

# Journées REFMAR 2022

La prévision des risques de submersions marines au Shom: de la recherche aux applications opérationnelles

TOLOSA (<http://tolosa-project.com/>)  
Tools Library for unstructured Ocean models and Surge Applications

Didier Jourdan, Audrey Pasquet, Héloïse Michaud, Rémy Baraille, Yann Krien,  
Maya Ciavaldini, Fabien Brosse

# Introduction

## Historique : contexte Vigilance Vagues Submersion (VVS)

### Hycom2D – v1

- Mise en œuvre opérationnelle sur ATL et MED.
- Grille C arakawa, coordonnées curvilignes.

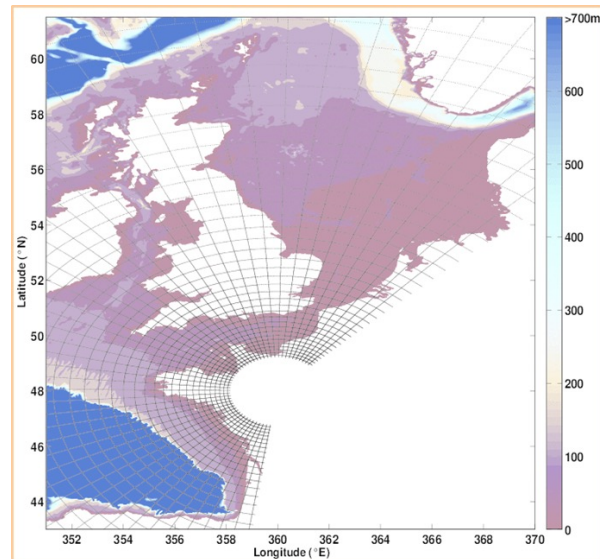
### Hycom2D – v2

- Schéma « **bas Froude** » semi-implicite.
- Amélioration scores de marée de l'ordre de **30%**.

Limitations  
maillage  
structuré

### Tolosa

- **Maillages non structurés**
- Technologie « **bas Froude** ».
- Garantie de maintien du niveau de performance.



*Hycom2D : maillage structuré.*

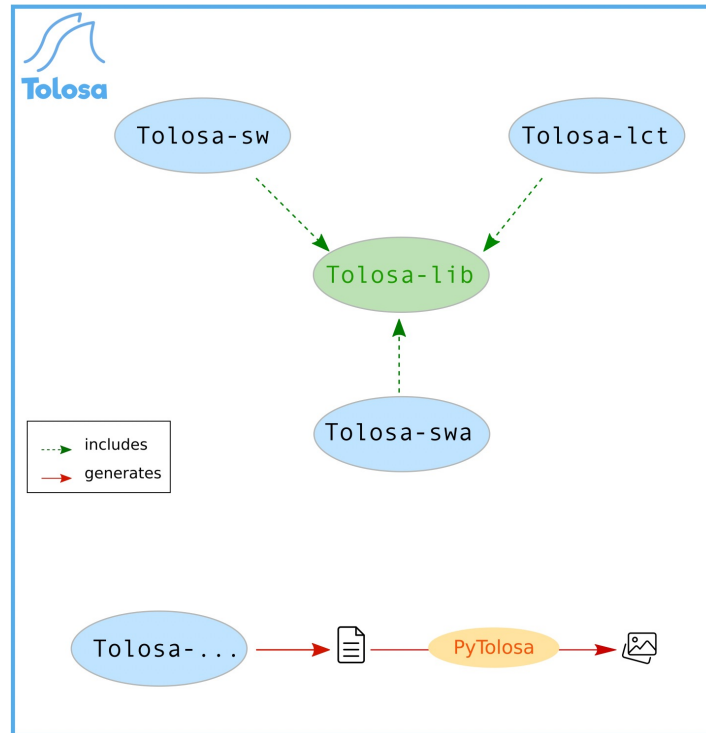
# Tolosa – Contexte

## Environnement de modélisation d'écoulement à surface libre

- Développement à l'Institut de Mathématiques de Toulouse, impliquant du personnel en poste permanent.
- Thésards et post/doctorants ayant participé aux développements théoriques à l'IMT sont désormais en poste et construisent des programmes de recherche avec Tolosa.
- Tolosa est le nom générique de nombreux modèles: **Tolosa-sw**, **Tolosa-swa**, **Tolosa-lct**,... qui s'appuient sur des éléments modulaires de la librairie **Tolosa-lib** (dernières normes de fortran, orientée objet). Environnement parallèle CPU MPI.
- Technologie « bas Froude » largement éprouvée sur des **maillages non structurés** et **grilles colocalisées** et exportables dans beaucoup de modèles (simplification des conditions aux limites).

