

# Journées REFMAR

*Colloque international francophone*

Observation du niveau marin  
au profit des politiques  
publiques et de la recherche

#JR2022

**REFMAR**.shom.fr  
 Réseaux marégraphiques français

**17 - 19 octobre 2022**

à **OcéanOpolis**  
BREST

**RECUEIL DES ABSTRACTS**

©AdobeStock



# SOMMAIRE

## Jour 1 : Lundi 17 octobre Changement climatique et niveau marin

- La mesure du déséquilibre énergétique planétaire par géodésie spatiale pour contraindre la sensibilité climatique et les projections de hausse du niveau de la mer *Jonathan Chenal, Benoît Meyssignac, Alejandro Blazque, Robin Guillaume-Castel*..... p 5
- Prise en compte de la remontée eustatique du niveau moyen dans les analyses conjointes houle-niveau *Franck Mazas* ..... p 6
- Climate-driven coastal vulnerability – The worldwide influence of El Niño Southern Oscillation *Julien Boucharel* ..... p 7
- Modulation de la marée par la montée du niveau de la mer le long du littoral du Bengale *Fabien Durand, Jamal Khan, Laurent Testut, Yan Krien, Saiful Islam*... p 8
- Le numérique, une immatérialité qui impacte *Didier Mallarino*..... p 9
- Estimating Ocean Global Heat Content and Steric Sea Level using optimal interpolation tool for synthesis of global in situ dataset (ISAS) *Nicolas Kolodziejczyk, William Llovel, Annaig Prigent, Thierry Penduff, Jean-Marc Molines* ..... p 10
- Les activités de « data rescue » en marégraphie : quel est l'apport des mesures historiques du niveau de la mer ? *Alexa Latapy*..... p 11
- FUTURISKS : risques côtiers passés à futurs dans les territoires d'Outre-Mer insulaires tropicaux français : des impacts aux solutions *Xavier Bertin, Virginie Duvat, Laurent Testut* ..... p 12
- Saint-Pierre et Miquelon : un territoire vulnérable aux aléas marins *Jean-Pierre Michelin* ..... p 13
- Développement de l'observatoire du littoral ouest africain *Boris Leclerc, Moussa Sall* ..... p 14
- La prévision des risques de submersions marines au Shom : de la recherche aux applications opérationnelles *Didier Jourdan, Audrey Pasquet, Héloïse Michaud, Rémy Baraille, Yann Krien, Maya Ciavaldini, Fabien Brosse* ..... p 15
- LITOSCOPE : estimer les futurs risques de submersion côtière à partir d'observations satellites *Claire Dufau, Olivia Fauny, Solange Lemai-Chenevier, Fabrice Dazin, Franco Fontanot, Deborah Idier, Rodrigo Pedreros, Konrad Rolland, Philippe Schaeffer, Jochen Hinkel, Frederic Bretar* ..... p 16

## Jour 2 : Mardi 18 octobre Observation du niveau marin au profit des politiques publiques et de la recherche

- OSIRISC-Litto'Risques : un exemple d'observatoire des risques côtiers co-construit entre gestionnaires et scientifiques *Nicolas Le Dantec, Alain Hénaff, équipe OSIRISC*..... p 18
- Appui du Cerema à la mission RDI sur le littoral : Capitalisation des données pour l'aide à la décision en gestion de crise : La fiche « tempête » *Sabine Cavellec, Céline Trmal, Franck Charrier, Rachel Puechberty* ..... p 19
- Le Centre national d'alerte aux tsunamis (CENALT) : retour sur 10 ans de fonctionnement *Aurélien Dupont, Pascal Roudil, Hélène Hébert, Philippe Heinrich, Audrey Gailler*..... p 20
- Suivi des impacts de la subsidence, et de la montée du niveau marin relatif, à Mayotte *Matthieu Jeanson, Thomas Claverie, Sophie Morisseau, Sarah Charroux, Aline Aubrym* ..... p 21
- Observation and simulation of the meteotsunami generated in the Mediterranean Sea by the Tonga eruption on 15 January 2022 *Philippe Heinrich, Audrey Gailler, Aurélien Dupont, Vincent Rey, Constantino Listowski, Hélène Hébert, Emmanuel Forestier* ..... p 22
- Déplacements verticaux à la côte estimés par GNSS et leur importance dans l'étude de l'évolution du niveau de la mer *Guy Wöppelmann, Médéric Gravelle*..... p 23



# SOMMAIRE

Les satellites altimétriques comme moyen de mesure de la marée et de la hauteur de la mer près des côtes du Golfe de Guinée *Lucrèce Djeumeni Noubissie, Florence Birol, Raphaël Onguene, Fabien Leger, Fernando Niño ..* p 24

La côte de Guyane : une dynamique côtière extrême, un défi pour l'observation et l'instrumentation *Guillaume Brunier, Antoine Gardel ..* p 25

## Jour 3 : Mercredi 19 octobre

### Journée estuaires

Changement climatique et élévation du niveau de la mer : quelles conséquences pour les estuaires ? *Gonéri Le Cozannet ..* p 27

Dynamique de marée dans l'estuaire du Wouri, Cameroun *Yannick Fossi Fotsi, Isabelle Brenon, Nicolas Pouvreau, Yann Ferret, Alexa Latapy, Raphaël Onguene, Jacques Etame ..* p 28

Propagation de la marée et interactions fluvio-tidales dans l'estuaire de la Gironde *Julie Cheynel, Isabel Jalón-Rojas, Sophie Defontaine ..* p 29

Jumeaux numériques territoriaux de l'estuaire de la Gironde *Fabrice Klein ..* p 30

Utilisation des techniques de Deep Learning pour la reconstruction des niveaux d'eau de l'estuaire de la Seine *Julien Deloffre, Imad Janbain, Abderrahim Jardani ..* p 31

Présentation des conventions de la DGPR avec Météo France et le Shom *Bruno Janet, Etienne Lepape, Antoine Lhermitte, Sybille Muller ..* p 32

Homonim-3 : avancées à mi-parcours *Didier Jourdan, Audrey Pasquet, Héloïse Michaud, Rémy Baraille, Yann Krien, Maya Ciavaldini, Fabien Brosse, Laurie Biscara, Yann Ferret, Denis Paradis, Patrick Ohl, Alice Dlaphinet, David Ayache, Christophe Bataille, Komlan Kpogo-Nuwolko ..* p 33

Prévisions « toutes eaux » sur l'estuaire de la Loire *Matthieu Nicolas, Stéphane Marlette, Etienne Le Pape, Fanny Sentenac ..* p 34

Outils de modélisation sur les côtiers bretons *Antonin Rivat ..* p 35

Cartographie des zones d'inondation potentielle en estuaire *Thomas Belin, Marie Morin, Stéphane Piney ..* p 36

Impact de la hausse du niveau de l'océan sur la vigilance crue dans les estuaires de l'Adour et de la Seine *Estelle Marchand, Marie Morin, Laurent Diéval, Yan Lacaze, ..* p 37

Jaugeage dans l'estuaire de l'Adour *Laurent Dieval, Sylvain Chesneau, Vincent Dourdet ..* p 38



# Jour 1

Lundi 17 octobre 2022

## **C**hangement climatique et niveau marin



## La mesure du déséquilibre énergétique planétaire par géodésie spatiale pour contraindre la sensibilité climatique et les projections de hausse du niveau de la mer

Jonathan Chenal<sup>1,2,3</sup>  
Benoît Meyssignac<sup>1</sup>  
Alejandro Blazquez<sup>1</sup>  
Robin Guillaume-Castel<sup>1</sup>

[jonathanchenal@ign.fr](mailto:jonathanchenal@ign.fr)

**Mots clefs :** Contenu de chaleur de l'océan, sensibilité climatique, géodésie spatiale

<sup>1</sup> LEGOS (CNES, CNRS, IRD, UPS), Toulouse, France

<sup>2</sup> ENPC, Champs-sur-Marne, France

<sup>3</sup> IGN, Saint-Mandé, France

L'énergie rayonnée par la Terre vers l'espace ne compense pas le rayonnement solaire incident, provoquant un petit déséquilibre énergétique au sommet de l'atmosphère de 0,4 à 1,0 W.m<sup>-2</sup>. Ce déséquilibre est noté EEI (Earth energy imbalance). Aux échelles décennales, il est principalement provoqué par les émissions anthropiques de gaz à effet de serre [dont l'effet radiatif est appelé « forçage radiatif effectif » (ERF)], et il conduit au réchauffement global actuel de notre planète. Combiné à la température de surface et à l'ERF, la mesure de l'EEI renseigne sur la sensibilité du système climatique aux émissions de gaz à effet de serre, que l'on appelle « sensibilité climatique d'équilibre ». Ainsi, le suivi précis de l'EEI est essentiel pour évaluer précisément l'évolution du changement climatique, estimer la sensibilité climatique, et évaluer l'évolution future du climat. Toutefois, la mesure de l'EEI est difficile, car il est deux ordres de grandeur plus petit que les flux radiatifs entrant et sortant de la Terre. Mais comme 90 % de l'excès d'énergie absorbé par la Terre en réponse à ce déséquilibre est stocké sous forme de chaleur dans l'océan, la mesure du contenu de chaleur de l'océan (« ocean heat content », OHC) et de son évolution de long terme fournit une estimation précise de l'EEI.

Aujourd'hui, les variations de l'OHC peuvent être observées par l'espace en combinant les mesures altimétriques de l'évolution du niveau de la mer avec les mesures gravimétriques de variation de la masse de l'océan. Dans cette présentation, nous présentons cette méthode utilisée pour estimer l'OHC, et évaluons sa pertinence pour en déduire une estimation de l'EEI. Nous comparons sa performance avec une mesure indépendante de l'OHC à partir de mesures *in situ* de température et salinité par la flotte de profileurs Argo. Nous comparons ces deux systèmes de mesure dans l'estimation de la sensibilité climatique effective. La prise en compte de la variabilité interne du système climatique, ainsi que celle de l'effet des structures spatiales du réchauffement sur la réponse radiative de la Terre, nous permet de déduire une estimation observationnelle de la sensibilité climatique. À partir de l'EEI déduit des mesures *in situ* avec Argo, nous obtenons une distribution de la sensibilité climatique de 3,8 [2,0 ; 19,1] K (intervalle de confiance à 90 %), tandis que la mesure géodésique de l'EEI conduit à une distribution quasiment identique : 3,8 [2,0 ; 19,5] K.

Pour l'instant, les estimations de l'EEI déduites de mesures *in situ* avec Argo ou par géodésie spatiale amènent à des estimations de la sensibilité climatique qui sont comparables aux autres estimées dans des conditions similaires trouvées dans la littérature. Mais ces premiers résultats sont prometteurs pour la mise en place d'un système de surveillance de l'EEI et de la réponse radiative du système Terre. Ceci ouvre une voie potentielle pour l'évaluation de la réponse de la Terre aux politiques d'atténuation du changement climatique, et à la contrainte des projections climatiques de hausse du niveau de la mer.



# Prise en compte de la remontée eustatique du niveau moyen dans les analyses conjointes houle-niveau

Franck Mazas<sup>1</sup>

franck.mazas@arteliagroup.com

Mots clefs : analyse conjointe houle-niveau, valeurs extrêmes, eustatisme, probabilité de rencontrex

<sup>1</sup> ARTELIA, Lyon, France

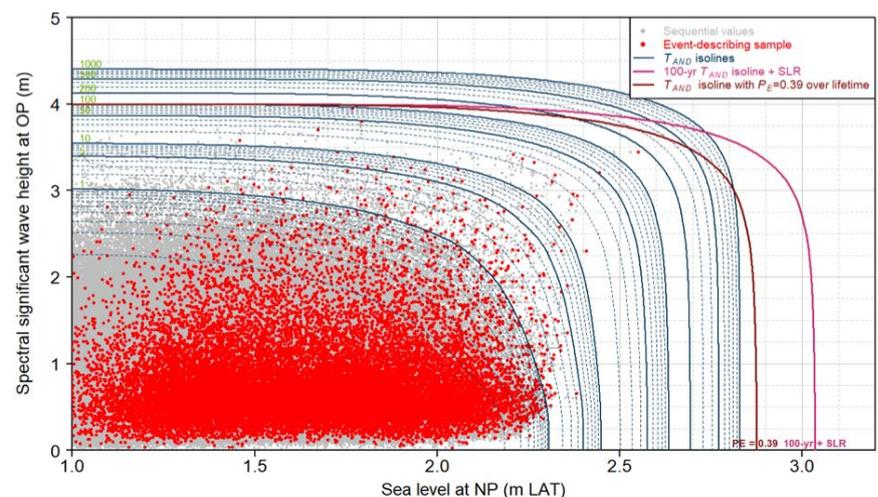
Les analyses probabilistes conjointes houle-niveau permettent de préciser les probabilités d'occurrences de nombreux aléas tels que la submersion marine, les interactions avec les ouvrages de protection (franchissement, stabilité de la carapace, efforts...), l'érosion côtière..., et ce en prenant en compte la dépendance entre les deux phénomènes.

