWatch III (WW3) pour affiner les prévisions opérationnelles et mieux répondre aux besoins en lien avec la gestion des risques de submersion marine, mais également la version non-hydrostatique, Tolosa-lct, qui promet des avancées significatives dans le domaine de la prévision opérationnelle des inondations, jusqu'à l'impact à terre et sur de longs linéaires côtiers.

## Thème 6 – Risques côtiers

### Mots-clés :

Modélisation numérique, Tolosa, Équations shallow water, Prévision, Submersions marines, Marée, Surcotes, Vagues.

### 1. Introduction

Le projet HOMONIM (Historique, Observation, Modélisation des Niveaux Marins) est un projet commun mené par le Shom (Service hydrographique et océanographique de la Marine) et Météo-France sous maîtrise d'œuvre de la Direction Générale des Prévention des Risques, qui s'inscrit dans le plan interministériel Submersions Rapides et participe à l'action de l'État. Il vise à améliorer la VVS, opérée par Météo-France, par l'amélioration des systèmes d'observation et de prévision des niveaux d'eau et des vagues. Les précédentes phases du projet ont permis de mettre en place dans le dispositif national de prévision le modèle de surcote HyCOM en version barotrope (BARAILLE & FILATOFF, 1995 ; PASQUET *et al.*, 2013, 2015 ; PASQUET, 2016), qui a permis d'atteindre une résolution kilométrique à la côte avec des temps de calcul opérationnels. L'enjeu de la troisième phase est d'améliorer la physique des modèles opérationnels à proximité de la côte. En raison des limites du modèle actuel HyCOM à s'adapter aux grilles non-structurées et mieux représenter la complexité des processus hydrodynamiques côtiers, tout en simplifiant les chaînes de production et en réduisant le temps de calcul, un nouveau modèle a été développé, Tolosa-sw.

Le schéma numérique, les méthodes garantissant la stabilité du schéma et d'estimation de la dissipation théorique de l'énergie sont décrits dans une première partie. La future configuration opérationnelle VVS utilisant Tolosa-sw pour représenter la marée et les surcotes sur la façade Atlantique métropolitaine est décrite dans une seconde partie. Les résultats de cette nouvelle capacité de prévision sont ensuite présentés. Enfin, les développements en cours et leurs applications attendues sont discutés en perspectives.

### 2. Tolosa

#### 2.1 Présentation du projet

Tolosa (TOols Library for unstructured, Ocean models and Surge Applications, <https://tolosa-project.com/>) est un projet de R&D visant à développer des outils de modélisation des écoulements à surface libre, open source, particulièrement adaptés à la prévision de la submersion marine et des vagues, notamment par l'utilisation d'un nouveau modèle de type Boussinesq innovant (COUDERC *et al.*, 2017). C'est le nom générique de nombreux modèles comme : Tolosa-lct le modèle non-hydrostatique moyenné sur la verticale, Tolosa-sw le modèle shallow water, ou Tolosa-swa son modèle asynchrone. Développés selon les dernières normes de Fortran 2008 et de programmation orientée objet, ces modèles s'appuient sur la librairie Tolosa-lib permettant la résolution

de maillages non-structurés, dans des environnements parallèles. Tolosa est essentiellement développé à l’Institut de Mathématiques de Toulouse (IMT) mais les études théoriques, les développements numériques et la validation sont assurés par une communauté de chercheurs, d’ingénieurs, de doctorants et post-doctorants faisant partie de plusieurs organismes : le Shom, l’IMT, l’INRAE (Institut National de Recherche pour l’Agriculture, l’Alimentation et l’Environnement), les universités de Lyon, Chambéry, Montpellier, et des entreprises privées comme Abstrao. Le développement est en partie financé par la Direction Générale de l’Armement sous forme de contrats de recherche et de marchés publics.

## 2.2 Tolosa shallow water

### 2.2.1 *Modèle*

Tolosa-sw résout les équations shallow water non-linéaires, ou équations de Saint-Venant, et permet une modélisation opérationnelle des niveaux d’eau à l’échelle d’une façade (Manche-Atlantique ou Méditerranée par exemple), avec une résolution de l’ordre de la centaine de mètres à la côte grâce aux grilles non-structurées.