## Environnement de modélisation d'écoulement à surface libre

- Développement à l'Institut de Mathématiques de Toulouse, impliquant du personnel en poste permanent.
- Thésards et post/doctorants ayant participé aux développements théoriques à l'IMT sont désormais en poste et construisent des programmes de recherche avec Tolosa.
- Tolosa est le nom générique de nombreux modèles: **Tolosa-sw**, **Tolosa-swa**, **Tolosa-lct**,... qui s'appuient sur des éléments modulaires de la librairie **Tolosa-lib** (dernières normes de fortran, orientée objet). Environnement parallèle CPU MPI.
- Technologie « bas Froude » largement éprouvée sur des **maillages non structurés** et **grilles colocalisées** et exportables dans beaucoup de modèles (simplification des conditions aux limites).



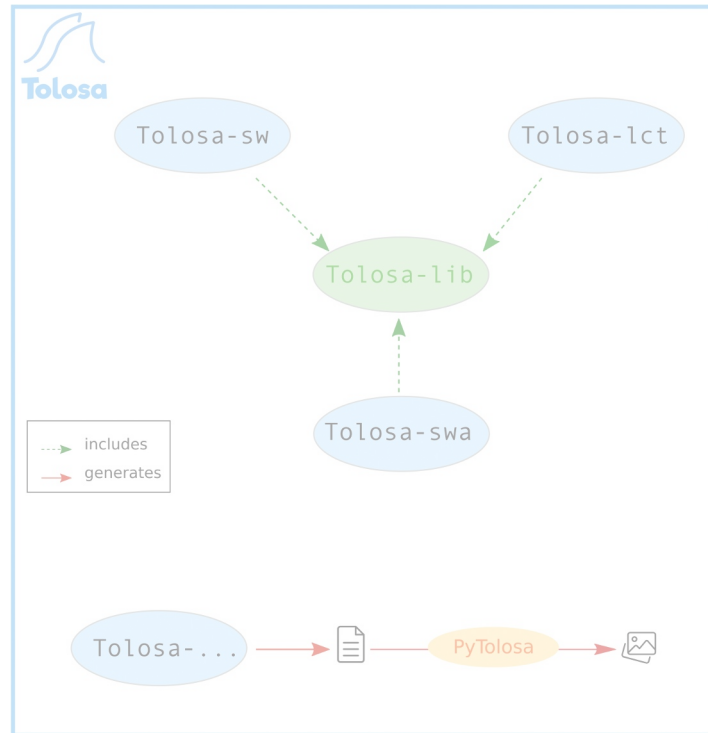
*Tolosa : modules*



# Tolosa – Contexte

## Environnement de modélisation d'écoulement à surface libre

- Développement à l'Institut de Mathématiques de Toulouse, impliquant du personnel en poste permanent.
- Thésards et post/doctorants ayant participé aux développements théoriques à l'IMT sont désormais en poste et construisent des programmes de recherche avec Tolosa.
- Tolosa est le nom générique de nombreux modèles: **Tolosa-sw**, **Tolosa-swa**, **Tolosa-lct**,... qui s'appuient sur des éléments modulaires de la librairie **Tolosa-lib** (dernières normes de fortran, orientée objet). Environnement parallèle CPU MPI.
- Technologie « bas Froude » largement éprouvée sur des **maillages non structurés** et **grilles colocalisées** et exportables dans beaucoup de modèles (simplification des conditions aux limites).



Tolosa : modules

# Tolosa-sw – Shallow Water – Schéma « bas Froude »

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial t} h + \frac{\partial(h\tilde{u})}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(uh\tilde{u})}{\partial x} + \frac{g}{2} \frac{\partial h^2}{\partial x} = 0 \end{array} \right. \quad \longrightarrow \quad \frac{\partial E_T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( (E_c + 2E_p)\tilde{u} \right) = 0$$

$\tilde{u} = u$

# Tolosa-sw – Shallow Water – Schéma « bas Froude »

- Contrôle explicite de la dissipation rajoutée dans les équations de conservation de masse et éventuellement dans la quantité de mouvement.
- Même idée que dans le système précédent basé sur Hycom (non régression).

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial t} h + \frac{\partial(h\tilde{u})}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(uh\tilde{u})}{\partial x} + \frac{g}{2} \frac{\partial h^2}{\partial x} = 0 \end{array} \right. \quad \longrightarrow \quad \frac{\partial E_T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( (E_c + 2E_p)\tilde{u} \right) \leq 0$$

$$\tilde{u} = u - \gamma g \frac{\partial h}{\partial x}$$

# Tolosa-sw – Shallow Water – Schéma « bas Froude »

- Version explicite sur grille colocalisée.
- Schéma du 1er ordre (temps, espace) avec comportements d'un schéma du second ordre.
- Efficacité informatique due à la simplicité de la méthode et l'optimisation de la bibliothèque.

