

## Modélisation des niveaux marins extrêmes associés à la circulation des cyclones Lenny (1999) et Omar (2008), commune de saint-pierre, littoral nord-ouest de la Martinique

Alexandre Nicolae Lerma, Yves François Thomas, Pascal Saffache, Paul Durand et Mathieu Lamy

Volume 14, numéro 3, décembre 2014

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/1034948ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

### Éditeur(s)

Université du Québec à Montréal  
Éditions en environnement VertigO

### ISSN

1492-8442 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

### Citer cet article

Nicolae Lerma, A., Thomas, Y. F., Saffache, P., Durand, P. & Lamy, M. (2014). Modélisation des niveaux marins extrêmes associés à la circulation des cyclones Lenny (1999) et Omar (2008), commune de saint-pierre, littoral nord-ouest de la Martinique. *VertigO*, 14(3).

### Résumé de l'article

Les submersions marines sont le plus souvent associées à des conditions météorologiques locales de tempête et aux phénomènes bien connus de surcote résultant du cumul de l'effet barométrique inverse et des vents d'afflux. Le déferlement des vagues joue également un rôle prépondérant dans la surélévation totale. Il provoque des variations du niveau d'eau de deux types : une surélévation statique du niveau moyen (surcote de vague) et des variations instantanées provoquées par le jet de rive. Ces deux phénomènes sont responsables dans certains cas de plus de 2/3 de la surélévation totale. Lors de la circulation des cyclones Lenny et Omar, le littoral ouest de l'île de la Martinique a été considérablement affecté. Les surélévations du niveau marin lors du passage au large de ces deux cyclones ont été reconstituées pour le nord-ouest de l'île et particulièrement sur les plages de la commune de St Pierre. Les facteurs de variations du niveau marin ont été décomposés et modélisés en emboîtement d'échelles à partir des modèles ADCIRC pour les composantes de marée et de surcotes météorologiques, SWAN pour la propagation des vagues en zone côtière et les surcotes de vague et enfin pCOULWAVE pour le jet de rive. Ce travail de décomposition des facteurs de variations du niveau marin, associé à la reconstitution par enquêtes de terrain et témoignages, des limites des inondations, met en avant la vulnérabilité de la commune face aux houles cycloniques et la nécessité de prendre en compte l'ensemble des facteurs de variation du niveau marin dans l'étude de l'aléa de submersion et les documents de prévention des risques.



Alexandre Nicolae Lerma, Yves François Thomas, Pascal Saffache, Paul Durand et Mathieu Lamy

# Modélisation des niveaux marins extrêmes associés à la circulation des cyclones Lenny (1999) et Omar (2008), commune de saint-pierre, littoral nord-ouest de la Martinique

## Introduction

- 1 Basés sur les données enregistrées par les marégraphes et l'analyse des surcotes (Costa et al., 2004; Bouligand et Pirazzoli, 1999; Simon, 1994), les travaux récents sur le risque de submersion proposent d'ajouter à l'analyse des composantes marégraphiques et météorologiques, les variations de niveaux marins provoquées par les vagues de tempête (Nicolae et al., 2013; Kennedy et al., 2012; Anselme et al., 2011; Cariolet et Suanez, 2009; Salmon et al., 2007; Healy et Dean, 2000). Sur les côtes soumises à de puissantes houles, où la plateforme continentale est peu étendue et où les pentes sont abruptes comme sur certaines îles volcaniques, les surélévations causées par les vagues peuvent dépasser celles des surcotes météorologiques. Intégrer les surélévations causées par les vagues est donc essentielle pour rendre compte des zones potentiellement sinistrées. Les études anglo-saxonnes d'ingénierie côtière offrent des outils pour l'estimation des processus hydrodynamiques en zone de déferlement par des formules paramétriques (Stockdon et al., 2006 ; Ruggiero et al., 2001 ; Komar, 1998 ; Mase, 1989 ; Nielsen, 1989 ; Holman and Sallenger, 1985). Toutefois, leur utilisation dans certaines conditions (fortes conditions de houles, bathymétrie complexe ou fortes pentes) peut être source d'importantes imprécisions. Le recours à des modèles numériques est de plus en plus répandu, notamment en contexte cyclonique (Kennedy et al., 2012; Dietrich et al., 2011; Mcinnes et al., 2009; Ortiz Royero et al., 2008; Rogers et al., 2007; Chen et al., 2006; Cheung et al., 2003; Hsu et al., 2002). Ils permettent de calculer avec une grande précision aussi bien les variations causées par les facteurs météorologiques (pression atmosphérique, vent) que les variations liées à l'action des vagues dans la zone de déferlement.
- 2 Sur les littoraux des îles françaises de l'arc Caraïbéen, les aléas littoraux sont différenciés en trois catégories au sein des Plans de Prévention des Risques (DDE, 1997; Perret et al., 1996). On parle d'aléa d'érosion dont les limites illustrent la position du trait de côte probable dans 100 ans, d'aléa de « submersion marine » qui délimite les zones vulnérables à la surélévation du niveau marin (surcote et houle cyclonique) et d'aléa de « houle cyclonique » pour les zones soumises à l'action du déferlement de houle. Ces délimitations mises en place à partir de 1999 ont été régulièrement critiquées et contestées notamment par la population et les élus, et les documents originaux ont fait l'objet de nombreux ajustements locaux (Barras et al., 2008; Cospar et al., 2003). Il semble aujourd'hui que la différenciation des aléas « submersion marine » et « houles cycloniques » ne soit pas justifiée et que les délimitations sous-estiment en partie les observations de submersions historiques comme lors des épisodes Lenny et Omar sur le littoral NO de la Martinique.

## Morphologie littorale et exposition

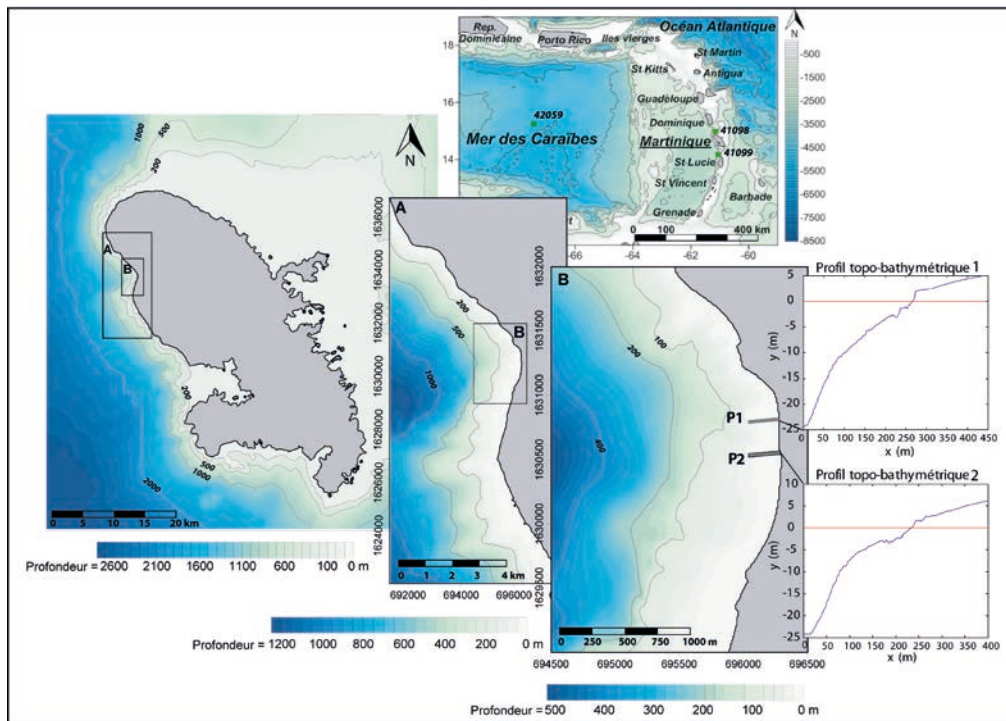
### Le littoral ouest de la Martinique

- 3 Les îles de l'arc Caraïbéen (cf. figure 1) sont battues par des houles dominantes d'orientation est-ouest issues de l'action des vents alizés. Ces houles, même lorsqu'elles sont de hauteurs

importantes, voire extrêmes, n'affectent que très modérément la côte caraïbe à l'ouest des îles (Barras, 2008). Les trains de houles atteignant le littoral ouest contournent l'île par le nord (canal de la Dominique) et les hauteurs significatives sont très faibles. La bouée de Fort-de-France qui bénéficie de cette condition d'abri présente sur la période 2001-2009 (Bouée du Centre d'Étude maritime et fluviale, CETMEF) des données de hauteurs significatives moyennes de 0,30 m avec 98 % des houles inférieures à 0,50 m. Les périodes enregistrées sont

- 4 5 s pour 65 % des enregistrements. Ces valeurs relevées à une trentaine de kilomètres au sud correspondent aux conditions moyennes du secteur de St Pierre.