Il est ainsi courant de tracer des contours de probabilité de dépassement conjointe de la hauteur significative des états de mer et du niveau marin. Le long de ce profil, chaque couple hauteur de vagues / niveau marin aura la même probabilité de dépassement conjoint, mais en revanche pourra provoquer des réponses différentes : ainsi le couple maximisant le franchissement d'un ouvrage de protection de front de mer différera-t-il du couple le plus pénalisant pour la stabilité de son éventuelle butée.

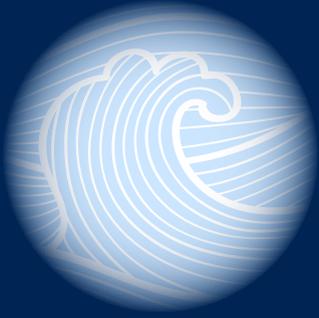
Cependant, l'élévation continue et en accélération du niveau marin sous l'effet du changement climatique modifie les probabilités bivariées ainsi obtenues. Chaque année, la probabilité de dépassement d'un couple hauteur / niveau augmente, et sa période de retour conjointe diminue.

Une approche simplifiée et conservative pour prendre en compte cette remontée eustatique consiste ainsi à ajouter au couple considéré l'élévation attendue à la fin de la durée de vie du projet, ce qui donnera par exemple un couple de période de retour conjointe centennale lors de la dernière année de la période considérée. Mais à l'inverse, on remarque que la période de retour correspondante en début de durée de vie du projet peut être très supérieure à celle souhaitée.

Il est ici proposé d'aborder cette problématique par le truchement de la probabilité de rencontre sur toute la durée de vie du projet, qui relie les probabilités bivariées à la durée de vie. En la réécrivant de façon à considérer une distribution bivariée évoluant chaque année en fonction de l'élévation attendue, il devient alors possible de déterminer la surélévation de niveau à prendre en compte par rapport à l'état actuel (hors eustatisme) de façon à obtenir, sur toute la durée de vie du projet, une probabilité de rencontre de l'évènement de période de retour fixée équivalent à celle du cadre stationnaire. Cette approche permet ainsi d'optimiser l'adaptation du dimensionnement des structures de protection côtière vis-à-vis de l'élévation attendue du niveau de la mer.



Prise en compte de l'eustatisme dans un contour houle/niveau de période de retour conjointe 100 ans



# Climate-driven coastal vulnerability – The worldwide influence of El Niño Southern Oscillation

Julien Boucharel<sup>1</sup>

boucharelj@yahoo.fr

Mots clefs : ENSO, coastal water level, wave run up, coastal waves, erosion, overtopping, climate variability, satellite observations

<sup>1</sup> IRD-LEGOS-University of Toulouse, Toulouse, France

More than 600 million people live in coastal areas that are less than 10 meters above sea level. The combination of rising mean and extreme sea-level episodes will result in more frequent/intense flooding and erosion and will exert an ever-stronger influence on shorelines. It is therefore crucial to improve forecast systems of such hazards through in particular the better understanding of the connections between large-scale climate variability and regional coastal vulnerability. First, I will describe a new paradigm delineating the teleconnection pathways from the El Niño Southern Oscillation (ENSO) and its seasonal effects on tropical and extra-tropical storms to coastal waves in the Pacific basin. In particular, I will show that the alternating increased occurrences of extreme coastal waves between the western and eastern Pacific emerge primarily from the nonlinear resonance between El Niño and the annual cycle. These disentangled complex dynamical relationships have allowed the development of a new simple mathematical model to simulate coastal wave activity in the Pacific basin.

In the second part of the talk, I will show that this model can in fact be extended beyond the Pacific basin and to other key hydrodynamic drivers of coastal vulnerability. In particular, by using new global datasets of shoreline positions and topographic elevations obtained by satellite over the past two decades, it is shown that coastlines are under the combined influence of three main factors: the regional mean sea level, ocean waves and river inputs. On seasonal to interannual timescales, I will show that all three drivers are significantly and globally influenced by ENSO. And, using the mathematical framework previously described, I will demonstrate that it is possible to deterministically explain 20-30% of the global shorelines seasonal to interannual variability (*i.e.*, erosion and flooding/overtopping occurrences). This improved understanding of the global influence of El Niño events on the littoral vulnerability has major implications for coastal hazards prediction and climate projections in particular in the densely populated Pacific basin and its vulnerable islands.





# Modulation de la marée par la montée du niveau de la mer le long du littoral du Bengale

Fabien Durand<sup>1,2</sup>

Jamal Khan<sup>1,3</sup>

Laurent Testut<sup>3</sup>

Yan Krien<sup>1,4</sup>

Saiful Islam<sup>5</sup>

[fabien.durand@ird.fr](mailto:fabien.durand@ird.fr)

**Mots clefs :** Delta du Bengale, marée M2, sea level rise, tendance tidale long terme

<sup>1</sup> LEGOS, Toulouse, France

<sup>2</sup> Institut de Géosciences, Université de Brasília, Brasília, Brésil

<sup>3</sup> LIENSs, La Rochelle, France

<sup>4</sup> Shom, Toulouse, France

<sup>5</sup> IWFM, Dhaka, Bangladesh

Le delta du Bengale, plus vaste delta de la planète, est soumis à un aléa submersion omniprésent, associé à une vulnérabilité marquée des populations riveraines. La situation va vraisemblablement se détériorer rapidement dans le contexte actuel de montée du niveau de la mer. La montée du niveau de la mer va avoir un effet direct sur la submersion littorale, mais aussi des effets indirects, via l'altération de l'hydrodynamique côtière. Dans cette étude, nous analysons l'impact de la montée du niveau de la mer sur la marée, qui est le facteur dominant de variabilité le long de ce littoral macro-tidal du Bengale. Sur la base d'enregistrements historiques de la marée ainsi que d'une modélisation hydrodynamique dédiée couvrant l'ensemble du réseau hydraulique du delta à fine échelle, nous évaluons les changements long-terme de l'amplitude de la marée. Nous concluons que ces changements sont considérables, et très variables régionalement. Sur le Sud-Ouest et le Sud-Est du delta, l'amplitude de la marée va augmenter sous l'effet de la montée du niveau de la mer, ce qui va aggraver l'aléa de submersion tidale. À l'inverse, la région médiane du delta va subir une inondation permanente massive des berges des estuaires et de la mangrove environnante dans les scénarios dépassant 0.5 m de montée du niveau de la mer. Cette inondation va induire une diminution de l'amplitude tidale dans cette région médiane. Notre étude montre que la modulation de la marée est un ingrédient significatif qui doit être pris en compte dans l'hydrodynamique future du delta du Bengale. Le mécanisme d'amplification/atténuation régionalement contrasté souligne également le potentiel des stratégies de "managed re-alignment" pour une gestion durable de ce méga-delta au cours du 21<sup>e</sup> siècle.



## Le numérique, une immatérialité qui impacte

Didier Mallarino<sup>1</sup>

[didier.mallarino @osupytheas.fr](mailto:didier.mallarino@osupytheas.fr)

Mots clefs : Numérique,  
changement climatique, impacts  
environnementaux, science ouverte

<sup>1</sup> Institut Pythéas - Observatoire des  
Sciences de l'Univers - Aix Marseille  
Université, Toulon, France

Le numérique nous offre l'opportunité d'approfondir notre compréhension du monde. Cependant, avec une cinquantaine de ZettaOctets de données créées en 2020, le numérique doit lui aussi impérativement se pencher sur ses usages et participer aux efforts de réduction des impacts environnementaux qu'il engendre.

Que ce soit avec le streaming vidéo, le cloud gaming, l'internet des objets (IOT), les réseaux sociaux, l'IA ou les bitcoins, les usages font croître les volumes de données et la production de matériel.

Dans la recherche, la production et la consommation des données s'envolent également (calculs complexes, modélisation, imagerie spatiale, études environnementales). Cette accumulation de données se répercute sur les besoins logiciels, matériels et énergétiques qui peinent, malgré les gains d'efficacité, à compenser l'accroissement des usages. Le paradoxe de Jevons reste tristement d'actualité.

Ces usages participent voire amplifient les dérèglements environnementaux (changement climatique, baisse de la biodiversité, épuisement des ressources naturelles, pollutions) tout en soulevant également des questions d'ordre éthique et morale sur la question de qui bénéficie et qui subit.

Les actions permettant de limiter nos impacts sont multiples mais les réponses souvent complexes imposent une réflexion approfondie sur nos usages prenant en compte les aspects sociaux, sociétaux, éco responsable et humains afin d'apporter des réponses pertinentes.



## Estimating Ocean Global Heat Content and Steric Sea Level using optimal interpolation tool for synthesis of global *in situ* dataset (ISAS)

Nicolas Kolodziejczyk<sup>1</sup>

William Llovel<sup>2</sup>

Annaig Prigent<sup>3</sup>

Thierry Penduff<sup>4</sup>

Jean-Marc Molines<sup>4</sup>

[nicolas.kolodziejczyk@univ-brest.fr](mailto:nicolas.kolodziejczyk@univ-brest.fr)

**Mots clefs :** SNO Argo, In Situ Analysis System, optimal interpolation, temperature/salinity profiles, ocean heat content changes steric sea level changes

<sup>1</sup> SNO Argo France/IUEM/LOPS, Plouzané, France

<sup>2</sup> CNRS/LOPS, Plouzané, France

<sup>3</sup> Ifremer/LOPS, Plouzané, France

<sup>4</sup> CNRS/IGE, Grenoble, France

The In Situ Analysis System (ISAS) was developed at SNO Argo France to produce gridded fields of temperature and salinity that preserve as much as possible the time and space sampling capabilities of the Argo network of profiling floats. Since the first global reanalysis performed in 2009, the system has evolved, and a best effort delayed-mode processing of the 2002–2020 dataset has been carried out using last version of ISAS and updating the statistics to produce ISAS analysis. The version 7 is now implemented as the operational analysis tool at the Coriolis data center (ISAS NRT). The robustness of the results with respect to the system evolution is explored through global quantities of climatological interest: the global ocean heat content and the global mean steric sea level. Estimates of consistent errors with the methodology are computed. Using sensitive tests with real dataset and synthetic dataset from an forced ocean general circulation model (at a 1/4° spatial resolution) based on NEMO, this presentation will show that building reliable statistics on the fields are fundamental to improve the monthly estimates as well as the global indicators trends, and to determine the absolute error bars.



## Les activités de « data rescue » en marégraphie : quel est l'apport des mesures historiques du niveau de la mer ?

Alexa Latapy<sup>1</sup>

[alexa.latapy@shom.fr](mailto:alexa.latapy@shom.fr)

Mots clefs : data rescue, long-terme, niveau de la mer, tempêtes

<sup>1</sup> Shom, Brest, France

L'étude du changement climatique global et son influence sur les variations du niveau marin constitue un enjeu sociétal fort, qu'il s'agisse de l'évolution du niveau moyen de la mer ou de l'évolution des événements extrêmes. Depuis les années 1990, les données altimétriques satellitaires permettent d'avoir une vision globale de ces changements et rendent compte de l'hétérogénéité spatiale des variations du niveau marin. Néanmoins, il est toujours nécessaire de croiser ces mesures avec les observations issues des marégraphes in situ, particulièrement dans les zones côtières pour lesquelles l'altimétrie ne peut être utilisée. De plus, les données altimétriques ne couvrent que les dernières 30 dernières années, ainsi les mesures effectuées à l'aide de marégraphes sont pratiquement les seules données disponibles nous renseignant sur l'évolution du niveau marin historique, à l'échelle des décennies, voire des siècles passés.