# Tolosa-sw – Shallow Water – Schéma « bas Froude »

- Stabilité linéaire et non-linéaire : résultats garantissant la stabilité et « optimisation » des paramètres de dissipation ( $\gamma$ ,  $\alpha$ )
- 5 fois** moins coûteux que schéma Rusanov de 2nd ordre

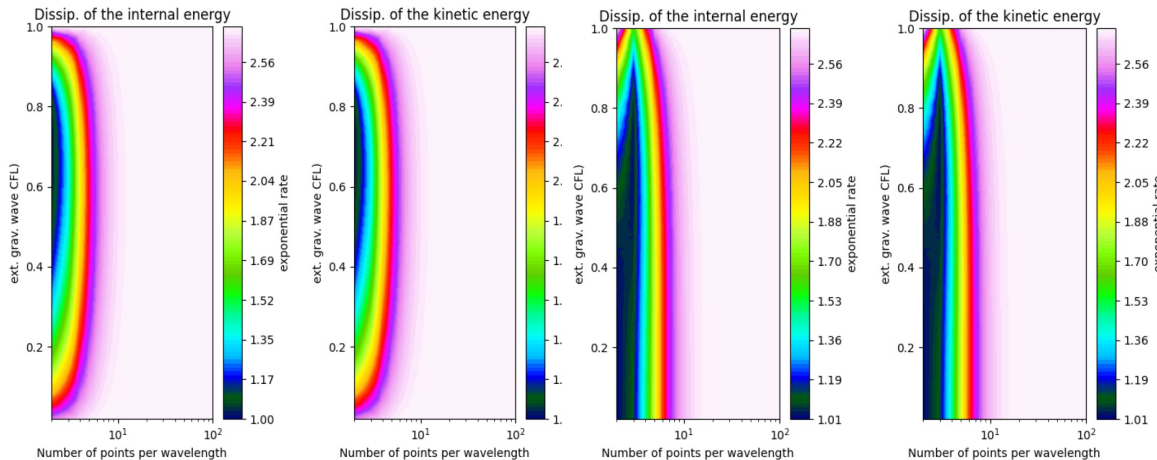
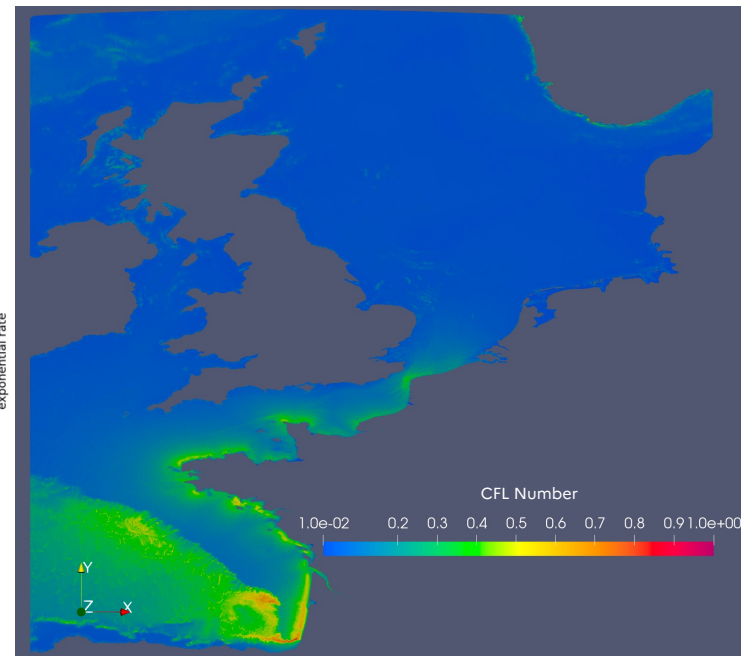


Schéma « bas Froude » 1er ordre.

$$\alpha = \frac{1}{2}$$

Schéma Rusanov 2nd ordre  
(RK2 / MUSCL)



# Tolosa-sw – Performances calcul

## Configuration Tolosa-ATL



Hycom2D	Tolosa-sw
660 000 éléments Résolution : 400m à 2km	2.6 millions d'éléments Résolution : 50 à 200 m

***Tolosa-sw seulement deux fois plus coûteux que Hycom2D***

Avec maillage env. 4 fois plus raffiné (Calcul sur 1,2,3,4 nœuds de 128 cœurs)

## Configuration Tolosa-ATL-St Malo



Hycom2D	Tolosa-sw
3 modèles imbriqués avec une cascade de zooms Oasis Résolution : 40m sur dernier niveau de zoom	2.9 millions d'éléments Résolution : 8m à 200m ( $dt_{ATL\_STMALO} \approx dt_{ATL}/3$ )