**Figure 1. Localisation du site d'étude, modèles numériques de bathymétrie (MNB) et profils de plages /Study site location, bathymetric digital model and profiles.**



- 5 Le littoral nord-ouest de l'île de la Martinique est caractéristique des flancs de volcan, avec pour la partie sous-marine comme terrestre des pentes très fortes. Au pied de la montagne Pelée, les plages d'une largeur de quelques mètres sont nettement réfléchissantes avec des pentes comprises entre 5 % au sud et 10 % au nord de la commune. La partie basse de la ville (inférieure à
- 6 5 m par rapport au zéro hydrographique) s'étend sur environ 200 m depuis les plages. Sur cette bande littorale (cf. figure 2) la vulnérabilité est considérable, les constructions sont nombreuses parfois précaires et édifiées directement sur le haut de plage. Cependant, grâce à sa position d'abri, les submersions restent peu fréquentes dans la ville de St Pierre et n'occasionnent des dégâts que lorsque les houles proviennent du nord ou lors de la circulation de cyclones dont les trajectoires sont inversées par rapport au modèle classique de circulation est/ouest.

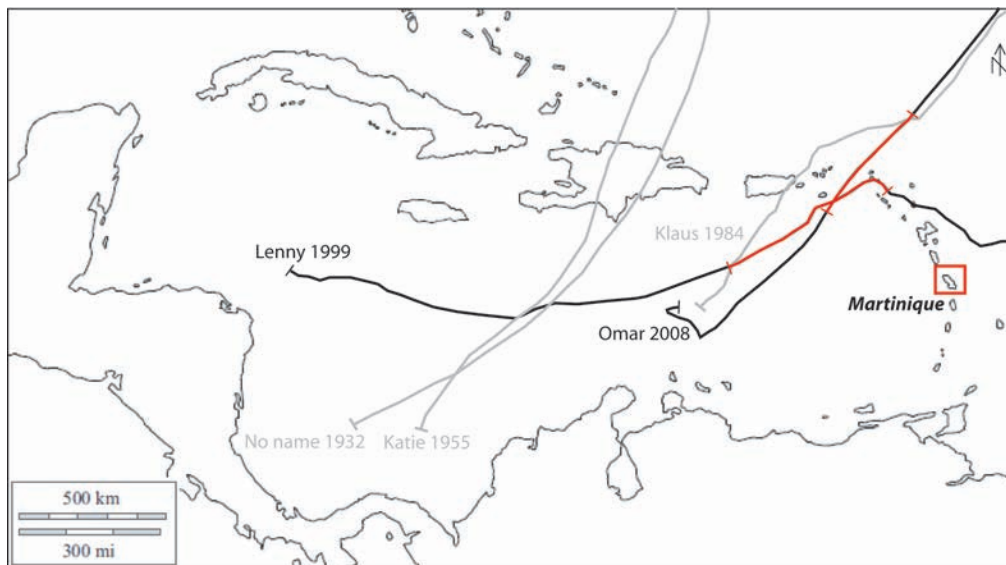
**Figure 2. Vulnérabilité du littoral de St Pierre /St Pierre vulnerability coast.**



## Les cas Lenny et Omar

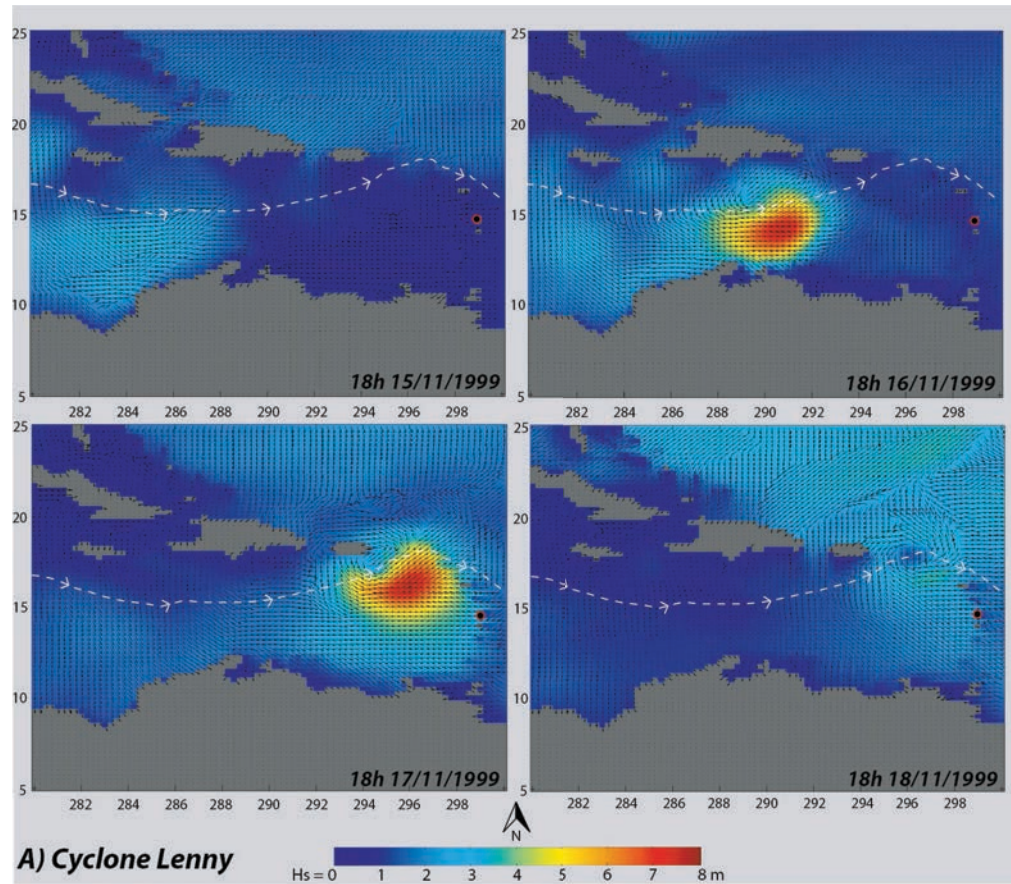
- 7 L'étude des cyclones Lenny et Omar met en évidence deux caractéristiques originales. La première est leur apparition tardive, voire très tardive, par rapport aux dates de la saison cyclonique de l'Atlantique Nord. En effet, les mois d'octobre et de novembre sont traditionnellement des mois de transition durant lesquels les cyclones sont peu fréquents dans la mer des Caraïbes. D'après les données du National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) au mois d'octobre et de novembre, seule une dizaine de cyclones majeurs ont circulé dans l'Atlantique Nord ces cent dernières années. La seconde caractéristique est la trajectoire empruntée par les deux systèmes dépressionnaires, particularité qui est directement à l'origine des inondations qui ont affecté le littoral ouest-martiniquais. Les cyclones naissant dans la mer des Caraïbes et se déplaçant dans des trajectoires SO/NE ont été particulièrement peu observés. Au sein de la base de données Hurricane Data (HURDAT) qui réunit l'ensemble des informations sur les cyclones observés depuis 1851, seuls cinq cyclones ont connu ce type de déplacement (cf. figure 3). Parmi ces cyclones, Lenny fut le plus puissant et le plus tenace. Le système s'est déplacé exclusivement d'ouest en est pendant ses 10 jours d'existence. Il a atteint la catégorie 4 lors de sa sortie du bassin caribéen. Pendant son approche de l'arc des petites Antilles, sa déviation vers le NE a permis d'éviter une rencontre directe avec la façade ouest de la Martinique (cf. figure 4a). Le cyclone Omar de catégorie maximale plus faible (Catégorie 3), a circulé plus proche de la Martinique, mais avec une trajectoire SO/NE plus marquée (cf. figure 4 b), provoquant ainsi des submersions d'ampleurs moins importantes.