En France, les premières mesures remontent au 17<sup>e</sup> siècle à Brest et se sont généralisées au cours du 19<sup>e</sup> siècle avec la création du premier réseau d'observation marégraphique national géré par le Dépôt des cartes et plans de la marine (ancêtre du Shom). Malgré ce patrimoine scientifique unique, une partie de ces mesures n'est pas exploitée car se trouvant toujours stocké sous forme papier dans divers centres d'archives. Dans ce contexte, un important travail de « Data rescue », ou sauvetage des données historiques, a été initié au Shom depuis le début des années 2000 afin d'inventorier et de sauvegarder ces nombreuses données historiques encore au format papier pour permettre leur exploitation et valorisation. À ce jour, plusieurs reconstructions ont été réalisées par ou en collaboration avec le Shom, en France métropolitaine (Saint-Nazaire, Dunkerque, Socoa (Saint-Jean-de-Luz), Bourcefranc-le-Chapus, Saint-Malo/Saint-Servan, Brest, etc.) et même à l'étranger (Côte d'Ivoire (Abidjan) et Cameroun (Douala)).

Ces reconstructions ont plusieurs applications : les séries historiques sont les seules fournissant des durées suffisamment longues pour s'affranchir de la variabilité climatique et dégager des vitesses d'élévation séculaire. En outre, en donnant accès à des niveaux extrêmes passés (tempêtes), elles permettent de mieux protéger les littoraux face au risque de submersion marine en améliorant les statistiques sur les périodes de retour des phénomènes extrêmes.

Les expériences et expertises uniques développées au Shom permettent à la France d'être une nation reconnue pour cette activité sur la scène internationale. Ainsi, en 2020, le Shom a co-organisé à l'UNESCO, sur invitation du programme GLOSS de l'COI, un « Sea Level Data Archaeology Workshop » rassemblant de nombreux acteurs internationaux impliqués dans le domaine du sauvetage et de l'exploitation des mesures historiques de niveau d'eau.



## **F**uturisks risques côtiers passés à futurs dans les territoires d'Outre-Mer insulaires tropicaux français : des impacts aux solutions

Xavier Bertin<sup>1</sup>  
Virginie Duvat<sup>1</sup>  
Laurent Testut<sup>1</sup>

[xbertin@univ-lr.fr](mailto:xbertin@univ-lr.fr)

**Mots clefs** : Hydrodynamique littorale, risques littoraux combinés, trajectoires d'exposition et de vulnérabilité, adaptation au changement climatique, solutions fondées sur la nature, incertitudes, approches participatives.

<sup>1</sup> LIENSs, La Rochelle, France

Les îles tropicales sont fortement exposées aux aléas météo-marins (élévation du niveau marin, cyclones, niveaux marins extrêmes, vagues de chaleur marines). Les études récentes projettent une augmentation significative des risques d'érosion côtière et de submersion marine au cours de ce siècle dans ces territoires. Or il existe d'importantes lacunes de connaissances concernant les processus physiques contrôlant les aléas, les impacts des événements météo-marins, ainsi que le degré d'utilisation et les conditions de mise en œuvre et de succès des mesures de réduction des risques et d'adaptation au changement climatique. FUTURISKS vise à combler ces lacunes en se concentrant sur les territoires insulaires tropicaux d'Outre-Mer français afin d'améliorer la compréhension (i) des processus qui contrôlent les aléas littoraux, (ii) des impacts en cascade et des phénomènes d'amplification en jeu dans les événements combinés d'origine météo-marine, et (iii) des politiques de réduction des risques et d'adaptation au changement climatique dans ces territoires. Pour améliorer la compréhension des processus physiques qui contrôlent les niveaux marins extrêmes, FUTURISKS analysera l'ensemble des données instrumentales disponibles dans les territoires insulaires tropicaux d'Outre-Mer français (données marégraphiques du SHOM, données GNSS du Service National d'Observation (SNO) SONEL, données des houlographes du réseau CANDHIS, etc.) et réalisera de nouvelles campagnes de mesure à haute résolution en s'appuyant sur l'infrastructure de recherche ILICO. FUTURISKS accompagne de manière concrète les acteurs publics dans l'observation des phénomènes météo-marins et de leurs impacts, et dans la conception, la mise en œuvre et l'évaluation des politiques et actions de réduction des risques et d'adaptation au changement climatique.



## Saint-Pierre et Miquelon : un territoire vulnérable aux aléas marins

Jean-Pierre Michelin<sup>1</sup>

jean-pierre.michelin@equipement-  
agriculture.gouv.fr

Mots clefs : Vulnérabilité, aléas,  
surveillance, actions, adaptation

<sup>1</sup> Responsable Unité Aménagement  
du Territoire – Direction des Territoires  
de l’Alimentation et de la Mer – Saint-  
Pierre et Miquelon, France

Situé dans le golfe du Saint-Laurent, à une vingtaine de kilomètres des côtes de l’île canadienne de Terre-Neuve et à quelque 4300 km de Paris, l’archipel de Saint-Pierre et Miquelon est le seul territoire français en Amérique du Nord. Le littoral d’environ 200 km de l’archipel est soumis à la fois à un recul du trait de côte qui affecte les côtes rocheuses ou meubles ainsi qu’à des phénomènes de submersions marines dans les zones basses où est implantée la population (Saint-Pierre, hameau de Langlade et Miquelon).

Cofinancé par la DTAM et par la dotation pour charge de service public du BRGM, le projet « VULIT-SPM » a pour objectif de caractériser la vulnérabilité du littoral de Saint-Pierre-et-Miquelon face aux risques de recul du trait de côte et de submersion marine dans un contexte de changement climatique et de tsunami. La phase 1 s’est attachée à dresser un état des lieux de la dynamique côtière et des enjeux et à définir des zones prioritaires à étudier. La phase 2 de l’étude a permis de calculer et de cartographier les aléas actuels et futurs de recul du trait de côte et de submersions marines à l’échelle de 1/5000 sur les sites définis comme prioritaires.

Plusieurs outils de mesures ont été déployés pour surveiller le littoral : un houlographe mis en service en novembre 2011, il permet le relevé en temps réel de phénomène de houle ; deux marégraphes. Le premier est installé depuis le 5 juin 2012 à Saint-Pierre dans le cadre du projet RONIM (Réseau d’observation du niveau des mers) géré par le Shom. Le second est installé depuis juin 2021 à Miquelon. Son installation fait suite au rapport de la commission de catastrophes naturelles (CATNAT) soulignant le manque de d’instruments de mesures sur Miquelon.

Plusieurs actions d’adaptation sont en cours :

**Travaux de protections** de confortement (mise en place de gabions (carte de situation des travaux de confortement littoraux).

**PAPI (programme d’actions prévention d’inondation)**. Situé sur une plaine de basse altitude, le bourg de Miquelon connaît régulièrement des épisodes d’inondation par remontée de nappes et/ou de submersion marine. Ainsi, ce territoire s’est structuré pour mener une démarche de type PAPI qui a permis de définir un programme d’actions opérationnel pour diminuer la vulnérabilité du territoire.

**PPRL (plan de prévention des risques littoraux)**. Prescrit en 2015 par arrêté préfectoral n°129 du 3 mars 2015 et adopté en 2018 par AP n°559 du 28 septembre 2018, il a pour principal objectif de réglementer l’utilisation des sols exposés aux risques littoraux.

**Ateliers des territoires**. Répondre, à une ou plusieurs stratégies d’extension urbaine en s’affranchissant le plus possible des risques liés aux aléas climatiques.



## Développement de l'observatoire du littoral ouest africain

**Boris Leclerc**<sup>1</sup>  
**Moussa Sall**<sup>2</sup>

[boris.leclerc@cerema.fr](mailto:boris.leclerc@cerema.fr)

**Mots clefs :** Marégraphie, littoral,  
risques côtiers, réseau, observatoire

<sup>1</sup> Cerema, Brest, France

<sup>2</sup> Centre de suivi écologique, Dakar,  
Sénégal

Le Centre de suivi écologique est chargé de développer un observatoire du littoral en Afrique de l'ouest dans la logique de mise en réseau d'une douzaine de pays. Pour l'accompagner, le Cerema a réalisé une étude de faisabilité de cet observatoire dès 2020 et appuie sa mise en œuvre opérationnelle. Les objectifs et l'organisation des observatoires régionaux appliqués au littoral peuvent se regrouper sous la phrase « Observer pour mieux comprendre, mieux comprendre pour mieux décider ». Ils peuvent se résumer par :

1. L'amélioration, la valorisation de la connaissance scientifique et technique par la promotion, la production et le partage de données fiables et homogènes au travers de protocoles d'acquisition harmonisés ;
2. La mise à disposition d'un outil d'aide et de partage à la compréhension, la connaissance et la gestion des phénomènes littoraux par la mutualisation des compétences et des moyens pour faciliter l'émergence d'actions communes, la promotion et la participation aux actions destinées à communiquer, sensibiliser et faire participer la société civile afin de diffuser les connaissances et accroître les sources d'acquisition ;
3. La mise en place d'une politique durable et intégrée du littoral en accompagnant l'émergence de nouveaux observatoires locaux, la consolidation des observatoires existants ou d'initiatives locales en terme de suivi du littoral ;
4. L'organisation fonctionnelle de l'observatoire régional.

Pour répondre à ce besoin de connaissance et de partage, le programme WACA appuie les pays ouest africains dans le processus de travail mise en place d'un observatoire régional des risques côtiers du littoral ouest africain accompagnant ces derniers dans leur volonté affichée depuis juillet 2018, de transformer la MOLOA (Mission d'Observation du Littoral Ouest Africain) en observatoire régional.



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

Didier Jourdan<sup>1</sup>  
Audrey Pasquet<sup>1</sup>  
Héloïse Michaud<sup>1</sup>  
Rémy Baraille<sup>1</sup>  
Yann Krien<sup>1</sup>  
Maya Ciavaldini<sup>2</sup>  
Fabien Brosse<sup>1</sup>

[didier.jourdan@shom.fr](mailto:didier.jourdan@shom.fr)

**Mots clefs :** Prévision numérique, TOLOSA, submersions marines, risques littoraux

<sup>1</sup> Shom, Toulouse, France

<sup>2</sup> INSA Toulouse, France

Le Shom contribue à la réflexion et au plan d'action national de mise en œuvre des politiques publiques d'anticipation et de gestion du risque « submersion marine » *via* le maintien d'un réseau d'observations marégraphiques temps réel et *via* le développement et le maintien à l'état de l'art scientifique de moyens de modélisation du milieu marin. Il s'attache aussi à mutualiser les efforts de développements des technologies de prévision numérique et d'amélioration de la connaissance de l'aléa au profit des applications civiles et de la Défense.

Parmi les modèles nouvellement portés par le Shom pour la prévision numérique des submersions marines, la plateforme multi-modèles TOLOSA, qui intègre les versions TOLOSA-SW (Shallow Water) et TOLOSA-LCT (non hydrostatique moyenné), est développée dans le cadre du Projet de Technologies de Défense PROTEVS2+. Le projet TOLOSA repose sur une collaboration universitaire et industrielle croissante (INSA Toulouse, IMAG, INRAE, ICJ Lyon 1, IMPETUS, ...) garantissant une expertise numérique de pointe, et en concertation avec les autres organismes civils acteurs de la prévention des risques côtiers (MTE/SCHAPI, Météo-France, Cerema, BRGM, ...), au travers d'actions communes visant à améliorer la prévision du risque de submersion. Pour la prévision des états de mer, le Shom mène des collaborations actives avec la communauté scientifique (UPPA, ...) sur l'amélioration du modèle WW3 et pilote le développement d'une version implicite du modèle. Sur la base de cette activité d'études amonts, le projet *Homonim*, co-piloté par le Shom et Météo-France et financé en partie par la DGPR, s'est fixé pour objectif de transférer et capitaliser ces progrès au profit de l'amélioration continue des capacités opérationnelles de prévision des submersions et, en premier lieu, du dispositif national de vigilance Vagues-Submersion (VVS) de Météo-France. Le challenge est double : améliorer la représentation des processus physiques jusqu'au littoral et aux estuaires dans les modèles numériques, tout en conservant des chaînes de prévision compatibles avec une mise en œuvre opérationnelle, i.e. simples, fonctionnelles et peu coûteuses en temps calcul.