***Tolosa-sw deux fois plus rapide que Hycom2D***

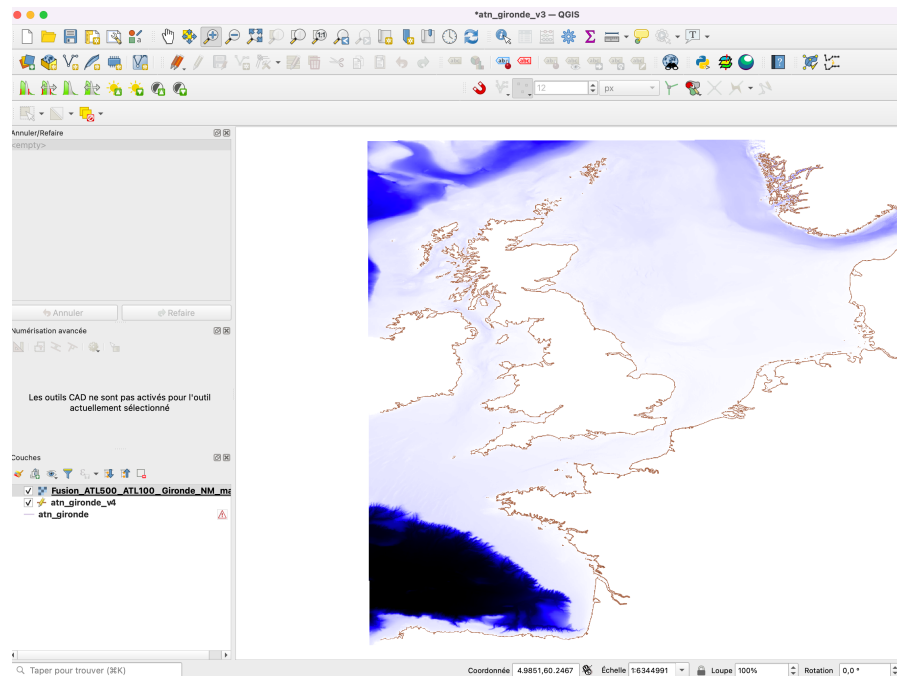
Pour 7 j de simulation :

- Tolosa-sw : 16 min. (640 cœurs)
- Hycom2D : 24 min. (858 cœurs)

# Tolosa-sw – Fonctionnalités

## Environnement pour les pré/post traitements

- Construction de configurations : système d'informations géographiques, interfacé avec les traits de côte et MNT du SHOM.
- Choix de résolution, lissages afférents et définition du maillage avec Slim/Seamsh/Gmsh/Mmg.
- Prétraitement des forçages atmosphériques et de marée.
- Outils d'analyses harmoniques et prédictions du Shom (dit 'MAS') avec parallélisation complète (y compris IO), base de données de constantes du Shom.
- Outils d'optimisation de la friction de fond.
- Outil de couplage (OASIS).
- Outils de visualisation (PyTolosa).

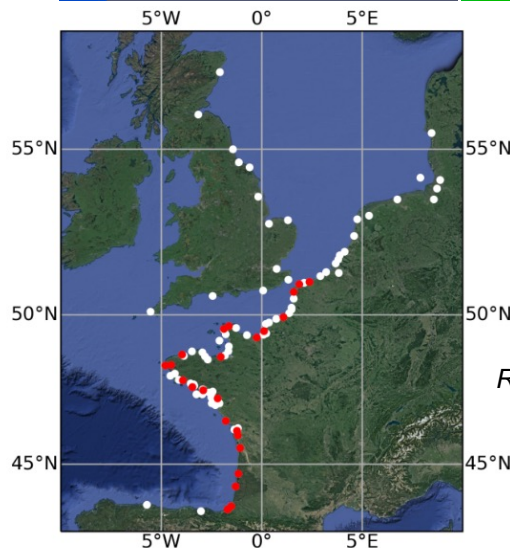
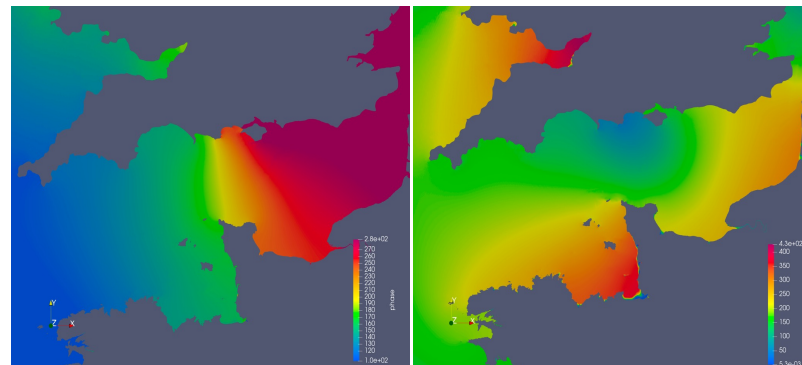


*Limite terre-mer Shom traitée sous Qgis*

# Tolosa-sw – Fonctionnalités

## Environnement pour les pré/post traitements

- Construction de configurations : système d'informations géographiques, interfacé avec les traits de côte et MNT du SHOM.
- Choix de résolution, lissages afférents et définition du maillage avec Slim/Seamsh/Gmsh/Mmg.
- Prétraitement des forçages atmosphériques et de marée.
- Outils d'analyses harmoniques et prédictions du Shom (dit 'MAS') avec parallélisation complète (y compris IO), base de données de constantes du Shom.
- Outils d'optimisation de la friction de fond.
- Outil de couplage (OASIS).
- Outils de visualisation (PyTolosa).