**Figure 3. Carte de trajectoire des cyclones caractérisés par une circulation Ouest/Est au sein de la base de données HURDAT / Trajectory map of hurricane characterized by a West/East circulation, in the HURDAT data base.**

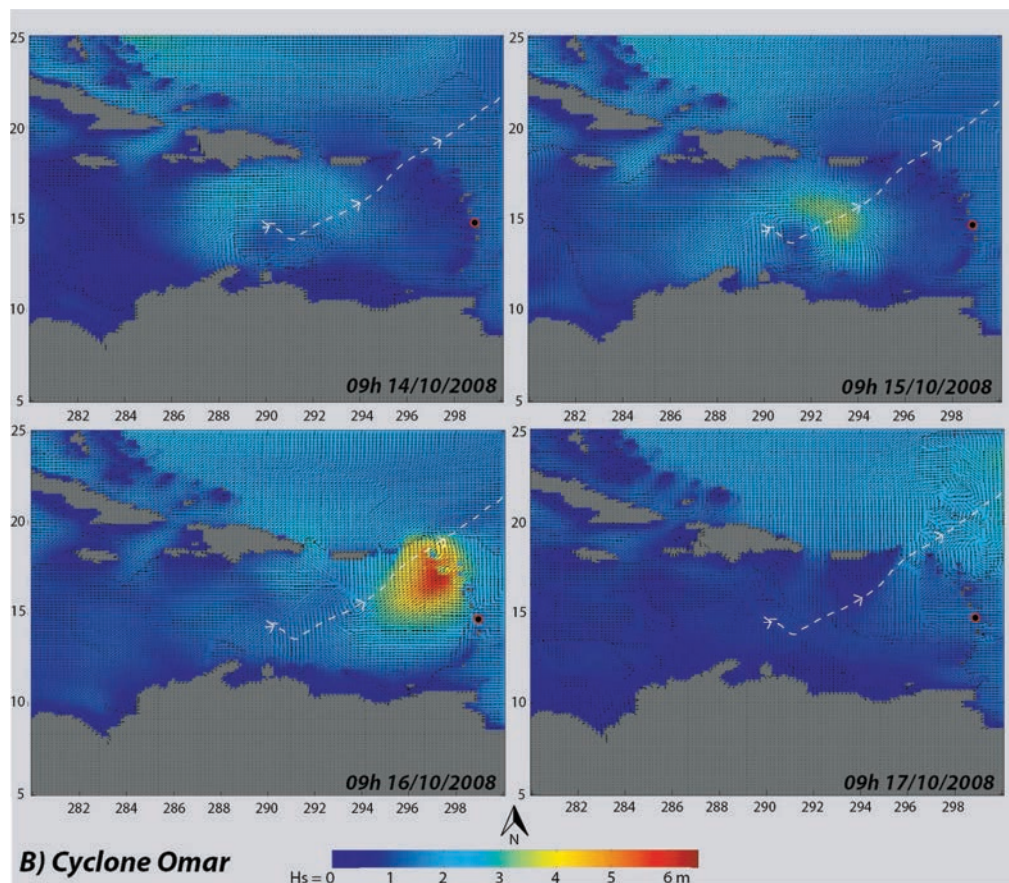




**Figure 4a. Hauteurs significatives des houles générées par le cyclone Lenny. Illustration réalisée à partir des données du modèle WNA du National Centers for Environmental Prediction (NCEP/NOAA) / Swell significant height generated by hurricane Lenny. Illustration realized with WNA model data from National Centers for Environmental Prediction (NCEP/NOAA).**



**Figure 4b. Hauteurs significatives des houles générées par le cyclone Omar. Illustration réalisée à partir des données du modèle WNA du National Centers for Environmental Prediction (NCEP/NOAA) / Swell significant height generated by hurricane Omar. Illustration realized with WNA model data from National Centers for Environmental Prediction (NCEP/NOAA).**



- 8 L'évolution de ces cyclones a été particulièrement suivie par les organismes météorologiques locaux et internationaux. Comme annoncé par les services Météo-France et relayé par les journaux locaux (France Antilles), les conséquences directes des deux cyclones (fortes pluies, vent et surcote de tempête) ont touché le nord de l'arc des petites Antilles et particulièrement St Martin, St Barthélémy et les îles Vierges (Mazurie *et al.*, 1999).
- 9 L'analyse des caractéristiques et des trajectoires par les services météorologiques cf. Tableau 1) laissait présager l'arrivée de fortes houles d'orientation ouest à sud-ouest et conduisait à anticiper d'importants dégâts sur le littoral nord-ouest de l'île. Les conséquences annoncées étaient comparables aux effets de la circulation du cyclone Klaus en 1984 (Saffache *et al.*, 2002), soit un impact relativement modéré. La violence des houles générées par le déplacement des cyclones a pourtant provoqué des dégâts et des submersions d'une ampleur jamais observée (Barras *et al.*, 2008), particulièrement lors de l'épisode Lenny.

**Tableau 1. Caractéristiques générales des cyclones Lenny et Omar /General Lenny and Omar hurricanes characteristic.**

		<b>Lenny</b>	<b>Omar</b>
Caractéristiques générales	<b>Dates</b>	<b>13 au 23 Novembre 1999</b>	<b>13 au 18 Octobre 2008</b>
	Pression atmosphérique min	933 hPa	964 hPa
	Vent Max	250 km/h	205 km/h
Au large de la Martinique	Dates	17/11/99	16/10/08
	Distance de la côte	530 km	480 km
	Pression atmosphérique	946 hPa	967 hPa
	Vent	210 km/h	185 km/h
	Houle au pic	Hs : 3.50m	Hs :2.90m Tp : 9.80s

Tp : 11s

Source : réalisées à partir des « Tropical Cyclone Report » et des données du National Centers for Environmental Prediction (NOAA) / from « Tropical Cyclone Report » and National Centers for Environmental Prediction data (NOAA)

## Méthode et outils

### Décomposition des niveaux marins

L'objet de notre travail est de reconstituer les niveaux marins lors des deux épisodes. La méthode est fondée sur l'individualisation des différents paramètres qui contribuent à l'élévation instantanée de la ligne d'eau

( $\eta$ )

en un point donné. On considère ainsi une valeur de surélévation de type  $\eta_{x,y,t}$ . Cette démarche, inspirée des travaux de Healy et Dean (1999), employée et validée dans plusieurs études (Nicolae et al., 2013 ; Andrade et al., 2013 ; Anselme et al., 2011), permet d'estimer en première approximation, si l'on exclut les variations gravimétriques locales ainsi que les modifications des champs de température et de salinité des eaux, les variations de la ligne d'eau telles que :

$$\eta = \eta_{dat} + \Delta\eta_{mm} + \Delta\eta_f + (\Delta\eta_m + \Delta\eta_{sb} + \Delta\eta_{sa}) + (\Delta\eta_d + \Delta\eta_j)$$