Ce modèle hérite des schémas numériques peu dissipatifs, stables et performants de type bas Froude (DURAN *et al.*, 2017 ; DURAN *et al.*, 2020), déjà implémentés dans HyCOM. Ces schémas permettent un contrôle explicite de la dissipation ajoutée dans les équations de conservation de la masse et quantité de mouvement :

$$\begin{cases} \partial_t h + \partial_x(h\tilde{u}_h) = 0 \\ \partial_t(hu) + \partial_x(hu\tilde{u}_q) + \frac{g}{2}\partial_x(h^2) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

où :  $\tilde{u}_h = u - \gamma g \partial_x h$  et  $\tilde{u}_q = u - \gamma g \partial_x h$ .

Les paramètres de dissipation ( $\gamma, \alpha$ ), garantissent la stabilité du schéma par un contrôle explicite de la dissipation d’énergie totale. La stabilité des schémas, ainsi que leur dissipation minimale, sont assurées grâce à plusieurs outils d’analyse de stabilité linéaire (présentés ici), non linéaire, et à l’étude des équations équivalentes réellement résolues par notre schéma.

### 2.2.2 *Outils d’analyse de stabilité linéaire appliqués au schéma Bas Froude*

En 1D, le schéma Bas Froude s’écrit :

## Thème 6 – Risques côtiers

$$\left\{ \begin{array}{l} h_i^{n+1} = h_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (\mathcal{F}_{i+\frac{1}{2}}^n - \mathcal{F}_{i-\frac{1}{2}}^n) \\ (hu)_i^{n+1} = (hu)_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (G_{i+\frac{1}{2}}^n - G_{i-\frac{1}{2}}^n) - \frac{\Delta t}{\Delta x} h_i^n (\Phi_{i+\frac{1}{2}}^{n,*} - \Phi_{i-\frac{1}{2}}^{n,*}) \end{array} \right. \quad (2)$$

$$\text{avec } \left\{ \begin{array}{l} \mathcal{F}_{i+\frac{1}{2}}^n = \frac{1}{2} ((hu)_{i+1}^n + (hu)_i^n) - \frac{\gamma \Delta t}{2 \Delta x} g (h_i^n + h_{i+1}^n) (ssh_{i+1}^n - ssh_i^n) \\ G_{i+\frac{1}{2}}^n = u_i^n (\mathcal{F})_{i+\frac{1}{2}}^{n,+} + u_{i+1}^n (\mathcal{F})_{i+\frac{1}{2}}^{n,-} \\ \Phi_{i+\frac{1}{2}}^{n,*} = \frac{1}{2} g (ssh_{i+1}^n + ssh_i^n) - 2\alpha \frac{\Delta t}{\Delta x} g ((hu)_{i+1}^n - (hu)_i^n) \end{array} \right. \quad (3)$$

où  $(\gamma, \alpha)$  sont les paramètres de dissipation, et  $(\mathcal{F})_{i+\frac{1}{2}}^{n,+}$  et  $(\mathcal{F})_{i+\frac{1}{2}}^{n,-}$  sont les parties positives et négatives du flux  $\mathcal{F}_{i+\frac{1}{2}}^n$  respectivement.

Pour l'étude de stabilité linéaire, le schéma est linéarisé autour du repos  $(h, u) = (\bar{h}, \bar{u} = 0)$  sans topographie. Pour une solution de la forme  $h_j^n = H^n e^{ijk\Delta x}$ ,  $u_j^n = U^n e^{ijk\Delta x}$  avec  $H$  et  $U$  facteurs d'amplification dans le domaine de Fourier en définissant  $X^n = \begin{pmatrix} H^n \\ Q^n \end{pmatrix}$  avec  $Q^n = (HU)^n$ , le système linéarisé s'écrit sous la forme  $X^{n+1} = AX^n$ .

Les deux méthodes décrites ci-après assurent des conditions à la fois nécessaires et suffisantes de stabilité, contrairement aux conditions de Von Neumann, seulement nécessaires.

- Définition d'une norme énergie :

L'énergie linéarisée est définie par  $e = \frac{1}{2} gh^2 + \frac{1}{2H} q^2$ . Soit, au temps  $n + 1$  :

$$e^{n+1} = \langle X^{n+1}, EX^{n+1} \rangle \quad (4)$$

où : la matrice  $E = \begin{bmatrix} \frac{g}{2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{2H} \end{bmatrix}$  est bien symétrique définie positive et permet de définir le produit scalaire énergie  $\langle x, y \rangle_E = \langle x, Ey \rangle_2$ .