Les avancées apportées par TOLOSA et WW3 seront abordées en regard des objectifs scientifiques qu'imposent ce challenge sur une meilleure compréhension des phénomènes océanographiques, et sur l'amélioration de la qualité et des fonctionnalités des systèmes d'analyses et de prévisions océaniques des échelles régionale à littorale.

Une revue rapide des futures capacités opérationnelles de prévision qui en découlent sera présentée au travers de la présentation de la nouvelle configuration TOLOSA-SW, qui sera intégré dans le dispositif de la VVS (façade Atlantique à ~ 100m de résolution) dès 2023, et du prochain maillon capacitaire du dispositif de vigilance que constitue la modélisation couplée TOLOSA-SW/WW3 aux échelles littorales (~ 10 - 40 m de résolution) ; Ce maillon est l'interface entre la VVS nationale et des dispositifs de vigilance locaux utilisant notamment des approches vague à vague par de la modélisation non hydrostatique.



## **LITTOSCOPE : estimer les futurs risques de submersion côtière à partir d'observations satellites**

**Claire Dufau**<sup>1</sup>  
**Olivia Fauny**<sup>1</sup>,  
**Solange Lemai-Chenevier**<sup>2</sup>  
**Fabrice Dazin**<sup>1</sup>  
**Franco Fontanot**<sup>1</sup>  
**Deborah Idier**<sup>3</sup>  
**Rodrigo Pedreros**<sup>3</sup>  
**Konrad Rolland**<sup>1</sup>  
**Philippe Schaeffer**<sup>1</sup>  
**Jochen Hinkel**<sup>4</sup>  
**Frederic Bretar**<sup>2</sup>

[cdufau@groupcls.com](mailto:cdufau@groupcls.com)

**Mots clefs** : Submersion, satellite,  
altimétrie, niveau moyen, optique,  
MNT

<sup>1</sup> Collecte Localisation Satellite,  
Toulouse, France

<sup>2</sup> CNES, Toulouse, France

<sup>3</sup> BRGM, Orléans, France

<sup>4</sup> J. Hinkel

Parmi les nombreux effets du changement climatique, l'élévation du niveau des océans et l'occurrence d'événements météorologiques extrêmes entraîneront inévitablement des épisodes d'inondations côtières, rongant temporairement ou définitivement le littoral. Relevant le défi de cartographier les risques d'inondations côtières et d'évaluer leurs risques socio-économiques à partir des satellites d'observation de la Terre, le projet LITTOSCOPE, soutenu par le CNES dans le cadre du Space Climate Observatory (SCO), a mis en avant l'utilisation des données satellitaires pour informer les territoires côtiers de l'impact de la montée des océans.

La cartographie des risques d'inondation côtière s'appuie d'une part sur des images satellites Pléiades, à partir desquelles est dérivé un modèle numérique de terrain (MNT) haute résolution (0,5 m), et d'autre part sur les tendances du niveau de la mer estimées à partir des missions altimétriques depuis 1993 associées à l'intensité décennale des ondes de tempête et de marée. L'ajustement vertical du MNT sur le niveau moyen des mers est un point clé pour projeter correctement les estimations de tendances observées. Pour cela la Surface Moyenne Océanique dérivée de l'altimétrie ou le niveau moyen marégraphique local ont été utilisés sur des sites de démonstration en France : la presqu'île de Gâvres (4,5 km<sup>2</sup>) en Bretagne et une zone plus large (102,4 km<sup>2</sup>) autour des étangs près de Palavas-les-Flots sur la côte méditerranéenne.

Cette communication exposera les principales étapes et résultats du projet, en insistant en particulier sur l'ajustement du MNT sur le niveau moyen des mers.



**Jour 2**

Mardi 18 octobre 2022

**O**bservation du niveau marin  
au profit des politiques publiques  
et de la recherche



## **OSIRISC- Litto'Risques: un exemple d'observatoire des risques côtiers co- construit entre gestionnaires et scientifiques**

**Nicolas Le Dantec**<sup>1</sup>  
**Alain Hénaff**<sup>2</sup>  
**équipe OSIRISC**<sup>3</sup>

**[nicolas.ledantec@univ-brest.fr](mailto:nicolas.ledantec@univ-brest.fr)**

**Mots clefs :** érosion, submersion marine, observatoire, co-construction, vulnérabilité systémique, transfert de compétences, science et société

<sup>1</sup> Université de Brest, IUEM UAR 3113 et GO UMR CNRS 6538, 29280, Plouzané, France

<sup>2</sup> Université de Brest, IUEM, LETG UMR CNRS 6554, 29280, Plouzané, France

<sup>3</sup> Université de Brest, IUEM (UAR 3113, LETG UMR CNRS 6554, GO UMR CNRS 6538, AMURE UMR CNRS 6308), Plouzané et LP3C EA 1285, Brest, France

On s'interroge ici sur la place de la communauté scientifique dans la mise en œuvre des politiques publiques, dans le contexte général du transfert progressif de certaines missions ou responsabilités de l'Etat vers les collectivités locales, dont fait partie la gestion des risques d'érosion et submersion marine. Le changement climatique va accentuer les phénomènes d'érosion et de submersion, auxquels de nombreux territoires littoraux sont déjà confrontés. Prévoir ses conséquences sur les aléas d'érosion côtière et de submersion marine à l'échelle locale reste un exercice délicat. Les estimations d'élévation future du niveau marin, combinées avec les niveaux extrêmes de tempêtes, permettent de cartographier les zones exposées à la submersion marine. Les projections d'évolution du trait de côte sont aussi possibles à partir de la connaissance des évolutions passées. Elles sont cependant insuffisamment robustes, les évolutions induites par les modifications des forçages météorologiques étant difficilement prévisibles. Sur de nombreux secteurs littoraux, ces 2 aléas sont étroitement couplés, et le remodelage de l'espace littoral, qui dépend fortement du disponible sédimentaire, est d'autant plus complexe à prévoir. En outre, la temporalité des processus, la réorganisation du matériel sédimentaire, la succession de séquences de recul, d'avancées parfois, et d'épisodes de submersion, peuvent difficilement être appréhendées.

Pourtant, les acteurs, en premier lieu les collectivités locales, avec l'aide des services de l'Etat, doivent aujourd'hui engager leurs territoires sur une trajectoire d'adaptation face à ces risques, en élaborant des stratégies à moyen et à long termes, des échelles de temps qui dépassent largement la durée de leurs mandats. Ils ont besoin d'outils d'aide à la décision, notamment de prédictions fiables de l'évolution de la position du trait de côte, et certainement aussi de bénéficier d'un accompagnement qui leur permette de mieux comprendre à la fois les déterminants de la vulnérabilité de leur territoire, et les limites et incertitudes associées aux prédictions de l'évolution du littoral.

L'exemple de l'ObServatoire Intégré des RISques Côtiers en Bretagne, OSIRISC, et de son déploiement en Finistère dans le cadre du partenariat Litto'Risques, permet d'illustrer l'intérêt d'une démarche co-construite entre scientifiques et gestionnaires, à la fois pour élaborer des méthodes et outils interdisciplinaires d'étude et de suivi à long terme de la vulnérabilité systémique des territoires littoraux à l'érosion et la submersion marine, mettre à disposition des outils d'aide à la décision, et accompagner les collectivités dans leurs stratégies de gestion des risques côtiers.



## Appui du Cerema à la mission RDI sur le littoral : Capitalisation des données pour l'aide à la décision en gestion de crise : La fiche « tempête »

Sabine Cavellec<sup>1</sup>  
Céline Trmal<sup>2</sup>  
Franck Charrier<sup>2</sup>  
Rachel Puechberty<sup>3</sup>

[sabine.cavellec@cerema.fr](mailto:sabine.cavellec@cerema.fr)

**Mots clefs :** submersion marine, aléas météo-marins, tempêtes, dommages à la côte, missions RDI, DDTM

<sup>1</sup> Cerema REM

<sup>2</sup> Cerema Méditerranée

<sup>3</sup> Schapi

La Mission de Référent Départemental Inondation (RDI) (MRDI) a été mise en place au sein des DDT(M) par la circulaire interministérielle du 28 avril 2011. Son secteur d'intervention initialement composé du réseau fluvial surveillé a été élargi au réseau fluvial non surveillé et au littoral par la note technique du 29 octobre 2018. Elle appuie techniquement le préfet en préparation, en gestion et en post-crise inondation, et lui apporte une aide à la décision en matière de protection des biens et des personnes.

Le Cerema intervient en appui de la MRDI, sous la tutelle de la DGPR/SRNH/Schapi et en collaboration avec Météo-France, le Shom, les DREAL, les SPC et les DDTM selon 3 axes :

- (1) un appui à l'animation nationale du réseau,
- (2) une participation au parcours de formation pour faciliter l'appropriation des différents outils mis à la disposition des MRDI Littoral et
- (3) un appui méthodologique.

Sur le littoral, la méthode des analogues a ainsi été développée afin de répondre aux objectifs de la MRDI qui sont de traduire les données météo-océaniques expertisées, en termes de dommages à la côte. Les conditions météo-océaniques de la tempête en cours sont alors comparées à celles d'une tempête historique dont les dommages à terre sont connus. Plusieurs scénarios de risques sur un tronçon de littoral sont ainsi définis. Cependant, cette méthode comporte certaines limites : (1) pas de travaux réalisés sur les systèmes de protection depuis la tempête référencée ; (2) pas de changement notoire de l'urbanisation et (3) pas de changement important de la configuration du littoral. Il faut donc, dans un premier temps, réaliser un inventaire quasi-exhaustif de tempêtes caractéristiques, choisies en concertation avec Météo-France, dans chaque département, sur les tempêtes récentes et dans des secteurs à enjeux. Les informations sur les paramètres météo-océaniques (pression, vent, hauteurs de vagues et niveaux marins) (partie aléas) et les dommages sur le littoral (partie conséquences à terre) sont alors bancarisés sous forme de « fiche tempête » (tableur), transposable sous SIG afin de simplifier l'accès aux données et être le plus opérationnel possible en crise.

Actuellement, des tests de remplissage de ces fiches tempêtes sont en cours sur l'arc Méditerranéen et en Finistère. Le Cerema travaille notamment sur l'automatisation du remplissage de la partie aléas des fiche tempête (élaboration de routines et moissonnage de bases de données : candhis, data.shom, Météo-France). Des travaux sont également menés avec le BRGM pour exploiter la base de données du réseau tempête en Occitanie, en se concentrant sur les tempêtes caractéristiques déjà renseignées.

Tous ces travaux sur le littoral faisant intervenir de nombreux partenaires (État, Météo-France, Shom, Cerema, BRGM, collectivités, etc.) sont autant d'outils qui permettent d'améliorer la préparation et la gestion de crise pour le risque de submersion marine. Ils ont également pour but d'améliorer les seuils de vigilances vagues-submersion.



## Le Centre national d'alerte aux tsunamis (CENALT) : retour sur 10 ans de fonctionnement

Aurélien Dupont<sup>1</sup>  
Pascal Roudil<sup>1</sup>  
Hélène Hébert<sup>1</sup>  
Philippe Heinrich<sup>1</sup>  
Audrey Gailler<sup>1</sup>

[aurelien.dupont@cea.fr](mailto:aurelien.dupont@cea.fr)

Mots clefs : Tsunami, marégraphie, sismologie, alerte, Cenalt, Unesco

<sup>1</sup> CEA, DAM, DIF, 91297 Arpajon, France

Le Centre national d'alerte aux tsunamis (CENALT) est établi depuis le 1<sup>er</sup> juillet 2012 au CEA/DAM (Centre de Bruyères le Châtel), en partenariat avec le CNRS et le SHOM, et au profit des ministères de l'Intérieur et de l'Ecologie. Un opérateur de permanence y surveille H24, 7j/7, la sismicité en Méditerranée et Atlantique NE, et applique les procédures prévues pour alerter en moins de 15 min les autorités de Sécurité Civile d'un fort séisme potentiellement déclencheur d'un tsunami pouvant impacter les côtes françaises. Construit dans une dynamique internationale portée par l'Unesco/COI, le CENALT échange également des données et messages d'alerte avec ses homologues de la région (Turquie, Grèce, Italie, Portugal), et y est accrédité depuis 2016 en tant que Tsunami Service Provider (TSP). L'alerte aux tsunamis repose sur la surveillance sismologique continue, grâce à l'interprétation rapide des données sismologiques reçues de différents réseaux, permettant d'élaborer le message d'alerte vers les autorités en moins de 15 min. Si un tsunami a été déclenché, le suivi marégraphique permet de préciser les hauteurs d'eau mesurées, et d'affiner les messages vis-à-vis de sites potentiellement exposés.