+  $\varepsilon$

- 10  $\eta_{dat}$  niveau zéro soit un datum de marée, référentiel altitudinal servant à reporter les niveaux marins calculés sur une base de données topographique. Pour la France métropolitaine et les territoires ultra-marins, c'est le zéro hydrographique ou niveau de basse mer astronomique extrême, fixé par le Service hydrographique et océanographique de la marine (SHOM) qui fait référence. Il s'agit d'un niveau théorique sous lequel le niveau de la mer ne descend que très exceptionnellement. Le SHOM publie pour chaque zone géographique mondiale une table des « Références altimétriques maritimes (zéros hydrographiques) » qui, outre les niveaux caractéristiques de la marée exprimés par rapport au zéro hydrographique, donne pour les principaux ports les cotes de ce zéro par rapport au repère fondamental local, et de ce repère fondamental dans le système altimétrique légal local (SHOM, 2010). Dans l'étude des variations de la surface libre et l'aléa de submersion, c'est plus généralement le niveau moyen de la mer qui est utilisé. C'est également la référence utilisée pour notre étude.
- 11  $\Delta\eta_{mm}$  variation à long terme du niveau de la mer. Dans ce travail pour lequel nous ne disposons pas d'une chronique marégraphique suffisamment longue pour connaître les rythmes de variation locaux, nous n'aborderons pas la dimension prospective de l'aléa de submersion. On rappellera toutefois que les mesures satellitaires du programme Archivage, Validation et Interprétation des données des Satellites océanographiques (AVISO) présente à l'échelle régionale des variations du niveau moyen de l'ordre de 2 à 3 mm sur la période octobre 1992-février 2012.
- 12  $\Delta\eta_f$  flux continentaux. Sur certains littoraux d'importants apports d'eaux douces peuvent localement provoquer une accumulation formant une lentille qui provoquera une surélévation du niveau moyen. Bien que ce phénomène puisse être envisagé à Saint-Pierre, aux débouchés des rivières torrentielles de la Roxelane et de la Rivière des Pères, nous ne disposons pas d'enregistrement permettant d'apprécier cette composante.
- 13  $\Delta\eta_m$  marée astronomique, elle peut être considérée comme la somme de marées élémentaires strictement périodiques appelées composantes harmoniques. La courbe de marée astronomique est une onde sinusoïdale dont l'amplitude et la phase ne dépendent que du lieu d'observation (Simon, 2008). À la Martinique, les marées sont microtidales (> 0,4 m) de type mixte (diurne et semi-diurne avec une importante inégalité diurne).
- 14  $\Delta\eta_{sb}$  surcote barométrique considérée comme la variation du niveau moyen due à des variations de la pression atmosphérique. Ce phénomène également appelé effet barométrique inverse ou surcote statique est connu depuis les premiers travaux sur l'impact des systèmes dépressionnaires à la côte (Pugh, 1987; Holland, 1980; Pirazzoli, 1973; Harris et al., 1963; Conner et al., 1957; Doodson, 1924). Les variations au niveau de la mer sont de l'ordre (1,01 cm/hPa) (Wöppelmann, 1997). Dans la zone caraïbe, la pression atmosphérique est

- globalement proche de l'équilibre toute l'année. En revanche, les cyclones provoquent des chutes brutales pouvant être responsables localement de surélévations de l'ordre du mètre.
- 15  $\Delta\eta_{sa}$  surcote de vent (wind setup). L'action du vent met l'eau de surface en mouvement dans le sens des vents dominants. Ce mouvement est compensé en sens inverse plus en profondeur, selon le principe de la spirale d'Eckman. Lorsque la profondeur est faible, la quantité d'eau déplacée en surface ne peut plus être compensée par l'eau circulant en profondeur et l'eau aura tendance à s'accumuler. À la côte, ce paramètre dépend donc de l'intensité des vents régionaux et locaux et de la morphologie de la côte, particulièrement la bathymétrie (Dean et Dalrymple, 1991). En première approximation, ce facteur peut être estimé à partir des données fournies par les marémètres et représente la part de la surcote non expliquée par l'effet barométrique inverse. Il n'est cependant qu'approché puisque les conditions d'abri à l'emplacement d'un marégraphe peuvent provoquer des sous-estimations importantes. Sur les côtes des îles volcaniques, son influence est généralement assez faible du fait des fortes pentes et d'une plateforme peu étendue. Dans ces environnements, la part des surcotes causée par les vents est alors réduite en comparaison des surélévations causées par le déferlement des vagues (Kennedy et al., 2012).
- 16  $\Delta\eta_d$  la surcote de vague (Nicolae, 2012; Ardhuin et Rascle, 2006) connue comme *wave setup* dans la littérature anglo-saxonne, intervient sur le littoral, où s'exerce l'action des vagues et dès lors qu'elles subissent des modifications de leur forme et de leur énergie en relation avec la diminution de la profondeur. L'interaction entre les houles et la forme du fond a une incidence sur le niveau moyen de l'eau à la côte (Holman and Sallenger, 1985 ; Guza et Thornton, 1981 ; Longuet-Higgins and Stewart, 1964, 1963). Cette surélévation est dépendante des caractéristiques des vagues et de la morphologie des plages et avant plages. Elle peut atteindre des valeurs supérieures au mètre lors du déferlement de vagues exceptionnelles (Sheremet et al., 2014).
- 17  $\Delta\eta_j$  le jet de rive ou *uprush*, qui correspond au mouvement de projection de l'eau par les vagues sur l'estran. Lors de ce processus, la vague libère la totalité de son énergie cinétique et matérialise le niveau extrême (Stockdon et al., 2006 ; Holman and Sallenger, 1985 ; Guza and Thornton, 1982). Ce mouvement terminal résulte de l'énergie potentielle de la vague incidente et des interactions avec les formes de la plage, les vagues précédentes et les suivantes. Les variations de niveaux provoquées par le jet de rive peuvent atteindre plusieurs mètres. Elles sont généralement déterminées pour des conditions de houles au large comme une valeur d'occurrence statistique correspondant à 50, 33, 10 et 2 % des vagues. Ici conformément à la majeure partie des études, c'est la valeur de *runup* 2 % qui est retenue.

## Modélisation numérique des surélévations du niveau de la mer

- 18 Afin d'estimer l'ensemble des surélévations détaillées dans la formule présentée précédemment, les données observées ont été utilisées en priorité (cf. tableau 2). Concernant les niveaux d'eau, les seules données instrumentales disponibles et exploitables sont les données du marégraphe de Fort-de-France durant le passage du cyclone Omar. Le recours à la modélisation a donc été nécessaire pour reconstituer les niveaux d'eau à la côte (sur les plages) lors des deux événements étudiés.

**Tableau 2. Bases de données utilisées pour la simulation numérique rétrodictive des cyclones Lenny et Omar / Used data bases for Lenny and Omar hurricanes retrodictive numerical simulation.**

Thème	Données	Remarque
Bathymétrie régionale	Sondes SHOM	Base de données SHOM n°91302650 acquise par le LGP
	Sondes NGDC	Base de données de la base ETOPO-1 (Amante and Eakins, 2009) en libre accès.
Bathymétrie locale	Sondes SHOM	Base de données SHOM n°91302650 acquise par le LGP