La stabilité du schéma est garantie si  $e^{n+1} - e^n \leq 0$ , soit si  $\langle X^{n+1}, EX^{n+1} \rangle - \langle X^n, EX^n \rangle \leq 0$ . Cela revient à étudier le spectre de  $C^*C$  où  $C = E^{\frac{1}{2}}AE^{-\frac{1}{2}}$ , et  $B^*$  est la matrice adjointe de  $B$ . Le schéma est donc stable si et seulement si  $\rho(C^*C) \leq 1$ . Cette condition est une condition nécessaire et suffisante de stabilité.

- Déterminant de Gram :

Les conditions de Von Neumann deviennent nécessaires et suffisantes si le déterminant de Gram  $\Delta^2$  des vecteurs propres normalisés de  $A$  est tel que  $\Delta \geq \delta > 0$ . Il suffit donc d'étudier le spectre de  $A$ .

$$X_i^{n+1} = AX_i^n = [I_d - ir_x \sin(k_x \Delta x)B - 2\gamma r_x^2 (1 - \cos(k_x \Delta x))B^2] X_i^n \quad (5)$$

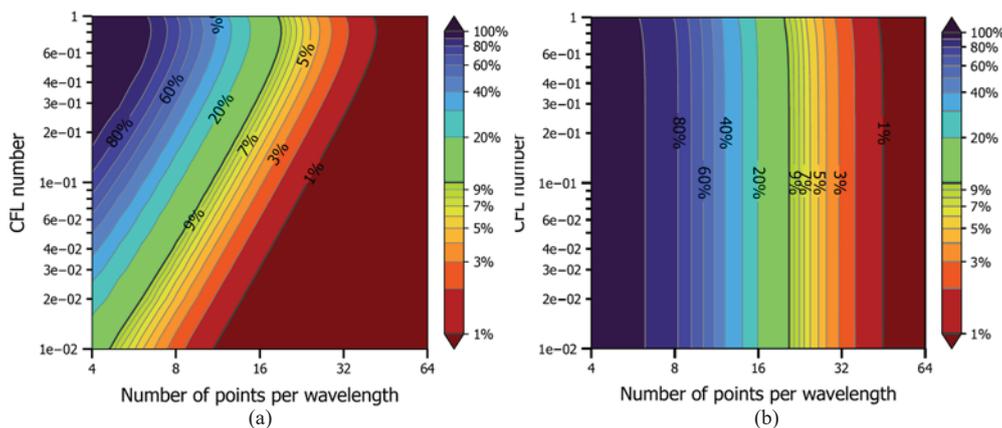
où :  $B = \begin{bmatrix} 0 & H \\ g & 0 \end{bmatrix}$  et  $r_x = \frac{\Delta t}{\Delta x}$ .

$A$  et  $B$  ont les mêmes vecteurs propres, et le déterminant de Gram des vecteurs propres est indépendant de  $k_x$  et de  $r_x$  ; ici, il vérifie bien  $\Delta \geq \delta > 0$ . Les conditions de Von

Neumann sont respectées si les valeurs propres de A vérifient  $|\sigma|^2 \leq 1$ , soit si  $\gamma \in \left[\frac{1}{2}; \frac{1}{2CFL^2}\right]$  et  $CFL^2 = r_x^2 \lambda^2 \leq 1$ , où  $\lambda$  est valeur propre de B.

### 2.2.3 Dissipation théorique du schéma Bas Froude

Les taux de dissipation du schéma Bas Froude (Figure 1.a) montrent que ce schéma est performant pour le calcul de flux non-linéaires aux régimes typiques de nos applications (CFL entre 0.05 et 0.8 avec minimum 10 points par longueur d'onde). Au bout de 10 périodes, avec 16 points par longueur d'onde, le schéma Bas Froude a un faible taux de dissipation d'énergie (inférieure à 10%) comparé à un schéma de référence de Rusanov du second ordre en temps et en espace qui, pour un même nombre de points par longueur d'onde, a une dissipation d'énergie supérieure à 20% pour toute CFL. Ce schéma bas Froude explicite du premier ordre utilisé dans Tolosa-sw présente un comportement énergétique d'un schéma du second ordre, ce qui le rend particulièrement efficace et peu coûteux.