*Phase/Amplitude M2  
sorties de l'outils MAS*

*Réseau d'observation et  
de constantes  
harmoniques MAS  
(sous échantillon de  
l'étude Tolosa-ATL)*

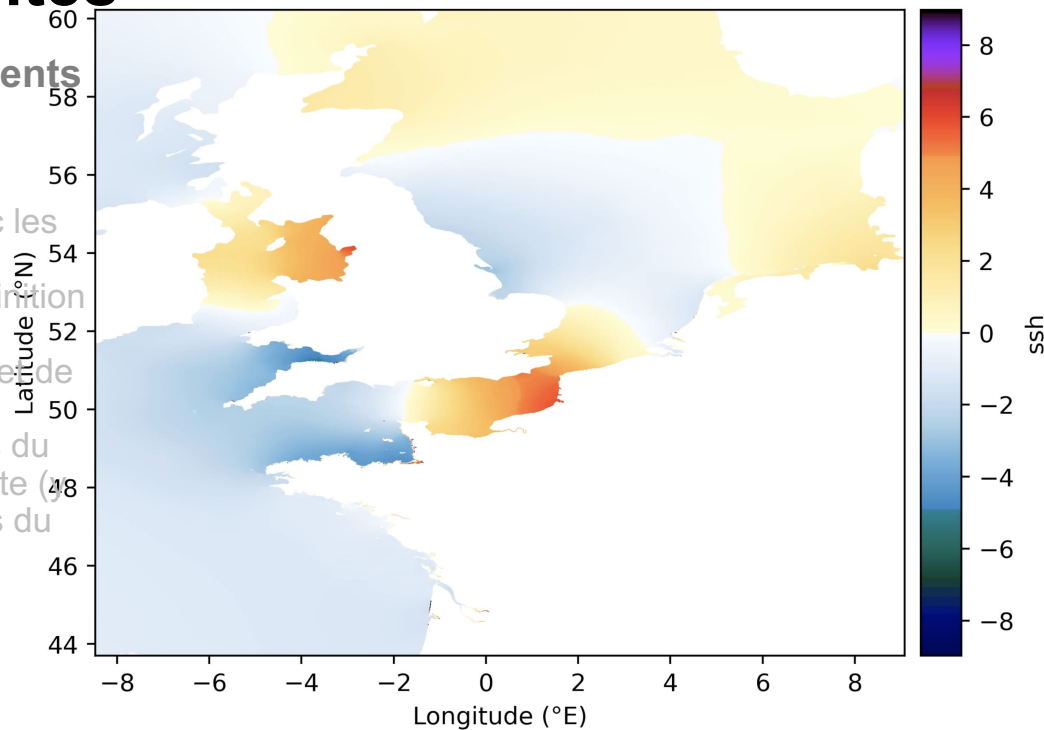


# Tolosa-sw – Fonctionnalités

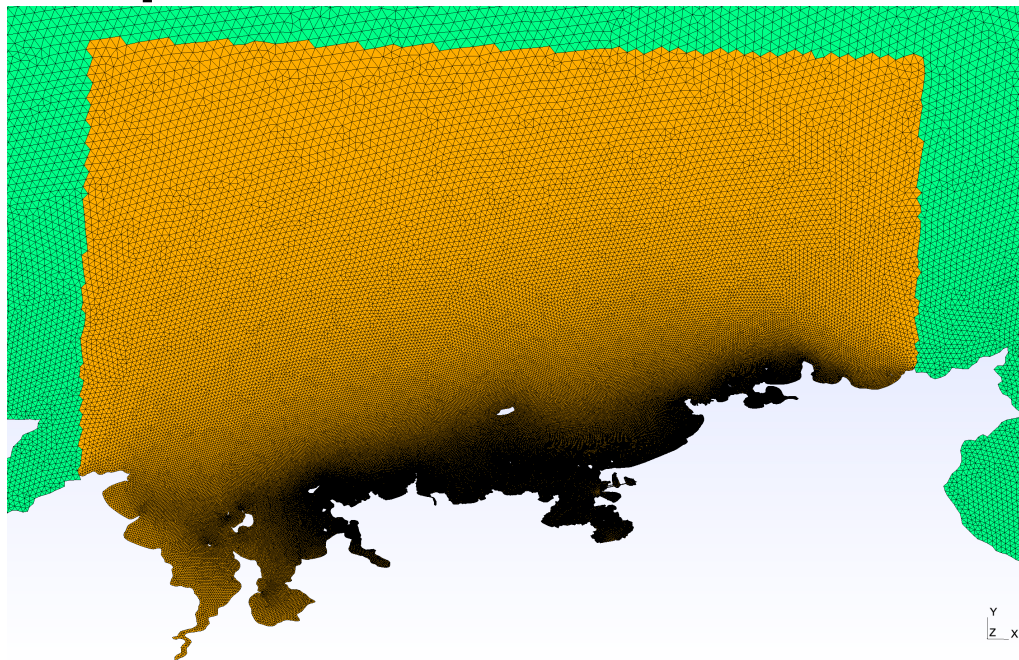
## Environnement pour les pré/post traitements

- Construction de configurations : système d'informations géographiques, interfacé avec les traits de côte et MNT du SHOM.
- Choix de résolution, lissages afférents et définition du maillage avec Slim/Seamsh/Gmsh/Mmg.
- Prétraitement des forçages atmosphériques et de marée.
- Outils d'analyses harmoniques et prédictions du Shom (dit 'MAS') avec parallélisation complète (y compris IO), base de données de constantes du Shom.
- Outils d'optimisation de la friction de fond.
- Outil de couplage (OASIS).
- Outils de visualisation (PyTolosa).