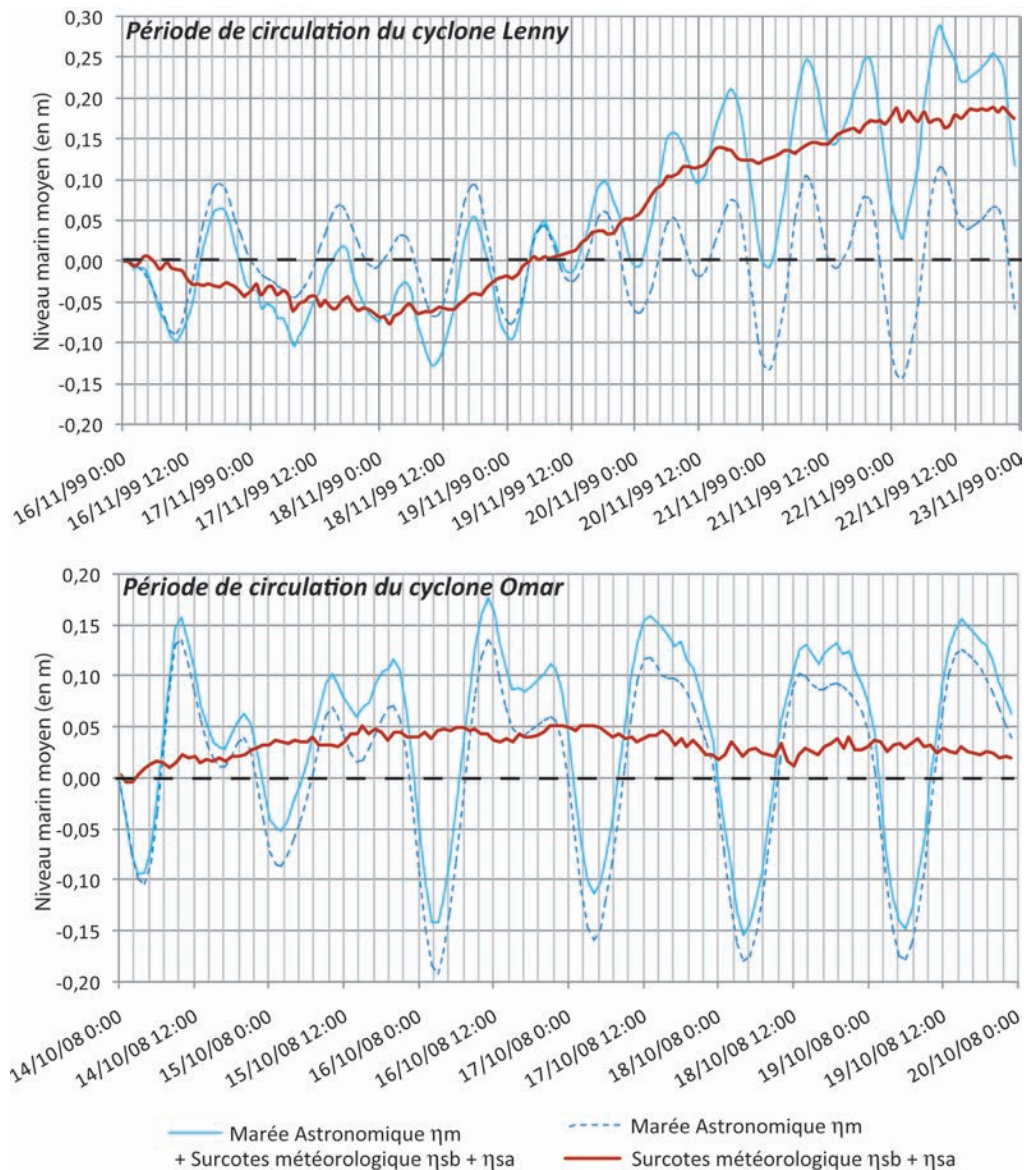
	Levés bathymétriques	Données acquises par A. Nicolae-Lerma en mars 2010 (emploi des DGPS Thales Z-MAX et sondeur Furuno LS4100 du LGP).
Topographie	Levés topographiques	Données acquises en mars 2010 par A. Nicolae Lerma (emploi du DGPS Thales Z-MAX du LGP).
Climatologie	Données Météo-France - Lamentin	Données tri-horaires de pression atmosphérique, vitesse et direction du vent mises à disposition du LGP par le CEREGMIA. Période 01/01/1961-31/12/2009
Océanographie : marée	Données SONEL - Fort-de-France	Données mises à la disposition du LGP par l'Observatoire SONEL. Période 19/10/2005-31/09/2010.
Océanographie : houle	Données CETMEF - Basse Pointe	Données chaque 30 min de $H_s$ , $T_p$ , $D_p$ et $\sigma_{Dp}$ mises à la disposition du LGP par le CEREGMIA. Période 01/01/1961-31/12/1999.
	Modèles WNA et AT10 de la NOAA/NCEP	Base de données en libre accès. Données tri-horaires de $H_s$ , $T_p$ et $D_p$ . Période 01/07/1999-31/05-2010

## Marée et surcote météorologique

- 19 Afin de dissocier l'ensemble des facteurs et de mieux connaître la part de chacun lors des inondations provoquées par les cyclones étudiés, une modélisation de la marée et des forçages atmosphériques (vents, pressions) a été réalisée avec le modèle 2DDI (Two Dimensional Depth Intergrated) de ADCIRC (Luettich and Westernink, 2005 ; Westerink et al., 1994 ; Luettich et al., 1992).
- 20 Les simulations ont été exécutées sur le maillage non structuré réalisé à partir de nombreuses sources de données bathymétriques par Blain et al., (1998, 1994). Ce maillage couvre le Nord-Ouest de l'Océan Atlantique, le Golfe du Mexique, la Mer des Caraïbes. Le modèle ainsi que la maille ayant servi aux modélisations dans notre étude sont des éléments de référence exploités par la FEMA et la NOAA pour la prévision opérationnelle des surcotes de tempête sur les côtes des États-Unis (programme Sea Lake Overland Surge from Hurricanes, SLOSH). Au niveau du site étudié, la résolution des mailles à la côte est de l'ordre de 100 à 200 m.
- 21 Le fonctionnement complet du modèle est décrit dans Luettich and Westerink, (2005). Ce modèle a pour objet de déterminer les variations du niveau de la mer sous l'influence des composantes météorologiques par la résolution des équations de type swallow water associées aux approximations de pression hydrostatique et de Boussinesq ((Westerink et al., 2008; Kolar et al., 1994). Ces équations sont discrétisées dans le temps par la méthode des différences finies (FDM) et dans l'espace par la méthode des éléments finis (finite element method FEM) enrichie d'équations de continuité des ondes (WCE) ainsi que de la continuité des ondes généralisées (GWCE)). Le modèle a été exécuté en mode *classic barotropic* 2DDI utilisant les équations *Navier stockes* et GWCE standard. La friction est intégrée par défaut sous la forme de coefficient de Manning déterminé variablement en fonction de la profondeur.
- 22 Sur le plan des forçages, les composantes de marée utilisées pour l'application sont celles de la base de données de Le Provost (Le Provost et al, 1998). Les arguments astronomiques ont été calculés à partir des équations proposées par P. Shureman (1971) et par emploi d'une version modifiée du programme « tide\_fac.f » utilisant le modèle global de marée *FES 2004* (Lyard et al., 2004). Les vents et la pression atmosphérique ont été intégrés à partir d'une grille structurée (données *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR), résolution 0,5°) interpolée spatialement et temporellement pour correspondre à la grille ADCIRC et être synchronisée au pas de temps de modélisation. La formulation de Garrat est utilisée pour calculer la friction du vent en fonction de son intensité.
- 23 Après modélisation, les niveaux calculés ont été validés par l'emploi des données enregistrées par le marémètre de Fort-de-France (données du Réseau de référence des observations

marégraphiques, REFMAR) uniquement lors de l'épisode Omar, les données d'observation n'étant pas disponible lors du passage du cyclone Lenny. La surcote produite par le modèle est nettement lissée par rapport à la surcote observée qui est très irrégulière. Ainsi, les erreurs maximum durant l'ensemble de l'évènement (du 14 au 19 octobre) sont comprises entre +0,1 m et -0,11 m. L'erreur moyenne entre les deux distributions est faible, la différence moyenne est de 0,03 m et le RMS de 0,05 m. La pertinence de ces résultats montre une bonne fiabilité des simulations réalisées avec le modèle ADCIRC.