*Figure 1. Dissipation d'énergie du schéma Bas Froude du 1er ordre en 1D pour  $\gamma = 2\alpha = 0.5$  (a), et du schéma de Rusanov du 2nd ordre (RK2, MUSCL) (b) dans le cas d'une onde au bout de 10 périodes, en faisant varier le nombre de points par longueur d'onde (en abscisses) ainsi que la CFL (en ordonnées).*

## 3. Modélisation des submersions marines à l'échelle de la façade

### 3.1 Description de la nouvelle configuration ATL

La nouvelle configuration Manche Atlantique métropolitaine (ATL) de prévision des surcotes utilisant le modèle Tolosa-sw, couvre une emprise allant de -9 à 10°E en longitude et de 43 à 61°N en latitude et possède un maillage non-structuré qui varie spatialement de 100 à 200 m sur la façade métropolitaine (soit 4 à 5 fois plus raffiné que l'existant) et jusqu'à 10 à 20 km au large (Figure 2). La bathymétrie est issue du MNT à 100 m (BISCARA, 2015). Le modèle est forcé aux frontières ouvertes avec les niveaux d'eau issus du modèle global de marée FES2014b (potentiel de marée inclus) qui dispose

## Thème 6 – Risques côtiers

de 24 harmoniques de marée et assimile des données d'altimétrie spatiale (LYARD *et al.*, 2021). L'effet de baromètre inverse est calculé non plus en fonction d'une pression de référence globale constante à 1013.25 hPa comme c'est usuellement le cas, mais selon une pression de référence spatialement variable, obtenue en moyennant la pression atmosphérique issue de la climatologie réanalysée ERA5 sur la période 2010-2019. Elle permet de prendre en compte une pression de référence représentative des caractéristiques météorologiques récentes et spatialement distribuées. La friction de fond est semi-quadratique, temporellement et spatialement variable, calculée à partir d'une carte de longueur de rugosité obtenue par la méthode d'optimisation stochastique déjà utilisée dans les configurations HyCOM opérationnelles (BOUTET, 2015 ; KRIEN *et al.*, 2023), en utilisant les prédictions de marée du réseau marégraphique REFMAR (Réseaux de RÉFérence des observations MARégraphiques).

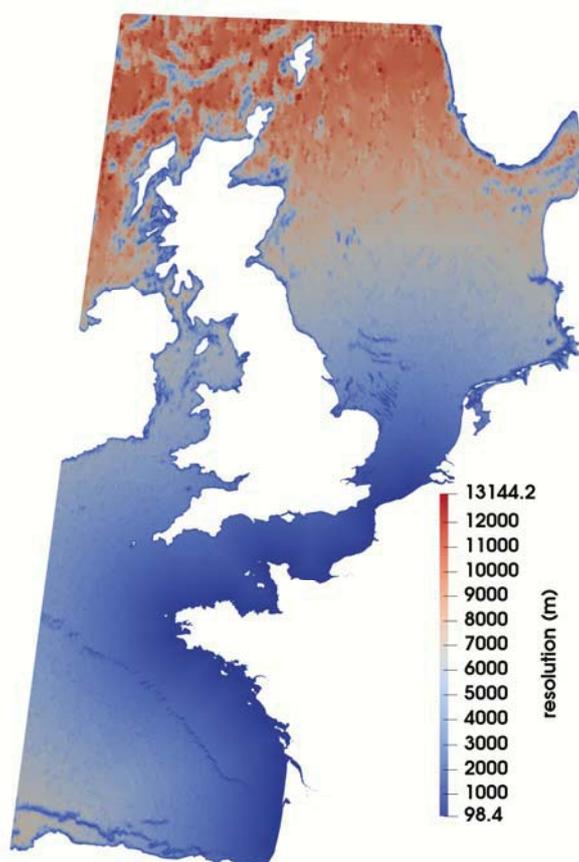


Figure 2. Résolution de la configuration Manche Atlantique Métropolitaine (ATL).