Nous présentons le bilan des événements détectés depuis 2012 au Cenalt, et des messages envoyés. Les activités du Cenalt comportent également des exercices réguliers avec les autorités, et l'accompagnement des autorités locales pour la préparation aux alertes tsunami. Une partie de ces actions s'appuie sur la simulation numérique des effets attendus dans les ports, qui sera à terme réalisée en cours d'alerte.



## Suivi des impacts de la subsidence, et de la montée du niveau marin relatif, à Mayotte

Matthieu Jeanson<sup>1,2</sup>

Thomas Claverie<sup>1,3</sup>

Sophie Morisseau<sup>1,3</sup>

Sarah Charroux<sup>1,2</sup>

Aline Aubry<sup>1,2</sup>

[matthieu.jeanson@univ-mayotte.fr](mailto:matthieu.jeanson@univ-mayotte.fr)

**Mots clefs :** Mayotte, Subsidence, remonté du niveau marin, plage, récifs coralliens, inondation marine

<sup>1</sup> Centre Universitaire de Mayotte, Mayotte, France

<sup>2</sup> ESPACE-DEV, Univ Montpellier, IRD, Univ Antilles, Univ Guyane, Univ Réunion, Montpellier, France

<sup>3</sup> MARBEC, Univ Montpellier, CNRS, IRD, IFREMER, Montpellier, France

Mayotte connaît depuis mai 2018 une crise tellurique inédite qui se manifeste notamment par un essaim sismique toujours actif mi-2022. L'origine de cette crise est liée au vidage d'un réservoir magmatique situé à environ 50 km à l'est de l'île et à une profondeur de 30/40 km et qui s'est manifesté également par la création d'un nouvel édifice volcanique d'une hauteur 820 m de hauteur par rapport au plancher océanique. L'analyse des données des stations GNSS disponibles sur Mayotte ont également permis de mettre en évidence des mouvements du sol depuis la mi-juillet 2018 avec un déplacement de l'ensemble des stations d'environ 21 à 25 cm vers l'est et d'une subsidence d'environ 10 à 19 cm selon leur localisation sur l'île. Depuis fin 2020, les déformations sont devenues négligeables. Cette subsidence s'accompagne d'une élévation du niveau marin relatif bien visible à partir des enregistrements de la station marégraphique de Dzaoudzi. Ces valeurs de subsidence observées à Mayotte depuis mai 2018 apparaissent être remarquables et offrent une rare occasion d'examiner in situ les conséquences de l'élévation du niveau de la mer sur les formes sédimentaires littorales et la biocénose associée. Les mesures de profils topo-bathymétriques, réalisées sur plusieurs plages et récifs frangeants depuis le début de la crise, n'ont pas permis de montrer de changements morphologiques notables par rapport à des profils antérieurs effectués en 2006/2008. Cela suggère que la subsidence rapide mais limitée n'a pas affecté de manière significative les systèmes sédimentaires littoraux. Les changements de profil mesurés reflètent les variations saisonnières de l'énergie des vagues, ainsi que l'effet des apports locaux de sédiments terrigènes. L'élévation du niveau de la mer causée par la subsidence entraîne cependant une inondation plus fréquente, lors des périodes de grandes marées d'équinoxe, de certaines zones basses d'arrière-plages et de routes sur les côtes nord-est de Mayotte. Enfin, les analyses préliminaires des répercussions écologiques réalisées *in situ* (photogrammétrie de colonies coralliennes) et par télédétection (classifications supervisées de scènes Sentinel-2 et Pléiades) ne nous permettent pas encore de mettre en évidence un changement drastique des communautés récifales (compris dans les marges d'erreurs) suggérant que le système ne semble pas avoir réagi de manière notable à la subsidence et à la montée du niveau marin relatif associé. Une surveillance continue et de plus amples analyses seront nécessaires pour confirmer cette tendance dans les années à venir.



## Observation and simulation of the meteotsunami generated in the Mediterranean Sea by the Tonga eruption on 15 January 2022

Philippe Heinrich<sup>1</sup>  
Audrey Gailler<sup>1</sup>  
Aurélien Dupont<sup>1</sup>  
Vincent Rey<sup>2</sup>  
Constantino Listowski<sup>1</sup>  
Hélène Hébert<sup>1</sup>  
Emmanuel Forestier<sup>1</sup>

[philippe.heinrich@cea.fr](mailto:philippe.heinrich@cea.fr)

Mots clefs : Tsunami, marégraphie, météotsunami, simulation, Cenalt

<sup>1</sup> CEA, DAM, DIF, 91297 Arpajon, France

<sup>2</sup> Université de Toulon, Aix-Marseille, CNRS/INSU, IRD, Institut Méditerranéen d'Océanologie, France

Le 15 janvier 2022, l'explosion du volcan Hunga-Tonga a généré une onde de Lamb planétaire qui s'est propagée globalement, en déclenchant un tsunami observé à l'échelle planétaire. Une première onde atmosphérique est arrivée 20 heures après l'éruption au niveau des côtes françaises de la Méditerranée, en se propageant du nord au sud. Une seconde onde en provenance d'Afrique a été observée quatre heures après, avec une amplitude atténuée. La première onde peut être décrite au premier ordre comme une onde en N, ou comme une sinusoïde, avec une période proche de 50 min et une amplitude de 130 Pa. En Méditerranée, le tsunami a été observé sur la plupart des marégraphes côtiers (radars, capteurs de pression). Les stations françaises ont ainsi enregistré des amplitudes de quelques centimètres jusqu'à 10 centimètres, avec des périodes de 10 à 60 min.

La simulation du tsunami a été réalisée avec le code opérationnel Taitoko (Heinrich *et al.*, 2021) pour différentes sources atmosphériques. Les équations en ondes longues non linéaires sont résolues avec une méthode aux différences finies, avec un système de grilles bathymétriques imbriquées. Le tsunami est généré par un gradient de pression exprimé analytiquement. La comparaison entre les modèles et les observations est satisfaisante pour la plupart des sites. Un test de sensibilité montre la dépendance des résultats vis-à-vis notamment de la résonance portuaire locale.



## Déplacements verticaux à la côte estimés par GNSS et leur importance dans l'étude de l'évolution du niveau de la mer

Guy Wöppelmann<sup>1</sup>  
Médéric Gravelle<sup>2</sup>

[guy.woppelmann@univ-lr.fr](mailto:guy.woppelmann@univ-lr.fr)

**Mots clefs :** Déplacements verticaux de la Terre solide, GNSS, GPS, marégraphes, niveau de la mer

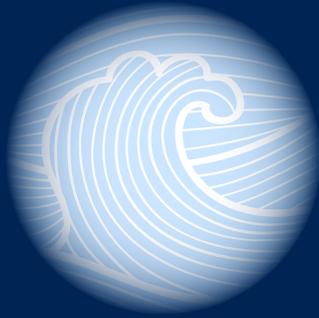
<sup>1</sup> UMR 7266 LIENSs, La Rochelle Université, France

<sup>2</sup> UMR 7266 LIENSs, CNRS, France

Dans cet exposé nous abordons la problématique des déplacements verticaux à la surface de la Terre solide et leur importance dans les études sur l'évolution du niveau global de la mer et, dans celles plus locales, des changements à la côte et de leurs impacts. Les processus géophysiques à l'origine de ces déplacements sont nombreux et complexes. Leur connaissance est imparfaite. La plupart du temps, leur modélisation fait défaut pour les prédire à un niveau de précision suffisant pour les confronter aux processus climatiques, qui font évoluer le volume des océans. Cependant, les méthodes d'observation de la géodésie spatiale ont par ailleurs fait des progrès considérables pour les estimer et mieux les connaître. C'est le cas du GNSS (Global Navigation Satellite System), dont le système américain GPS est le plus connu. Des campagnes de réanalyse des mesures GNSS de stations permanentes sont régulièrement organisées par le service international GNSS (IGS), afin de prendre en compte de manière uniforme les derniers modèles et corrections adoptés par l'IGS.

La dernière réanalyse de l'IGS vient de s'achever. Des différences significatives dans les estimations des déplacements verticaux par GNSS sont parfois observées entre les différents groupes. Nous présentons ici les résultats de ceux qui contribuent aujourd'hui à la composante GNSS du système d'observation SONEL ([www.sonel.org](http://www.sonel.org)), à savoir le GFZ (Potsdam, Allemagne), le JPL (Pasadena, Etats-Unis), le NGL (Nevada, Etats-Unis) et ULR (La Rochelle, France). Nous examinerons les niveaux d'accord à l'échelle globale, puis les discuterons plus en détail sur quelques études de cas, en particulier aux stations de Brest (France) et Newlyn (Royaume-Uni), en les mettant en relation avec les choix dans les stratégies d'analyse des mesures GNSS par les différents groupes.

Enfin, si le temps le permet, nous expliquerons comment accéder à ces estimations des déplacements verticaux sur le portail SONEL et concluons par des perspectives en cours de discussion dans le cadre du programme mondial d'observation du niveau de la mer GLOSS, qui se trouve sous l'égide de la COI/UNESCO et dans lequel se place la composante GNSS de SONEL.



## Les satellites altimétriques comme moyen de mesure de la marée et de la hauteur de la mer près des côtes du Golfe de Guinée

Lucrèce Djeumeni Noubissie<sup>1,2</sup>

Florence Birol<sup>2</sup>

Raphaël Onguene<sup>1</sup>

Fabien Leger<sup>2</sup>

Fernando Niño<sup>2</sup>

[djeumenilune@gmail.com](mailto:djeumenilune@gmail.com)

**Mots clefs :** Golfe de Guinée, Élévation du niveau de la mer, Marée, X-TRACK/ALES

<sup>1</sup> LTSA, Université de Douala, Douala, Cameroun

<sup>2</sup> LEGOS, Université Paul Sabatier, Toulouse, France

Les zones côtières de l'Afrique sont des zones généralement très basses, vulnérables et impactées par le changement climatique. Elles sont cependant très faiblement instrumentalisées ce qui rend très difficile les études sur l'élévation du niveau de la mer dans ces régions. L'objectif de cette étude est d'analyser si ce déficit peut être (au moins partiellement) comblé par l'altimétrie satellitale qui fournit maintenant environ 30 années de mesures précises des variations du niveau de la mer. Cette technique qui, au début, ne permettait d'observer la topographie de l'océan qu'aux échelles globale à régionale, avec une absence de données à moins de 30-50 km de la côte (à cause de la contamination terrestre et l'écho radar et de corrections inadaptées), nous fournit désormais des informations fiables très proche de la côte (0 à 20 km) grâce à un retraitement spécifique. Ces données de variations du niveau de la mer, couvrant la quasi-totalité des régions côtières mondiales et libre d'accès, pourraient être utilisées en complémentarité des marégraphes existants (ou comme une alternative lorsque ces derniers sont absents) pour plusieurs types d'application. Dans cette étude, nous analysons la possibilité de les utiliser pour la mesure de la marée et le suivi long terme du niveau de la mer dans le Golfe de Guinée, à moins de 10 km de la côte. Nous utilisons le produit altimétrique récent X-TRACK/ALES (Birol *et al.*, 2021) dont la résolution le long de la trace est de ~350m et qui est comparé aux données marégraphiques disponibles. Pour chaque trace altimétrique interceptant la côte, nous avons défini des stations virtuelles côtières en faisant la moyenne des 20 points altimétriques les plus proches de la terre. La comparaison aux marégraphes est effectuée en calculant la corrélation et la RMSE des séries temporelles de hauteur d'eau. Ensuite, on compare les constantes de marée des deux jeux de données. Le calcul de la marée s'est fait à partir de l'outil Pytide (réalisé par Sam Cox et corrigé par le CTOH) qui, basé sur l'analyse de marées de Schureman, nous permet de faire une décomposition harmonique [Survey and Schureman, 1958]. On compare également la marée reconstruite des stations virtuelles à celle des stations marégraphiques réelles pour évaluer l'erreur sur la hauteur d'eau instantanée. Pour finir, la comparaison entre marégraphes et stations virtuelles altimétriques est faite en terme de tendance du niveau marin côtier. De manière générale, les résultats statistiques des stations virtuelles sont cohérents avec ceux des stations marégraphiques, avec une corrélation plus faible (0.45) à la station de Sao-tomé à cause d'une faible quantité de données. Les marégraphes virtuels arrivent à reproduire la marée avec des valeurs d'erreur complexe inférieur à 3 cm. L'écart de marée observé entre les deux jeux de données est fortement lié à la position du marégraphe et la complexité de la marée sur la zone : en effet les observations ne sont pas co-localisées. En ce qui concerne le suivi long terme du niveau de la mer, des études supplémentaires pour quantifier et/ou diminuer les erreurs de détermination des tendances altimétriques sont nécessaires. On retrouve malgré tout les même valeurs de tendances du niveau de la mer à certaines stations virtuelles et à certains marégraphes.