**Figure 5. Courbes de marée et surcotes météorologiques simulées avec le modèle ADCIRC /Tides and meteorological surges simulated with ADCIRC Model.**

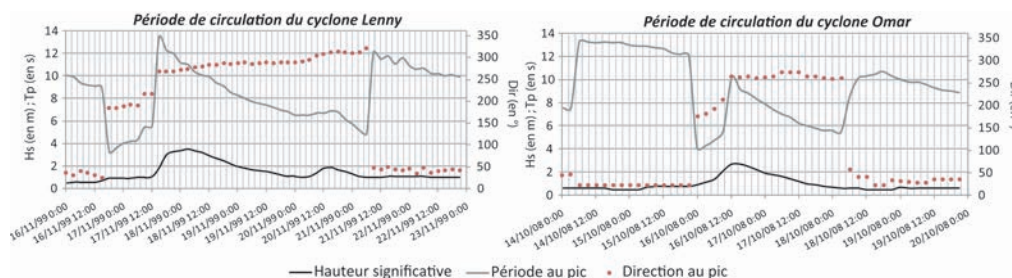


### Surcote de vague et runup

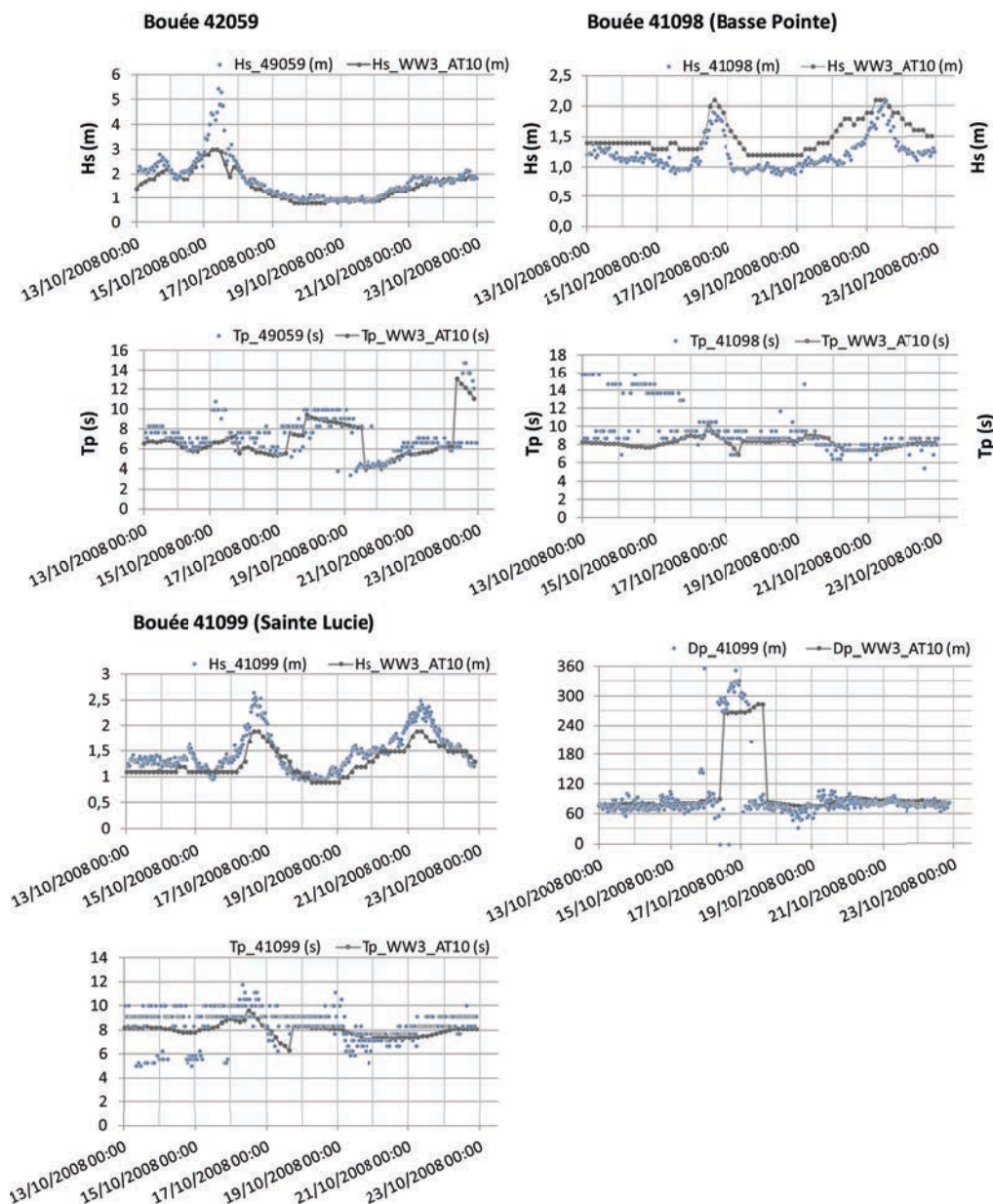
24 La modélisation de la propagation des houles du large à la côte puis sur les plages nécessite l'utilisation de modèles numériques de bathymétrie et de données topo-bathymétriques de haute précision. Pour la modélisation d'approche, les sondes utilisées pour la réalisation des mailles sont les données SHOM associées à des levés bathymétriques et topographiques depuis -25 m jusqu'à 10 m. Les deux Modèles Numériques de Bathymétrie MNB ont été obtenus par krigeage pour des résolutions de 25 et 10 m. Ces surfaces et les mailles qui en résultent ont été calculées avec la méthode d'interpolation de krigeage du logiciel SURFER® (Golden Software, 2011). Les coordonnées horizontales de ces modèles sont en WGS84, projection UTM zone 20N avec comme référence altitudinale le niveau de basse mer astronomique.

- 25 Les données de houle au large utilisées pour calculer les surélévations provoquées par les vagues (cf. figure 6) sont issues des bases de données du modèle Wave Watch III-WNA et AT10 (Tolman 2002) mis à disposition par le National Centers for Environmental Prediction (NCEP) de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Les données des différents modèles régionaux WWIII sont régulièrement utilisées pour prédire (*forecast*) les états de mer et réaliser des opérations de simulation ou des études de climatologie (*hindcast*) notamment sur les côtes françaises S. Abadie *et al.* (2005), F. Ardhuin *et al.* (2008) ou R. Pedreros *et al.* (2009).
- 26 À l'échelle régionale (bassin caribéen), la fiabilité des données des modèles WWIII (WNA et AT10) à l'échelle du bassin caribéen a été analysée en détail à partir de l'ensemble des données des bouées disponibles Y.F. Thomas *et al.* (2012). Les résultats des modèles régionaux montrent une bonne fiabilité notamment pour le paramètre Hs à la bouée 45059 ( $R^2=0,85$ ). Toutefois, lors d'évènements cycloniques, la résolution des modèles de vent peut être insuffisante pour reproduire avec précision l'intensité des conditions météorologiques locales et la rapidité des changements de direction au centre des cyclones. La conséquence est souvent une sous-estimation des pics de vagues lors de ces évènements. L'imprécision des modèles lors des évènements étudiés a donc été évaluée à partir des données disponibles. Compte tenu des défaillances ou de la mise en place récente de certaines bouées, l'analyse peut être réalisée uniquement lors de la circulation du cyclone Omar. Durant cette période, les données du modèle ont été analysées au large à la bouée West Caraibe 42059 et proche des côtes martiniquaises au nord (bouée Basse pointe, 41098) et au sud (bouée St Lucie, 41099) cf. figure 1 et figure 7.
- 27 Le modèle présente des résultats de qualité hétérogène au large, au nord et au sud du littoral étudié. Au large, le modèle sous-estime nettement le pic de vague  $\approx 40\%$ . En revanche, proche des côtes de la Martinique les pics de vague sont bien reproduits. On notera que bien que l'on observe une sous-estimation lors du moment pic au sud de l'île, le point le plus proche de la zone d'étude, à la bouée Basse Pointe les pics sont justement reproduits (surestimation du modèle de 0,2 m par rapport aux observations) cf. figure 7. La période des vagues est également bien reproduite par le modèle. Pour ce paramètre, les données au large des côtes sont proches des observations. Enfin, la seule bouée disposant de capteurs directionnels est la bouée 41099 (St Lucie). Elle permet de constater que le modèle prend nettement en compte le changement de direction des houles causé par la trajectoire atypique du cyclone.
- 28 Pour conclure, bien qu'il soit possible que le modèle sous-estime les conditions de vagues lors des cyclones, les seules observations disponibles lors des cas étudiés montrent que les données du modèle WWIII AT10 peuvent raisonnablement être utilisées pour reproduire ces évènements. Par ailleurs, bien que les valeurs de Hs paraissent relativement faibles, elles restent exceptionnelles pour le littoral nord-ouest de la Martinique. Au sein de la base de données WWIII (cf. tableau 2) ou des observations disponibles, les houles provoquées par le passage des cyclones Lenny et Omar sont les seuls épisodes observés pendant lesquels des houles de secteur ouest et supérieures à 1,50 m ont affecté le littoral de St Pierre.