### 3.2 Tests paramétriques et méthodes d'évaluation

La calibration de la configuration Tolosa-sw ATL pour la représentation de la marée a nécessité des tests de sensibilité au lissage bathymétrique, à la qualité des forçages aux frontières ouvertes, et à la paramétrisation de la friction de fond, dont les précédentes

phases du projet ont montré l'influence significative sur les niveaux d'eau en Atlantique. Une méthode stochastique, coûteuse, a ainsi été utilisée afin de définir ce paramètre. Elle consiste à estimer le gradient d'une fonction coût à l'aide d'un nombre limité de calculs, obtenus en perturbant simultanément et de manière stochastique toutes les variables à tester (SPALL, 1992). Dans notre cas, la perturbation est appliquée à une longueur de rugosité, tandis que les erreurs quadratiques moyennes donnent une performance globale du modèle de marée, et peuvent être évaluées soit par rapport aux constantes harmoniques calculées par le Shom (erreur complexe, définie par le module de la différence de signaux complexes de marée observé et modélisé ; ANDERSEN *et al.*, 1995), soit par rapport aux prédictions de marée sur un an (statistique usuelle).

La calibration du modèle de surcote a été réalisée en paramétrant la tension de vent en surface et les performances ont été évaluées via les indicateurs statistiques usuels (biais, écart quadratique moyen, écart-type, erreur et déphasage au pic) sur des périodes prédéfinies autour des pics de surcote de dix-sept tempêtes historiques entre 1998 et 2019, ainsi que sur une simulation d'un an et sur l'hiver 2013-2014 (caractérisé par de nombreuses tempêtes). Les forçages météorologiques sont fournis par Météo-France et proviennent selon les périodes des modèles atmosphériques ARPEGE (0.1° à 1h et 0.25° à 3h pour les périodes avant 2009), ALADIN ou AROME (0.1° à 1h). Les surcotes observées sont la différence des hauteurs d'eau observées, validées en temps différé à 10 min, et des prédictions de marée du Shom aux stations RONIM (Réseau d'Observation du Niveau de la Mer).

### 3.3 Résultats

Le nouveau modèle de marée a réduit les erreurs complexes, d'un facteur 2,5 en moyenne par rapport à l'existant HyCOM ATL, avec une amélioration significative des indicateurs en Manche. Les déphasages à marée haute sont meilleurs avec Tolosa de 12 min en moyenne (correction de 5 min par rapport à HyCOM) et les biais de pleine mer absolus sont de 9 cm en moyenne (1 cm mieux que sur la majorité des stations RONIM). La prise en compte d'une pression atmosphérique moyenne spatialement variable apporte une correction des biais moyens de 2 à 5 cm. Une paramétrisation numérique de la tension de vent en surface de Charnock a été retenue (comme HyCOM ATL), avec un coefficient de 0.028 permettant de corriger l'erreur moyenne au pic de surcote dans les cas de faible wave setup ; il a été décidé de ne pas compenser l'erreur due au wave setup (non représenté dans le modèle) par une tension de vent en surface plus forte, et d'en laisser l'expertise au prévisionniste de Météo-France. Les scores moyens de surcote (Tableau 1) sont nettement améliorés, Tolosa-sw est plus exact et précis que HyCOM ; réduction de 5 à 10% des écarts-type et des erreurs quadratiques moyennes sur les rejeux courts et les rejeux longs. Le nouveau modèle a tout de même tendance à davantage sous-estimer les pics de surcotes et de hauteur d'eau totale. Une fonction coût tenant compte de la surcote, ainsi qu'une mise à jour des constantes harmoniques (avec une limitation de période de

## Thème 6 – Risques côtiers

la donnée sur les dix dernières années par exemple) lors du calcul des cartes de friction sont des pistes à envisager pour mieux équilibrer la dissipation dans le modèle. Tolosa-sw ATL représente aussi bien voire mieux la marée et la surcote sur les onze épisodes de tempêtes, la période d'un an, et l'hiver 2013-2014 que HyCOM ATL avec un temps de calcul seulement 2 fois supérieur pour un maillage 5 à 10 fois plus résolu. Cette configuration a été intégrée à une chaîne pré-opérationnelle depuis l'hiver 2022-2023, afin que les prévisionnistes de Météo-France l'évaluent et se l'approprient. Les retours ont confirmé les améliorations significatives sur le comportement et le réalisme du modèle, dont une correction jusqu'à 5 cm des biais systématiques, l'amélioration de la gestion des bancs découvrants par une reconstruction locale hydrostatique (AUDUSSE *et al.*, 2004) a permis une moindre variabilité du modèle (par rapport à HyCOM). La bascule opérationnelle est prévue courant 2024.