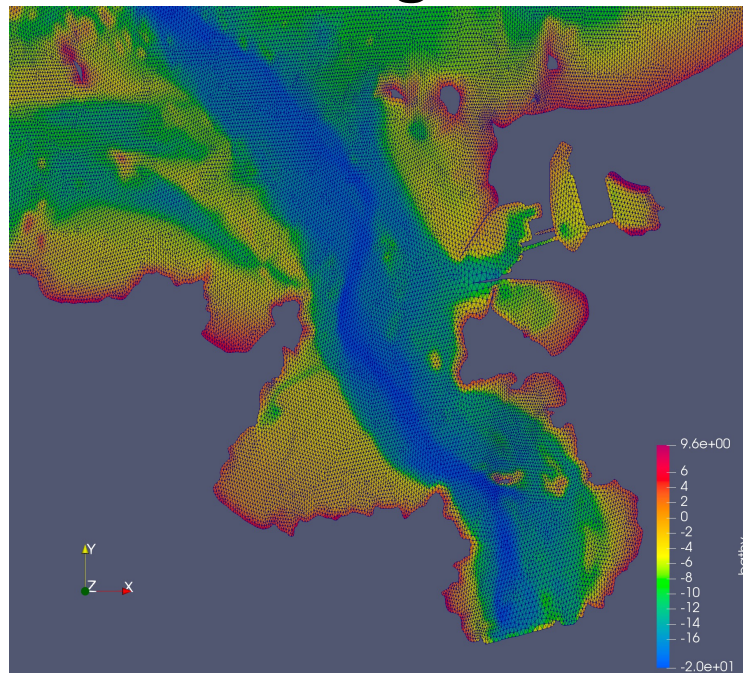
Distribution of ssh.  
2017-1-2 1:0



# Capacités de raffinements : outils de maillage



*Exemple de descente d'échelle par inclusion  
et raccordement de maillage raffiné dans le  
maillage Tolosa-ATL*



*Zoom Saint-Malo : maillage et bathymétrie*

# Capacités de raffinements : calcul asynchrone

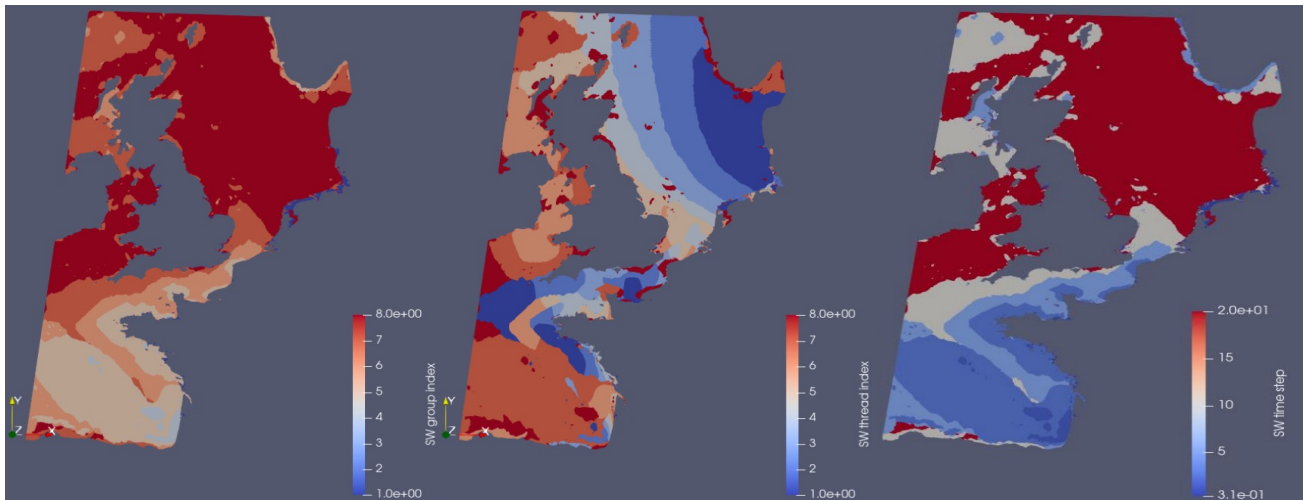
## Problématique

- Grandes disparités des CFL locales dans une modélisation comme ATL
- Besoin de raffinement local sans pénaliser le coût calcul (besoins civiles et Défense)

## Méthodes (dites asynchrones)

La bibliothèque permet d'associer dans une même simulation différents objets « maillage » présentant:

- un pas de temps indépendant,
- des physiques différentes (paramétrisations ou jeux d'équations résolues).