**Figure 6. Caractéristiques des houles lors des épisodes Lenny et Omar / Wave characteristics during Lenny and Omar episodes.**



**Figure 7. Caractéristiques des houles issues du modèle WWIII-AT10 comparées aux observations disponibles lors du passage du cyclone Omar / Waves characteristics from WWIII-AT10 model versus observed buoy data during Hurricane Omar.**



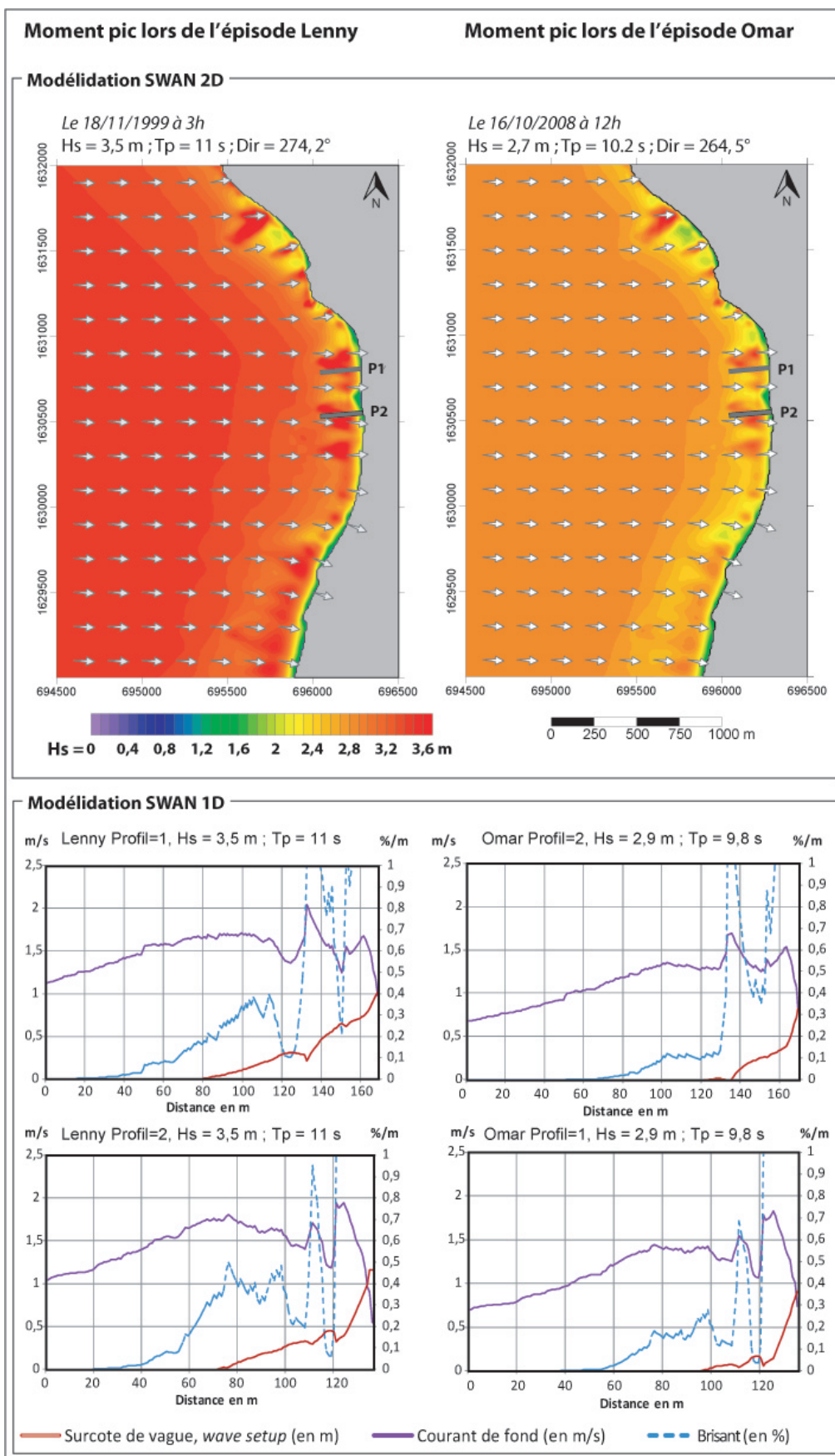
29 La propagation des houles du large à l'estran a été réalisée par l'emploi du code SWAN (Simulating Waves Nearshore, Booij et al., 1999) (cf. figure 8). SWAN qui simule les comportements des vagues en domaine côtier à partir des conditions au large, du vent, de la bathymétrie, des courants et de la marée. Il est spécialement conçu pour prendre en compte l'ensemble des processus intervenant par grands ou petits fonds tels que l'interaction vague/vague, les courants, la friction de fond et les « surcotes de vague » (The Swan team, 2010a and b). Le modèle SWAN n'a pas été utilisé ici en paramétrisation couplée avec le modèle ADCIRC (Dietrich et al., 2011), les travaux menés dans Anselme et al., 2011, Nicolae, 2012, Andrade et al., 2013, ont montré que l'utilisation en relais présentait de bons résultats pour reproduire les niveaux d'eau maximum lorsque les surélévations étaient majoritairement provoquées par l'action des vagues au déferlement.

30 Le forçage du modèle SWAN est introduit aux frontières, par reconstitution de spectres paramétriques de type JONSWAP calculés à partir des caractéristiques associées au pic spectral des données WWIII. En sortie, la discrétisation est réalisée pour des secteurs directionnels de  $10^\circ$  et 36 niveaux de fréquence compris entre 1 et 0.0521 Hz. La configuration GEN3 est utilisée par défaut pour les autres paramètres.