Tableau 1. Comparaison des scores statistiques moyens de surcote de la configuration HyCOM et Tolosa-sw ATL.

| <b>Indicateurs</b>                  | <b>HyCOM ATL</b> | <b>Tolosa-sw ATL</b> |
|-------------------------------------|------------------|----------------------|
| <b>Rejeux courts</b>                |                  |                      |
| <i>BIAIS (cm)</i>                   | -2.1             | -2.0                 |
| <i>BIASB (cm)</i>                   | 13.8             | 13.1                 |
| <i>EQM (cm)</i>                     | 16.2             | 15.4                 |
| <i>ECT (cm)</i>                     | 11.4             | 10.3                 |
| <i>ERRMAX (cm)</i>                  | 32.3             | 30.8                 |
| <i>ERRPIC (cm)</i>                  | -7.9             | -9.4                 |
| <i>DEPHASPIC (min)</i>              | 33.6             | 31.9                 |
| <i>ERRPIC_s (cm)</i>                | 16.9             | 17.3                 |
| <i>DEPHASPIC_s (min)</i>            | 35.7             | 32.9                 |
| <i>ERRPIC_h (cm)</i>                | -1.7             | -3.6                 |
| <i>DEPHASPIC_h (min)</i>            | 12.1             | 12.0                 |
| <b>Rejeu long (hiver 2013-2014)</b> |                  |                      |
| <i>BIAIS (cm)</i>                   | -3.6             | -1.5                 |
| <i>BIASB (cm)</i>                   | 8.1              | 7.6                  |
| <i>EQM (cm)</i>                     | 10.0             | 9.5                  |
| <i>ECT (cm)</i>                     | 8.0              | 8.1                  |

### 4. Perspectives d'applications

Une source d'erreur importante sur le phasage et l'amplitude des pics de surcote provient de la non prise en compte du wave setup, induit par le déferlement des vagues. Le couplage à quelques dizaines de mètres de résolution entre les modèles de vagues et de niveaux/courants, via le coupleur OASIS, sur les côtes de la Nouvelle Aquitaine, est

attendu en 2025. Tolosa-sw sera alors couplé avec la dernière version implicite du modèle spectral de propagation d'états de mer WW3 qui présente des améliorations sur la dynamique littorale (wave setup, gestion des bancs découvrant, réflexion à la côte ou encore le déferlement) à des coûts de calcul réduits d'un facteur 5 à 10. L'enjeu à l'échelle d'une façade est d'évaluer l'apport, la faisabilité et éventuellement d'étudier, dans un contexte d'une gestion intégrée des zones côtières, un tel couplage pour des systèmes d'alerte locaux. Les capacités de prévision opérationnelle actuelles, reposant sur des modèles spectraux et hydrostatiques, ne permettent pas d'aller jusqu'à la prévision de l'inondation à proprement parler; ils donnent une description des transformations de l'énergie spectrales des vagues mais ne résolvent pas explicitement la surface libre. Tolosa-lct est un modèle non-hydrostatique moyenné sur la verticale à phase résolue qui a été développé dans ce but ; il permet de modéliser de façon explicite les processus hydrodynamiques littoraux comme le déferlement, le run-up, les interactions vagues à vagues ou vagues-structures par exemple, tout en présentant des coûts de calcul particulièrement bas, estimés par construction à seulement 5 fois le coût du Tolosa-sw. Il présente l'avantage de dégénérer d'une physique à l'autre lorsque les effets non-hydrostatiques sont négligeables. Les tests de validation se poursuivent sur des cas académiques et mèneront aux inter-comparaisons des performances entre plusieurs modèles à phases résolues. Afin de s'adapter aux contraintes opérationnelles, tout en bénéficiant de la montée en résolution et en réalisme qu'apportent les modèles Tolosa, d'autres développements sont en cours : migration sous GPU, calculs asynchrones permettant de tirer parti de pas de temps locaux afin d'optimiser les coûts d'une approche multi-modèles. Les caractéristiques physiques et mathématiques des modèles Tolosa en font un outil optimal de prévision du large jusqu'à l'impact à terre, tant pour les systèmes de vigilance actuels que pour les études d'impacts des submersions dans le cadre du changement climatique. Les travaux en cours s'intègrent dans un programme de développement dual, et répondront à la fois aux besoins de la Défense (systèmes de pré-alerte aux états de mer et aux submersions sur les emprises sensibles, impacts futurs sur les infrastructures), et aux problématiques d'aménagement et de défense des zones littorales face au risque d'inondation (systèmes de vigilance locaux et national, études d'aménagements, etc.).