## La côte de Guyane : une dynamique côtière extrême, un défi pour l'observation et l'instrumentation

Guillaume Brunier<sup>1</sup>  
Antoine Gardel<sup>1</sup>

[guillaume.brunier@cnr.fr](mailto:guillaume.brunier@cnr.fr)

**Mots clefs :** Littoral amazonien,  
estuaires, bancs de vase, mangrove,  
observations hydrodynamiques

<sup>1</sup> CNRS-UAR LEEISA, Cayenne,  
Guyane, France

La Guyane Française, en Amérique du Sud, fait partie de côte vaseuses sous influence sédimentaire de l'Amazone. Les sédiments fins du fleuve Amazone s'exportent vers l'Ouest sous forme de gigantesques bancs de vases (emprise de plusieurs kilomètres vers le large et de dizaines de kilomètres le long de la côte) en direction du delta de l'Orénoque au Venezuela. Ces superstructures côtières sont extrêmement dynamiques : l'immense turbidité subtidale dissipe l'énergie des houles permettant la construction des vasières intertidales très étendues qui seront colonisées par la mangrove (évolution du trait de côte de plusieurs dizaines à centaines de mètre par an), dans le même temps l'arrière du banc de vase, dépourvu d'une turbidité suffisante, subit l'assaut des houles enregistrant une érosion rapide (jusqu'à 300 mètres par an). Cette dynamique côtière impacte notablement les dynamiques hydro-morpho-sédimentaires des estuaires de Guyane par un colmatage récurrent des embouchures qui peuvent être dans certain cas déviées (exemple du fleuve de la Mana). Les estuaires des fleuves de Guyanes sont dominés soit par le régime d'écoulement fluviale pour les plus grands (exemple : Maroni) soit par l'influence de la marée pour les plus petits (ex : Cayenne et Mahury). Le régime de précipitation équatorial génère des débits particulièrement importants au regard de la taille de leur bassin versant : le fleuve Maroni, similaires à la Seine (taille et bassin versant), affiche un débit moyen près de trois fois supérieur due au régime équatorial de pluviométrie. La diversité des processus côtiers et estuariens et leur intensité liée à la migration des bancs de vase fait que la Guyane est particulièrement sujette aux aléas de mobilité du rivage (accumulation massive à la côte / érosion massive sur les zones moins turbides), d'envasement, de submersions côtières et aux inondations. Les efforts de recherche et de suivi des dynamiques côtières et estuariennes pour en comprendre les processus, les représenter et les intégrer dans des politiques publiques d'aménagement du territoire se sont intensifiés au cours des 10 dernières années. Ces côtes sont difficiles à instrumenter et surveiller de par leur extrême mobilité. Ce territoire manque par conséquent cruellement d'une instrumentation et d'un suivi pérennes : un seul marégraphe (Ile Royale face à Kourou) enregistre des données sur le temps long d'évolution du niveau marin. Les états de mer sont peu observés en détails malgré l'installation une bouée CANDHIS depuis 2007 dont les mesures sont régulièrement interrompues. Les estuaires, à part celui du Mahury (port de Dégrad des Cannes) près de Cayenne, sont dépourvus de marégraphes. Ainsi, comprendre l'impact des variations du niveau marin sur la dynamique côtière et estuarienne ainsi que sur l'écosystème mangrove est actuellement difficile. L'absence d'un réseau d'observation des paramètres hydrodynamiques est par ailleurs un frein vers approche de modélisation des processus côtiers et estuariens. Des projets d'instrumentations ont néanmoins été proposés récemment (exemple : projet OHLTIM) permettant d'espérer une connaissance plus fine de l'un des systèmes côtiers les plus dynamique au monde.



**Jour 3**

Mercredi 18 octobre 2022

**J**ournée estuaires



## Changement climatique et élévation du niveau de la mer : quelles conséquences pour les estuaires ?

Gonéri Le Cozannet<sup>1</sup>

[g.lecozannet@brgm.fr](mailto:g.lecozannet@brgm.fr)

Mots clefs : Élévation du niveau de la mer, risques côtiers, GIEC

<sup>1</sup> BRGM, unité Risques Côtiers et Changement Climatique, Orléans, France

Le changement climatique et l'élévation du niveau de la mer sont une menace importante pour les zones côtières. Le 6<sup>e</sup> rapport du GIEC marque un tournant dans la communication de la science de l'adaptation côtière et estuarienne vers les décideurs. En effet, les projections de niveau marin ont été étendues bien au-delà de 2100, rappelant que nous sommes devant plusieurs siècles d'élévation du niveau de la mer, plus ou moins rapide selon le succès des politiques climats à venir. De plus, un scénario d'effondrement de l'Antarctique de l'Ouest est désormais présenté de manière explicite et quantifiée dans le rapport du GIEC. Pour les estuaires, cette élévation du niveau de la mer signifie en premier lieu une aggravation des risques de submersions chroniques à marée haute et lors de tempêtes. Ces risques peuvent être aggravés par une modification des régimes de pluie, de l'hydrologie fluviale ou de l'estuaire lui-même, que ce soit par des processus sédimentaires ou des interventions humaines. Historiquement, une réponse à ces risques a été de renforcer les défenses côtières telles que la barrière estuarienne de la Tamise, qui protège Londres en Angleterre des submersions à marée haute. Ce type d'approche présente le risque de réaliser l'adaptation au détriment des écosystèmes côtiers. Une autre réponse consiste à dé-poldériser des marais estuariens, afin d'atténuer les pics de tempêtes, mais l'efficacité de cette approche n'est pas garantie pour une élévation du niveau de la mer très rapide. Tous ces modes de gestion ont des conséquences importantes pour les personnes et les écosystèmes, et l'adaptation dans ce domaine reste souvent incrémentale, focalisée sur un aspect particulier de l'adaptation, tel que la sécurité d'infrastructures et de personnes face à l'adaptation. À terme, ce type d'adaptation peut amener à des impasses. Une adaptation transformationnelle consisterait à repenser la gestion des estuaires dans leurs dimensions géomorphologiques, sociales, écologiques et économiques, et en prenant en compte les caractéristiques régionales et locales de chaque site. Cependant, la faisabilité d'une telle transformation est compromise en cas de dépassement des objectifs de l'accord de Paris de stabiliser le réchauffement climatique en-deçà de 2° C au-dessus de la période préindustrielle. En effet, les biotas estuariens sont très sensibles à l'augmentation de la température, à l'aggravation des submersions et de la salinisation en périodes sèches, ainsi qu'à l'eutrophisation, l'hypoxie et, de plus en plus, l'acidification des eaux estuariennes. Par ailleurs, mettre en place ce type d'approche nécessiterait un effort significatif en recherche sur l'adaptation des estuaires, sujet relativement sous-étudié au regard des enjeux sociaux, économiques et environnementaux qu'il recouvre. Enfin, le rapport du GIEC met en évidence que l'adaptation prend beaucoup de temps à se mettre en place, typiquement plusieurs décennies. Ainsi, pour les estuaires comme pour les autres milieux côtiers, nous faisons face à une double urgence : d'une part s'adapter à l'augmentation des risques pour les personnes, les infrastructures et les écosystèmes ; d'autre part limiter le réchauffement climatique bien en-deçà de 1,5° C afin de donner du temps à l'adaptation.



## Dynamique de marée dans l'estuaire du Wouri, Cameroun

Yannick Fossi Fotsi<sup>1,2,3</sup>

Isabelle Brenon<sup>1</sup>

Nicolas Pouvreau<sup>4</sup>

Yann Ferret<sup>4</sup>

Alexa Latapy<sup>4</sup>

Raphaël Onguene<sup>2</sup>

Jacques Etame<sup>2</sup>

fossiyanick@gmail.com

**Mots clefs :** Estuaire du Wouri, modélisation numérique, analyse harmonique non stationnaire, asymétrie de la marée

<sup>1</sup> UMR 7266 LIENSs, CNRS, La Rochelle Université, France

<sup>2</sup> Ufd de bio-géosciences et environnement, Université de Douala, Cameroun

<sup>3</sup> Ifremer, Plouzané, France

<sup>4</sup> Shom, Brest, France

La compréhension de la dynamique des marées dans les estuaires peu profonds est d'une importance capitale pour évaluer l'influence des paramètres qui les contrôlent. Dans la présente étude, une analyse complète des marées dans l'estuaire du Wouri (Cameroun) a été faite avec un modèle numérique bidimensionnel à haute résolution. L'implémentation et la calibration de ce modèle ont révélé sa précision dans la prédiction des propriétés de la marée sur l'ensemble du système. Une analyse harmonique non stationnaire (S\_TIDE) et l'asymétrie des marées, nous ont permis de quantifier les changements de l'amplitude de la marée et de l'asymétrie de la marée dans l'estuaire du Wouri. Les mesures du niveau d'eau ont révélé une atténuation de l'onde de la marée lorsqu'elle se propage vers l'intérieur des terres, avec une réduction notable de l'amplitude de la marée. Ce phénomène est également amplifié par l'augmentation du débit des fleuves. Les valeurs des combinaisons des constituants de marée utilisées pour quantifier l'asymétrie des marées, impliquant les interactions entre les constituants astronomiques seules ainsi qu'avec les harmoniques supérieures ont révélé l'interaction M2-M4 comme principal contributeur à l'asymétrie de la marée, suivie par l'interaction M2-S2-MS4. Des valeurs positives d'asymétrie de marée ont été observées dans la partie supérieure de l'estuaire, avec une augmentation prononcée en amont conduisant à un schéma global d'asymétrie de marée dominée par le flot et inversement par le jusant dans la partie inférieure avec des valeurs négatives. Ces résultats ont permis de qualifier l'estuaire du Wouri de tidal dans sa partie inférieure et de fluvial dans sa partie supérieure. L'évolution de l'amplitude et de l'asymétrie des marées peut dépendre de manière significative des variations du débit de fleuve et de la morphologie de l'estuaire.