*Exemple de zonage du pas de temps sur la configuration Tolosa-sw-ATL avec raffinement sur St Malo*

*Speed-up estimé entre 4 et 10 selon l'algorithme de zonage utilisé*

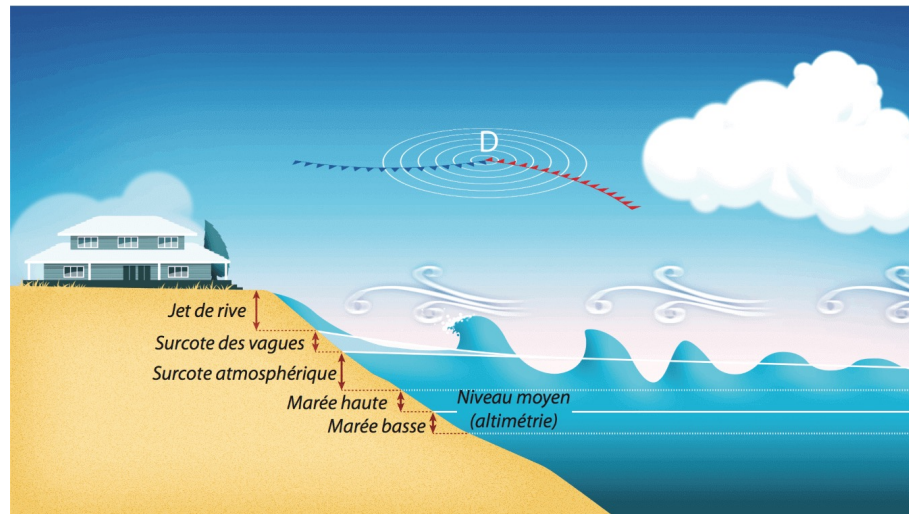
*(source : Impetus)*

# Capacités de raffinements: Tolosa-Ict

## Leucothea - Non hydrostatique intégré

### Cahier des charges

- Représentation vague à vague à l'échelle métrique (XTHR)
  - **Structure mathématique simple** (hyperbolicité + termes sources), même dans le cas quasi-incompressible
- grande **efficacité** informatique (x10 plus rapide qu'un modèle NH intégré)



Processus de la submersion marine (Melet et al., 2018)

# Capacités de raffinements: Tolosa-Ict

## Leucothea - Non hydrostatique intégré

### Méthodologie

- Modèle asymptotique basé sur les équations d'Euler barotrope, dans la limite de faible compressibilité (développement en nombre de Mach). Travaux théoriques de **G.Richard**.
- Extension des modèles de type Boussinesq aux écoulements faiblement compressibles et fortement non linéaires.
- Dérivation d'une équation de conservation de l'énergie totale.
- Dans la limite de faible nombre de Mach, on retrouve les équations de **Serre-Green-Naghdi**. Comparaisons avec le modèle de **F.Marche**.
- **Dégénérescence vers le Shallow-Water** lorsque les effets non hydrostatiques deviennent négligeables.
- En accord avec les relations de dispersion de la théorie linéaire des fluides à surface libre.
- Amélioration des propriétés dispersives (rajout de deux équations), préservation de l'hyperbolicité.
- Travaux en cours sur le déferlement et transport de sédiments.

# Capacités de raffinements: Tolosa-Ict

## Leucothea - Non hydrostatique intégré

### Implémentation

- Efficacité des **techniques numériques « bas Froude »** et traitement semi-implicite des ondes acoustiques.
- Preuves de la **stabilité énergie** du schéma.

### Résultats

- Performances : environ **4x Tolosa-sw**.