## 5. Références bibliographiques

- ANDERSEN O.B., WOODWORTH P.L., FLATHER R.A. (1995). *Intercomparison of recent ocean tide models*. Journal Geophysical Research, Vol. 100, pp 282-282.  
<https://doi.org/10.1137/S1064827503431090>
- AUDUSSE E., BOUCHUT F., BRISTEAU M., KLEIN R., PERTHAME B. (2004). *A Fast and Stable Well-Balanced Scheme with Hydrostatic Reconstruction for Shallow Water Flows*. SIAM Journal on Scientific Computing, Vol. 25, no 6, pp 2050-2065.  
<https://doi.org/10.1137/S1064827503431090>

## Thème 6 – Risques côtiers

- BARAILLE R., FILATOFF N. (1995). *Modèle shallow-water multicouches isopycnal de Miami*. Rapport technique. Shom.
- BISCARA L. (2015). *MNT bathymétrie de façade Atlantique (Projet Homonim)*. [http://doi.org/10.17183/MNT\\_ATL100m\\_HOMONIM\\_WGS84](http://doi.org/10.17183/MNT_ATL100m_HOMONIM_WGS84)
- BOUTET M. (2015). *Estimation du frottement sur le fond pour la modélisation de la marée barotrope*. Thèse Université de Bretagne Occidentale, Brest. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1105.0488>
- COUDERC F., DURAN A., VILA J.P. (2017). *An explicit asymptotic preserving low Froude scheme for the multilayer shallow water model with density stratification*. Journal of Computational Physics, Vol. 343, pp 235–270. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2017.04.018>
- DURAN A., VILA J.P., BARAILLE R. (2017). *Semi-implicit staggered mesh scheme for the multi-layer Shallow Water system*. Comptes Rendus Mathématique, Vol. 355, pp 1298–1306. <https://doi.org/10.1016/j.crma.2017.09.011>
- DURAN A., VILA J.P., BARAILLE R. (2020). *Energy-stable staggered schemes for the shallow water equations*. Journal of Computational Physics, Vol. 401, no 109051. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2019.109051>
- KRIEN Y., PASQUET A, LE BELLEGUIC R., CIAVALDINI M., JOURDAN D. (2023). *HOMONIM – Phase III – Système de prévision des surcotes – Configuration Tolosa ATL*. Rapport technique. Shom.
- LYARD F.H., ALLAIN D.J., CANCEY M., CARRERE L., PICOT N. (2021). *FES2014 global ocean tide atlas: design and performance*. Ocean Sci., Vol. 17, pp 615–649. <https://doi.org/10.5194/os-17-615-2021>
- PASQUET A., GOUILLON F., BARAILLE R., CORREARD S., JOURDAN D. (2013). *HOMONIM - Phase I Modélisation de la marée et de la surcote avec HyCOM (2D) Domaine Golfe de Gascogne, Manche, Mer du Nord (ATL)*. Rapport technique. SHOM.
- PASQUET A., BARAILLE R., JOURDAN D. (2015). *HOMONIM – Phase I – Version V3 du système de prévision des surcotes – Configurations ATL et MED*. Rapport technique. Shom.
- PASQUET A. (2016). *HOMONIM – Phase II – Version V4 du système de prévision des surcotes – Configuration ATL*. Rapport technique. Shom.
- SPALL J.C. (1992). *Multivariate stochastic approximation using a simultaneous perturbation gradient approximation*. IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 37, no 3, pp 332-341. <https://doi.org/10.1109/9.119632>