## Propagation de la marée et interactions fluvio-tidales dans l'estuaire de la Gironde

Julie Cheynel<sup>1</sup>  
Isabel Jalón-Rojas<sup>1</sup>  
Sophie Defontaine<sup>1</sup>

[julie.cheynel@u-bordeaux.fr](mailto:julie.cheynel@u-bordeaux.fr)

Mots clefs : Estuaire, Rivière tidale, Marée, Déformation, Analyse harmoniques non stationnaires

<sup>1</sup> UMR 5805 EPOC, Univ. Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, Pessac, France

Si la marée est aujourd'hui prédite de façon assez précise sur les côtes, il n'en est pas de même dans les estuaires. En effet, la morphologie du site, la friction du fond, ou encore le débit fluvial sont à l'origine de la déformation de l'onde de marée lors de sa propagation vers l'amont. Ces phénomènes sont encore mal compris, particulièrement dans les rivières tidales, où l'influence fluviale est très importante. Cette étude porte sur le système estuarien macrotidal de la Gironde-Garonne, qui est à dominance du flot, avec un fort débit fluvial et un bouchon vaseux très concentré. L'objectif de cette étude est d'analyser les propriétés de la marée au cours de sa propagation dans l'estuaire et la rivière tidale. Les paramètres physiques utilisés pour caractériser la déformation de la marée sont le marnage, l'intensité de la déformation  $A_{M_4}/A_{M_2}$ , et la direction de la déformation  $2\varphi_{M_2} - \varphi_{M_4}$ . Pour les calculer, une analyse harmonique non stationnaire a été réalisée grâce à la méthode S-TIDE, à partir de données de hauteur d'eau issues de 1 marégraphes, entre 2017 et 2022. Le débit fluvial impacte fortement le marnage et  $A_{M_4}/A_{M_2}$  à partir de Bordeaux. À Cadillac par exemple, le marnage est réduit de plus de 40 % lorsque l'on passe d'un débit fluvial de 100 m<sup>3</sup>/s à un débit de 1000 m<sup>3</sup>/s. La présence d'un seuil en débit pour le maximum de  $A_{M_4}/A_{M_2}$  a été observée pour les stations amont, valant 1500 m<sup>3</sup>/s pour Cadillac et 1000 m<sup>3</sup>/s pour Langon.  $2\varphi_{M_2} - \varphi_{M_4}$  diminue lors de la propagation dans l'estuaire, mais est peu affectée par le débit fluvial, même dans la partie amont. Ce paramètre dépend en revanche du marnage à l'embouchure. Par exemple, dans l'estuaire central, et pour un faible débit fluvial,  $2\varphi_{M_2} - \varphi_{M_4}$  vaut 90° de moins pour les marnages de plus de 4 m que pour les marnages de moins de 2.5 m, ce qui correspond à une forte intensification de la dominance du flot lors de l'augmentation du marnage à l'embouchure. L'influence de la rugosité du fond sur le marnage aux environs de Bordeaux a également été mise en évidence, avec une augmentation du marnage après le passage du bouchon vaseux pouvant dépasser 25 cm, pour un débit fluvial moyen. Les résultats de cette étude sont d'une grande utilité pour la sécurité de la navigation, la prédiction des risques d'inondation, la gestion des territoires, ainsi que pour toute modélisation précise du transport des sédiments et des contaminants.



## Jumeaux numériques territoriaux de l'estuaire de la Gironde

Fabrice Klein<sup>1</sup>

[f-klein@bordeaux-port.fr](mailto:f-klein@bordeaux-port.fr)

Mots clefs : modélisation, estuaire, Gironde, TELEMAC, satellite, oxygène, turbidité, Open source

<sup>1</sup> Grand Port Maritime de Bordeaux, France

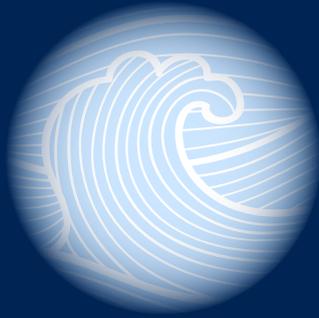
Dans la cadre de France Relance, le Grand Port Maritime de Bordeaux (GPMB) a initié une opération dont l'objectif est d'accélérer le développement d'outils numériques autour des multiples usages du fleuve. À cette occasion, le port a souhaité élargir la démarche à d'autres acteurs de l'eau et de la vie fluviale, afin d'en démultiplier les bénéfices axés sur les nouvelles potentialités offertes par les nouvelles technologies.

En effet, à la suite du projet GIRONDE XL 3D (GPMB, soutien de l'Europe et de la Région Aquitaine) portant sur la modélisation 3D de l'estuaire pour les activités de dragage, le GPMB a souhaité développer les jumeaux numériques du fleuve.

Ces outils vont s'appuyer sur les différents modèles existants et sur une mutualisation et une interopérabilité des données recueillies *in situ*, en ayant recours à l'instrumentation actuelle, mais aussi à d'autres sources de données, dont les images satellites.

L'objectif est de créer des outils numériques opérationnels dès 2023, adossés à une grande puissance de calcul et qui pourront ainsi répondre, à l'échelle du bassin, à de multiples enjeux et en particulier aux conséquences du changement climatique. Les attentes des acteurs de l'eau et du fleuve autour de la notion de résilience climatique et de l'économie durable sont multiples et variées ; dragage, pêche, navigation, environnement, risque de submersion...

La réponse aux besoins de simulations du comportement de la Garonne, la Dordogne et de l'Estuaire de la Gironde jusqu'en 2050 à partir d'hypothèses sur les évolutions de certains paramètres physiques, comme par exemple le débit amont, ou encore la turbidité qui alimente le bouchon vaseux, sera facilitée et économiquement plus accessible grâce au développement de ces nouveaux outils.



# Utilisation des techniques de Deep Learning pour la reconstruction des niveaux d'eau de l'estuaire de la Seine

Julien Deloffre<sup>1</sup>  
Imad Janbain<sup>1</sup>  
Abderrahim Jardani<sup>1</sup>

[Julien.deloffre@univ-rouen.fr](mailto:Julien.deloffre@univ-rouen.fr)

Mots clefs : LSTM, niveaux d'eau,  
marégraphe, Estuaire de Seine

<sup>1</sup> Université de Rouen, France

Dans ce travail, nous explorons l'efficacité des algorithmes de Deep Learning (de type LSTM : Long Short Term Memory) pour reconstruire des données manquantes de niveau d'eau sur un ensemble de stations installées sur la partie maritime de la Seine. Dans cette zone, les variations de niveau d'eau sont la résultante de la concomitance de plusieurs processus hydrologiques qui sont liés aux fluctuations de la marée, aux écoulements souterrains de l'aquifère karstique, au ruissellement, aux contributions d'autres rivières secondaires et à l'effet du barrage en amont. Toutes ces contributions (et leurs interactions) sont trop complexes pour identifier leur degré d'influence sur les niveaux d'eau de la Seine, ce qui fait de leur intégration dans un modèle physique une tâche complexe. Pour cette raison, l'utilisation d'outils d'apprentissage automatique présente un avantage intéressant pour traiter ces processus non linéaires sans avoir besoin d'invoquer les propriétés physiques de l'environnement conditionnant les flux. L'algorithme que nous avons développé appartient à la nouvelle génération d'algorithmes d'apprentissage profond et s'appuie sur l'analyse statistique d'une grande base de données pour établir une relation entre les séries temporelles de variables utilisées comme entrées et sorties d'un réseau LSTM. La relation établie prend en compte l'effet des dépendances temporelles existant sur les séries temporelles analysées. Le réseau que nous avons développé nous avons développé est en capacité de remplir les valeurs manquantes sur des périodes de 6 mois de données horaires avec une grande flexibilité grâce aux résultats de remplissage précis indépendamment de l'emplacement de la partie manquante dans la série ou de sa taille.



## Présentation des conventions de la DGPR avec Météo France et le Shom

Bruno Janet<sup>1</sup>  
Etienne le Pape<sup>1</sup>  
Antoine Lhermitte<sup>2</sup>  
Sybille Muller<sup>2</sup>

[bruno.janet@developpement-durable.gouv.fr](mailto:bruno.janet@developpement-durable.gouv.fr)

**Mots clefs :** submersion marine,  
Vigilance, feuille de route, convention,  
opérateurs

<sup>1</sup> SCHAPI, Toulouse, France

<sup>2</sup> MTECT/DGPR/SRNH/SDCAP/BRIL,  
La Défense, France

La DGPR gère l'ensemble des risques concernant le territoire national. Son service des risques naturels et hydrauliques comporte le bureau des risques inondation et littoral (BRIL), qui pilote et coordonne les outils de prévention des inondations, sur l'ensemble des aléas hydrauliques ainsi que le Schapi qui pilote la prévision des crues et la vigilance crues, y compris dans les estuaires.

Pour mener à bien leurs missions, ces services s'appuient sur des opérateurs, établissements publics spécialisés, et pour le domaine qui concerne notre journée, particulièrement sur le SHOM et Météo France.

Le SHOM apporte son expertise sur la connaissance des états de la mer et niveaux marins. Les observations du niveau marin constituent une source d'information primordiale de la chaîne opérationnelle de la vigilance vagues-submersion et de l'alerte pour les risques de submersion par tsunamis. Le Shom dispose d'un réseau de marégraphes, RONIM, développé avec l'aide de subventions de la DGPR

Météo France intervient sur la connaissance des conditions météorologiques, et plus précisément les prévisions et observations de pression, de vent et de précipitations, mais également pour le développement de la vigilance vague submersion.

Une convention spécifique a par ailleurs été signée pour le financement du projet de recherche Homonim, piloté conjointement par le SHOM et Météo France et destiné à fournir une capacité de modélisation à plus haute résolution, et proche des côtes.

Pour organiser la répartition des rôles entre les opérateurs, en évitant les doublons et les sujets orphelins, renforcer leur synergie et obtenir une cartographie de leur mobilisation, la DGPR leur a demandé d'écrire des feuilles de route sur les thèmes principaux de son domaine d'intervention, comme le risque de débordement de cours d'eau, le ruissellement ou les submersions marines. Pour cette dernière, le pilotage a été confié au tandem BRGM-CEREMA, et associe outre le SHOM et Météo France, l'INRAE, l'ONF, l'Université Gustave Eiffel et l'IGN. Elle comporte trois grands axes de travail :

- Axe A : Connaissance des phénomènes initiateurs pour caractériser les submersions marines
- Axe B : Gestion et prévention du risque de submersion marine
- Axe C : Information, partage et diffusion de la connaissance



## Homonim-3 : avancées à mi-parcours

Didier Jourdan<sup>1</sup>  
Audrey Pasquet<sup>1</sup>  
Héloïse Michaud<sup>1</sup>  
Rémy Baraille<sup>1</sup>  
Yann Krien<sup>1</sup>  
Maya Ciavaldini<sup>2</sup>  
Fabien Brosse<sup>1</sup>  
Laurie Biscara<sup>1</sup>  
Yann Ferret<sup>1</sup>  
Denis Paradis<sup>3</sup>  
Patrick Ohl<sup>3</sup>  
Alice Dlaphinet<sup>3</sup>  
David AYACHE<sup>3</sup>  
Christophe Bataille<sup>3</sup>  
Komlan Kpogo-Nuwolko<sup>3</sup>

[didier.jourdan@shom.fr](mailto:didier.jourdan@shom.fr)

Mots clefs : Prévision numérique, TOLOSA, WaveWatchIII, submersions marines, risques littoraux, estuaires, ...

<sup>1</sup> Shom, Toulouse, France

<sup>2</sup> INSA, Toulouse, France

<sup>3</sup> Météo France, Toulouse, France

*Homonim-3* est la 3<sup>e</sup> phase du programme *Homonim*, réalisé par le Shom et Météo-France, sous maîtrise d'ouvrage du ministère de la transition écologique par l'intermédiaire de la Direction Générale de la Prévention des Risques.

L'objectif général d'*Homonim* est d'améliorer en continu les capacités opérationnelles de prévision du risque de submersion marine. Dans la phase-3 cet objectif a été décliné selon deux axes de d'amélioration : continuer à faire progresser le système opérationnel national de référence de la Vigilance Vagues-Submersion de Météo-France et préparer la transition vers la prévision des zones de submersions potentielles.

Concrètement il s'agit d'une part d'améliorer le réalisme des modèles à proximité de la côte pour fournir des prévisions des niveaux marins, surcotes et vagues plus performantes à l'échelle des portions de territoires à enjeux ou complexes (estuaires, zones semi-fermées), et de mieux appréhender et exploiter les incertitudes sur la prévision. Pour l'étape suivante, il s'agit aussi que cette capacité fournisse un « écosystème de modélisation » adapté à l'alimentation de systèmes de prévision plus locaux, et prépare les futurs outils de prévision numérique aptes à décrire les processus littoraux et compatibles avec une mise en œuvre opérationnelle.

Les orientations techniques choisies dans *Homonim-3* reposent sur le développement d'un modèle non hydrostatique vague à vague (moyenné sur la verticale), ainsi que sur la montée en résolution spatiale. Ce dernier objectif sera atteint par :

- 1/ le développement de la plateforme multi-modèles TOLOSA permettant de modéliser la dynamique à l'aide de grilles non-structurées et de schémas numériques innovants et performants,
- 2/ l'implication du modèle WW3 et
- 3/ le développement de fonctionnalités de descente d'échelle et de couplage garantissant une simplicité de mise en œuvre opérationnelle.

Les avancées techniques du projet à mi-parcours seront présentées : description et résultats de la configuration de façade Tolosa-ATL prévue pour intégration dans le dispositif de la VVS en avril 2023, apports pour la production opérationnelle et évolutions attendues du dispositif VVS. Les travaux de R&D en cours seront abordés (développements numériques significatifs, recueil et analyse de données *in situ*), ainsi que ceux prévus pour 2023-2024, portant sur la modélisation couplée vagues/niveaux/courants, estuarienne (Gironde) et la modélisation vague à vague non hydrostatique, au regard des avancements récents.