# Tolosa-Ict

## Cas test Beji-Battjes

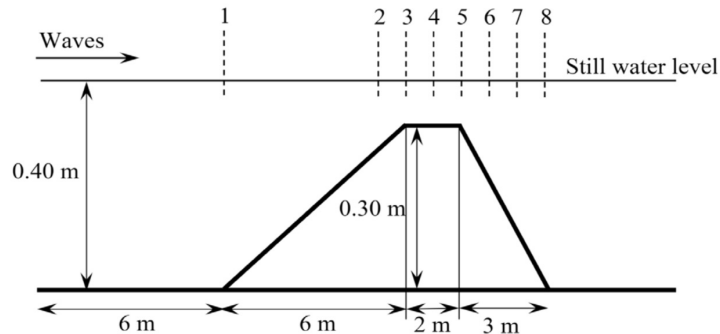
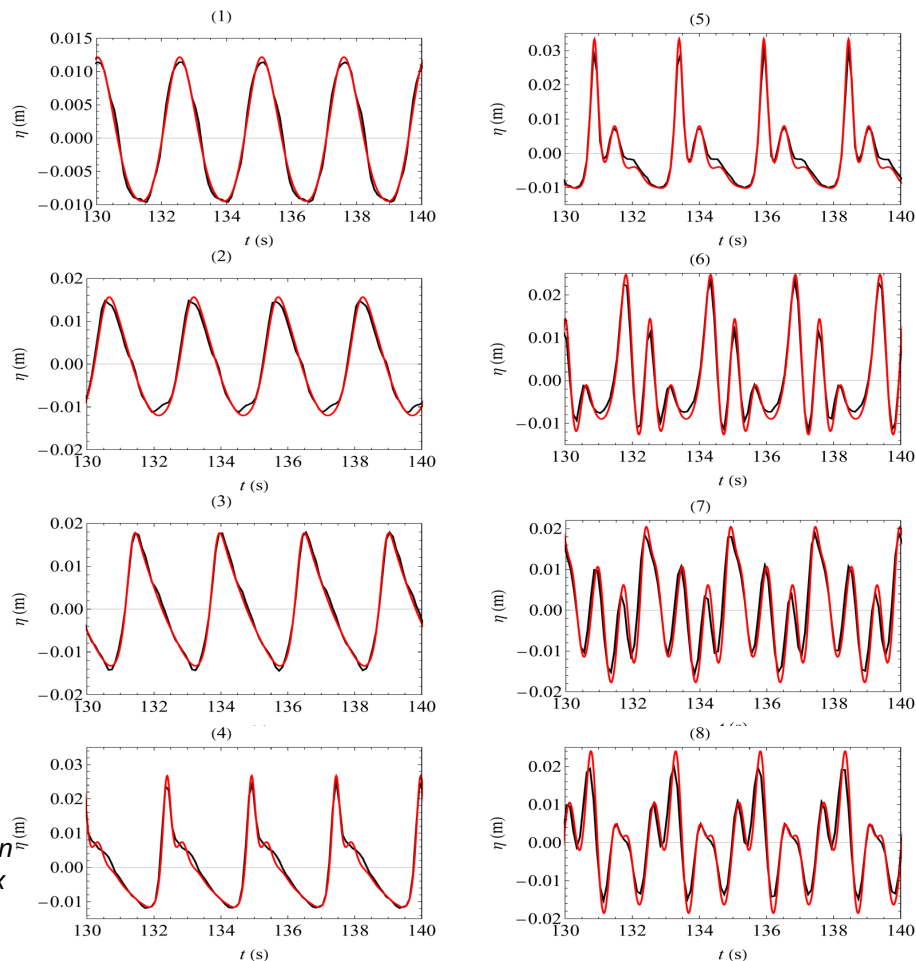


Fig.1 : Description du cas Beji-Battjes : position des stations expérimentales (Beji, S., & Battjes, J. A. (1993). Experimental investigation of wave propagation over a bar. Coastal Engineering)

Fig. 2 :  
Elévation de surface à  
chaque station : comparaison  
des résultats expérimentaux  
(noir) avec les résultats  
numériques (rouge)



# Tolosa

## Bilan

- Plate-forme **multi-modèles** (Shallow Water, dispersif intégré, modèle d'avalanches, Euler barotrope ALE, Shallow Water multicouches).
- Etudes théoriques, développements informatiques et validations assurés par une **communauté de chercheurs, d'ingénieurs de doctorants et post-doc**:

*F.Couderc (Univ.Toulouse), J.P.Vila (Univ.Toulouse), P.Noble (Univ.Toulouse), G.Richard (INRAE), A.Duran (Univ.Lyon), M.Kazakova (Univ.Chambéry), F.Marche (Univ.Montpellier), T.Unfer (IMPETUS), SHOM ...*

## Travaux en cours

- Optimisation en cours sur la **parallélisation** (Open-MP GPU).
- Poursuite des développements **physiques** (dont déferlement, sédimento.) et **numériques**.
- **Validations** par processus physique, comparaisons modèles 3D et simulations réalistes.

### *Outil optimal pour un système de prévision intégré du large à l'échelle littorale*

- Flexibilité apportée par les maillages non structurés
- Modélisation continue et cohérente entre Shallow-Water et NH
- Temps de calcul compatible avec les exigences opérationnelles



# Tolosa – quelques éléments bibliographiques

F. Couderc, A. Duran, J.P. Vila, An explicit asymptotic preserving low Froude scheme for the multilayer shallow water model with density stratification. J. Comput. Phys. 228(23), 8665-8692.

T. Unfer, An asynchronous framework for the simulation of the plasma/flow interaction, J. Comput. Phys. 236 (2013) 229–246.

Richard G.: An extension of the Boussinesq-type models to weakly compressible flows , European Journal of Mechanics / B Fluids 89 (2021) 217–240.

Kazakova M., Richard G.: A new model of shoaling and breaking waves: One-dimensional solitary wave on a mild sloping beach, March 2019, Journal of Fluid Mechanics 862:552-591, DOI: 10.107/jfm.2018.947.