## **P**révisions « toutes eaux » sur l'estuaire de la Loire

**Matthieu Nicolas<sup>1</sup>**  
**Stéphane Marlette<sup>1</sup>**  
**Etienne Le Pape<sup>1</sup>**  
**Fanny Sentenac<sup>1</sup>**

[matthieu.nicolas@developpement-durable.gouv.fr](mailto:matthieu.nicolas@developpement-durable.gouv.fr)

**Mots clefs :** Estuaire, marée, prévision, modélisation, Loire

<sup>1</sup> DREAL Pays de la Loire, Nantes, France

Le bassin versant de la Loire couvre à son embouchure 1/5ème de la surface de la France et la variabilité des débits observés à la station hydrométrique la plus en aval (de 50 m<sup>3</sup>/s en août 1949 à 6100 m<sup>3</sup>/s en 1910) est importante, générant des difficultés autant en crue qu'en étiage. Le Service de Prévisions des Crues Maine-Loire aval réalise des prévisions graphiques toute l'année sur la Loire pour répondre aux différents besoins en matière de navigation, d'inondation et d'alimentation en eau.

Dans l'estuaire, l'effet de la marée complexifie notablement l'élaboration des prévisions en hauteur aux stations de vigilance. Le modèle Mascaret Loire estuaire, mis en place avec le SCHAPI (Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations), a permis dans un premier temps la réalisation de prévisions en crue et/ou surcotes importantes dans l'estuaire. Il est depuis quelques années utilisé pour l'ensemble des conditions fluvio-maritimes permettant de répondre aux différents besoins. Avec les sécheresses récentes d'une part et la nécessité de cartographier les inondations d'autre part, la création de nouveaux points de prévision apparait comme indispensable et la modélisation hydraulique permet de mettre en place rapidement ces prévisions.

Les performances et les faiblesses du modèle seront présentées en fonction des différentes conditions aux limites. L'expertise humaine reste à ce jour utile pour corriger les éventuels biais de calage dû principalement à la gamme importante de débit étudiée.



## Outils de modélisation sur les côtières bretons

Antonin Rivat<sup>1</sup>

[antonin.rivat@developpement-durable.gouv.fr](mailto:antonin.rivat@developpement-durable.gouv.fr)

**Mots clefs :** Estuaire, vigilance crues, prévision opérationnelle, modélisation, simplification

<sup>1</sup> SPC VCB, Rennes, France

Au titre du réseau surveillé par Vigicrues, le service de prévision des crues Vilaine Côtiers Bretons surveille certains cours d'eau jusqu'à leur partie estuarienne. Pour faire face à la diversité des configurations territoriales comme des différents impératifs liés à la production de la vigilance crues, toute une gamme d'outils a été développée ces 10 dernières années. Avec un objectif de fonctionnement en temps réel, ces modèles se doivent de respecter un compromis entre temps de calcul réduit et phénomène complexe. Les premiers types de modèles visaient principalement la prévision au pic de marée, tenant compte des éléments de perturbation de la marée astronomique : surcote atmosphérique, conditions fluviales et risque de concomitance entre pleine mer et pic de crue fluviale. Sur certains bassins rapides (Morlaix, Quimper), l'incertitude temporelle est primordiale. Certains estuaires (dont la Laïta) présentent des configurations sensibles à l'orientation de la mer du vent. L'estuaire de l'Aulne présente lui un ouvrage mobile anti-marée. Enfin, la zone de Morlaix présente de possibles débordements d'écoulements urbains souterrains.

La gamme de modèle développée en première intention se basait sur une analyse statistique des critères prépondérants.

Afin d'améliorer la donnée de prévision fournie, des modèles hydrauliques ont été produits sur plusieurs des bassins estuariens (Odet, Laïta opérationnels depuis plusieurs années, Aulne conclu en 2022). L'introduction de ces modèles hydrauliques dans la chaîne opérationnelle a permis la production de prévisions couvrant l'ensemble du marnage maritime (prévision seule du pic de pleine mer auparavant), ainsi que la production de cartes de zones inondées potentielles. L'introduction d'une autre gamme de modèle renforce également l'expertise des prévisions : en ouvrant sur une démarche de prévisions contradictoires, le risque de dérive liée à l'outil de calcul est fortement réduit.

Des limites à la pratique subsistent néanmoins, avec la présence d'ouvrages au comportement difficilement prédictible (manœuvres humaines), une forte incertitude temporelle résiduelle sur la concomitance entre bassin rapide et tenue de la pleine mer, et la limite technique d'intégration des conditions d'écoulement souterrain dans la zone de Morlaix dans les contraintes opérationnelles (temps de calcul limité).



## Cartographie des zones d'inondation potentielle en estuaire

Thomas Belin<sup>1</sup>  
Marie Morin<sup>2</sup>  
Stéphane Piney<sup>2</sup>

[thomas.belin@developpement-durable.gouv.fr](mailto:thomas.belin@developpement-durable.gouv.fr)

**Mots clefs :** Estuaire, vigilance crues, cartographie du risque d'inondation, modélisation hydraulique, tenue de plein, période de retour

<sup>1</sup> SPC VCB, Rennes, France

<sup>2</sup> SPC SACN, Rouen, France

La cartographie des zones d'inondation potentielle a pour objectif d'associer à une hauteur maximale attendue à une station hydrométrique la cartographie correspondante des inondations : enveloppe et aléas (classes de hauteur d'eau). Elle constitue un outil déterminant pour la préparation et la gestion de crise inondation. Elle doit de ce fait répondre à un besoin d'utilisation synthétique.

i) D'une part, la production de ces cartes suppose d'associer à chaque station hydrométrique (dont les marégraphes en estuaire) sa zone d'influence, à savoir le secteur géographique, plus ou moins étendu vers l'amont et/ou vers l'aval le long du cours d'eau concerné, pour lequel la hauteur mesurée à la station est représentative du phénomène d'inondation constaté sur le terrain (quel que soit l'évènement, l'emprise inondée restera similaire sur toute la zone d'influence pour la même hauteur mesurée à ladite station). Il doit donc y avoir, sur la zone d'influence, univocité du lien entre hauteur à la station et zone inondée.

En estuaire, les débordements diffèrent selon la nature de l'évènement associé aux cotes de pleines mers (maritime, fluvial, fluvio-maritime), rendant difficile la délimitation de la zone d'influence des stations.

À travers l'exemple de l'estuaire de Odet, il s'agira d'aborder la méthodologie mise en œuvre dans un cas complexe combinant la confluence de 3 cours d'eau et l'influence maritime, dans l'objectif de rendre la production de ces cartes la plus opérationnelle possible pour les élus et les gestionnaires de crise (SPC VCB).

ii) D'autre part, sur une même zone d'influence, la seule cote instantanée maximale de pleine mer n'est dans certains cas pas suffisante pour caractériser la zone d'inondation potentielle correspondante. En effet la durée des débordements est dépendante de la forme des marégrammes, et une même cote instantanée maximale de pleine mer peut être associée à des marégrammes de formes différentes, engendrant des inondations distinctes (exemple du Val de Port Jérôme sur la Seine).

À travers l'exemple de la Seine, on montrera la nécessité, dans ces situations, d'introduire la notion de « tenue de plein », dont une définition sera apportée en première approche, et de caractériser sa variabilité au droit de chaque marégraphe. Elle conduit aussi à réinterroger la notion de période de retour telle que caractérisée jusqu'à aujourd'hui en estuaire (SPC SACN).



## Impact de la hausse du niveau de l'océan sur la vigilance crue dans les estuaires de l'Adour et de la Seine

Estelle Marchand<sup>1</sup>,  
Marie Morin<sup>1</sup>  
Laurent Diéval<sup>2</sup>  
Yan Lacaze<sup>2</sup>

[marie.morin@developpement-durable.gouv.fr](mailto:marie.morin@developpement-durable.gouv.fr)

**Mots clefs :** Changement climatique, vigilance crues, risque d'inondation, modélisation hydraulique, estuaire de Seine

<sup>1</sup> SPC SACN, Rouen, France

<sup>2</sup> SPC GAD, Bordeaux, France

Les fleuves de l'Adour et de la Seine (de l'aval jusqu'à Poses) sont soumis à la fois à l'influence de la marée et aux crues fluviales. Les services de Prévision des Crues Gironde-Adour-Dordogne (SPC GAD) et Seine-aval-Côtiers Normands (SPC SACN) sont en charge de la surveillance des inondations sur ces cours d'eau et de la production de cartes de zones d'inondation potentielle (ZIP) à destination des services de gestion de crise et du grand public. Dans le cadre du changement climatique, les SPC GAD et SACN ont étudié l'impact probable de la hausse du niveau moyen de la mer sur les inondations des secteurs aval de l'Adour et de la Seine aval, tant en termes de fréquence qu'en termes d'extension spatiale. Cette analyse porte sur les conditions de forçage maritime des modèles hydrauliques utilisés sur ces secteurs, en s'appuyant sur des scénarios de changement climatique et leurs conséquences sur la hauteur des eaux océaniques. En effet, à l'aide des outils de modélisation hydraulique et cartographique exploités au SPC GAD et SACN, il est possible d'évaluer les conséquences prévisibles pour les services opérationnels et les territoires de l'évolution continue du niveau marin à l'horizon de 2100. En isolant la partie maritime et en fixant l'hydrologie de crue, cette analyse met en évidence l'évolution de la contribution de l'influence maritime sur la vigilance crue des tronçons surveillés : l'augmentation de la fréquence des débordements, et l'extension des zones inondées.



## Jaugeage dans l'estuaire de l'Adour

Laurent Dieval<sup>1</sup>  
Sylvain Chesneau<sup>1</sup>  
Vincent Dourdet<sup>1</sup>

laurent.dieval@developpement-durable.gouv.fr

Mots clefs : Jaugeage, vigilance crues, modélisation hydraulique, estuaire de l'Adour

<sup>1</sup> DREAL Nouvelle Aquitaine - SPC GAD, Bordeaux, France

Le Service de Prévision des Crues Gironde-Adour-Dordogne (SPC GAD) réalise des prévisions de hauteur d'eau sur les trois estuaires que sont la Gironde, l'Adour et la Nivelle. Pour cela, il prend en compte les prévisions de surcote de Météo-France, les marées du Shom et l'état des débits des cours amonts. L'une des principales difficultés de cet exercice est la variété des comportements des hauteurs : les crues du fleuve n'affectent pas les stations proches de la façade océanique, par contre très en amont les signaux de marée s'effacent, enfin entre les deux il existe une zone où les ondes de marées sont toujours visibles lors d'un passage de crue.

Actuellement, les prévisionnistes disposent de modèles numériques opérationnels élaborés à partir des codes hydrauliques 1D (Mascaret et Mage) ou 2D (Télémac). Ils affinent les résultats des modèles en s'appuyant sur des relations empiriques permettant de prévoir les pleines mers. Il arrive régulièrement lors d'événements tempétueux importants et/ou de crues fluviales que l'exercice de la prévision de hauteur en estuaire devienne très délicat en raison des différentes sources d'incertitudes.

Pour améliorer la qualité de ses outils de prévisions opérationnels, le SPC GAD a entrepris une campagne de jaugeage sur un estuaire avec les objectifs suivants : Trouver des stations de mesures de hauteurs par trop éloignées l'une de l'autre, des profils en travers pas trop important pour que les mesures à l'ADCP ne durent pas plus de 2 minutes, réaliser des mesures des hauteurs et débits sur un cycle complet de marée soit environ 13 h, développer une base de données des mesures et la possibilité de l'exploiter pour nos outils.

L'estuaire qui répond au mieux à l'ensemble de ces contraintes est celui de l'Adour. À l'issue de cette campagne de mesures, le SPC GAD a essayé de reproduire les hauteurs et débits observés grâce à ses modèles hydrauliques opérationnels 1D. On constate que les hauteurs sont en concordance avec les mesures par contre les débits y mal estimés en temps et quantités. Avec l'INRAé de Lyon il a été tenté d'élaborer des courbes de tarages en milieu fluvio-maritime, mais pour le moment les résultats ne sont pas très probants. Peut-être une approche par les méthodes d'apprentissage devra être testée...