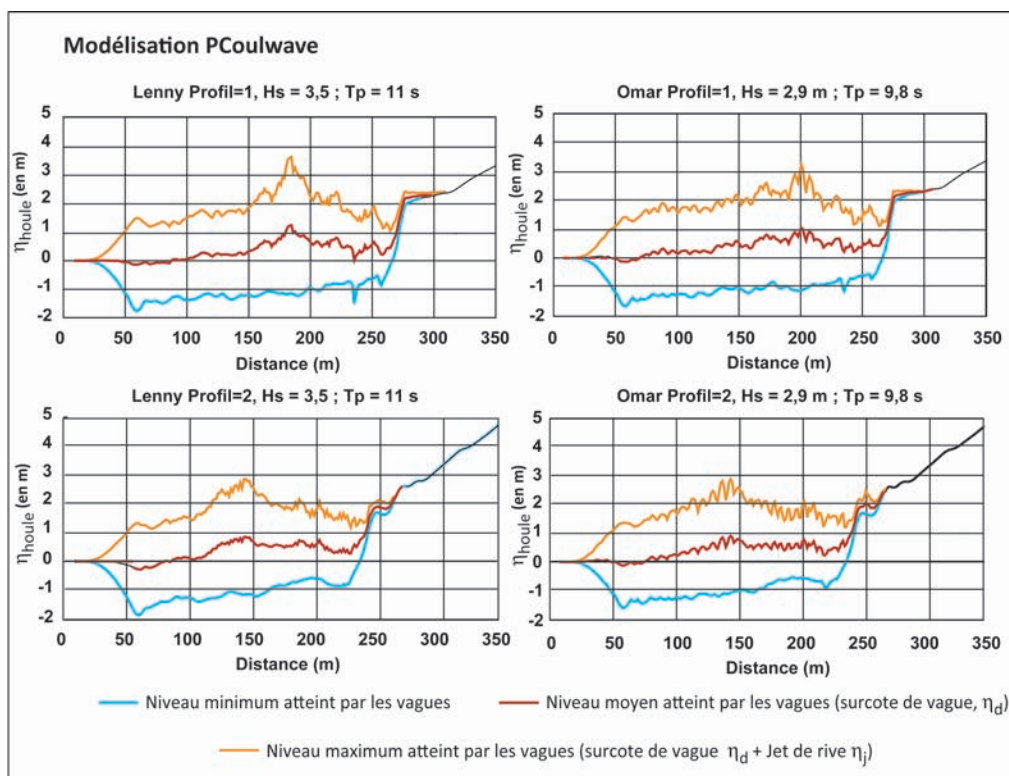
- 31 Le modèle propose une évaluation de la surcote de vague (wave set-up). Afin de disposer d'une évaluation précise de la surélévation provoquée par les vagues, le modèle est utilisé en 2 temps. D'abord, une modélisation d'approche en 2D (résolution 10 m) est réalisée. Les spectres d'énergie des vagues sont alors extraits à la base de profils pour procéder à une modélisation en 1D (cf. figure 1). Cette deuxième évaluation du setup, plus fine (résolution métrique), est utilisée dans l'estimation de la surélévation du déferlement.

**Figure 8. Modélisation SWAN (modèle local) lors des pics de submersion /SWAN simulation (local model) during pics floods.**



- 32 Le modèle SWAN a été utilisé pour simuler la seule surcote de vague  $\Delta\eta_d$ , en revanche le  
 33 modèle pCOULWAVE lui a été employé pour simuler  $\eta_{houle} = \eta_d + \eta_j$ . Ce procédé permettra  
 d'estimer la part respective de chaque composante du déferlement (cf. figure 9).
- 34 Le modèle pCOULWAVE (Lynett et al., 2008), version pour exécution en mode parallèle  
 du programme COULWAVE (Lynett et Lu, 2002) est dit modèle vague à vague, c'est-à-dire  
 que le modèle représente, à haute résolution, la forme et le comportement de chaque vague  
 interagissant entre elles et avec la bathymétrie. Il permet la modélisation de la progression  
 d'ondes sur surface libre résolvant plusieurs types d'équations intégrant la profondeur, les  
 ondes longues, les ondes non linéaires par petit fond (shallow water) et dispersives de type  
 Boussinesq. Ces équations servent à calculer en chaque point d'un maillage les champs de  
 vitesse  $u$  et  $v$ , les variations de la surface libre et les déformations de la surface lors du  
 déferlement. Il convient tant pour la simulation d'onde longue type tsunami (Geist et al.,  
 2009) que pour la modélisation des vagues de tempête (Cheung et al., 2003) notamment  
 sur bathymétrie complexe (Lynett et Liu, 2002). Il est ainsi capable de reproduire les  
 phénomènes de débordement ou d'overlapping (Lynett et al., 2008). Ce type de modèle connaît  
 actuellement des développements considérables permettant notamment l'application pour  
 représenter des cas réels. Le pendant négatif est le temps de calcul qui rend l'application en 2D  
 souvent prohibitive. L'application en 1D, bien que par nature moins précise, car n'intégrant  
 pas les processus de courant longshore, reste cependant un compromis satisfaisant pour des  
 applications sur site, Kennedy et al. (2012).
- 34 Les données de houle sont introduites sous la forme d'un spectre mono-directionnel  
 correspondant à des caractéristiques de profondeur finie de type TMA (Bouws et al., 1985). La  
 durée de simulation est de 1800s avec un pas de temps de calcul de 0,25 s et une discrétisation  
 spatiale de 0.01 m. L'ensemble des paramètres de dissipation (viscosité, friction de fond et  
 déferlement) a été activé et paramétré par défaut. La détection du niveau de runup a été  
 configurée pour une épaisseur d'eau minimum de 0,1 m conformément au seuil de détection  
 courant servant notamment à établir les caractéristiques de R2% (Holland et al., 1995).

**Figure 9. Résultats des modélisations du déferlement et des niveaux maximum atteints par les vagues (modèle PCoulwave) / Simulation results of breaking wave simulation and run up levels (PCoulwave model).**



## Résultats et validation

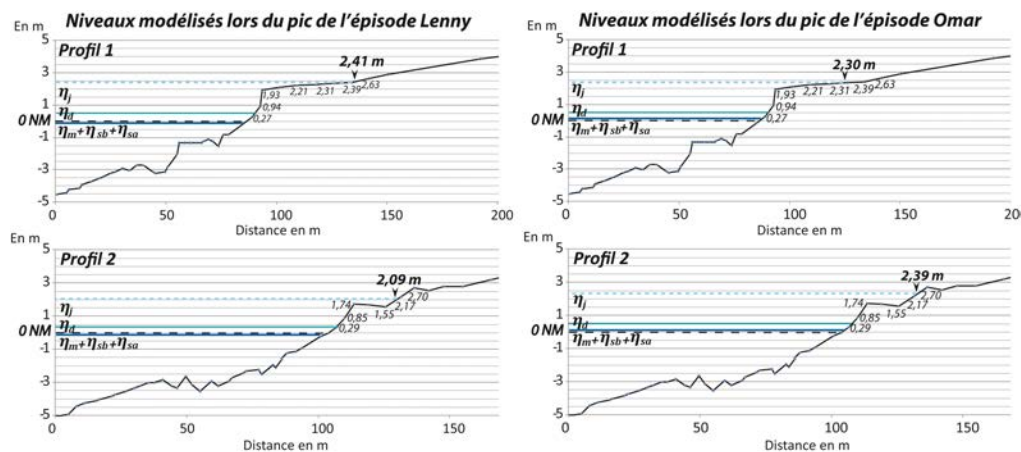
### Synthèse des niveaux modélisés

35 L'addition de composantes modélisées correspond au niveau marin atteint par 2 % des vagues sur les profils. Les surélévations et donc les submersions sont quasi exclusivement dues à l'action des vagues dans la zone de déferlement (cf. tableau 3, figure 10). Les variations de niveaux associées aux influences de la marée astronomique et aux influences météorologiques locales ne modifient que très modérément, par rapport au niveau marin moyen (NM), les niveaux de la mer lors des moments pics (-0,04 m pour l'épisode Lenny et 0,16 m lors de l'épisode Omar).

**Tableau 3. Part de chaque composante dans les niveaux marins reconstitués / Part of each component in reconstituted sea levels.**

Episode	Dates et heures	Marée Atronomique ( $\eta_m$ )	Surcote ou décote météorologique ( $\eta_{sb} + \eta_{sa}$ )	Surcote de vague P2 ( $\eta_d$ )	Surcote de vague P3 ( $\eta_d$ )	Jet de rive P2 ( $\eta_j$ 2%)	Jet de rive P3 ( $\eta_j$ 2%)	Niveau atteint par les vagues P2 (Runup 2%)	Niveau atteint par les vagues P3 (Runup 2%)
Lenny	18/11/1999 3h	0,03	-0,07	0,46	0,41	1,95	1,68	2,41	2,09
Omar	16/10/2008 12h	0,13	0,04	0,36	0,33	1,94	2,06	2,3	2,39

**Figure 10. Représentation des niveaux modélisés et de la part de chaque composante de surélévation / Simulated levels representation, part of each components in total surge.**



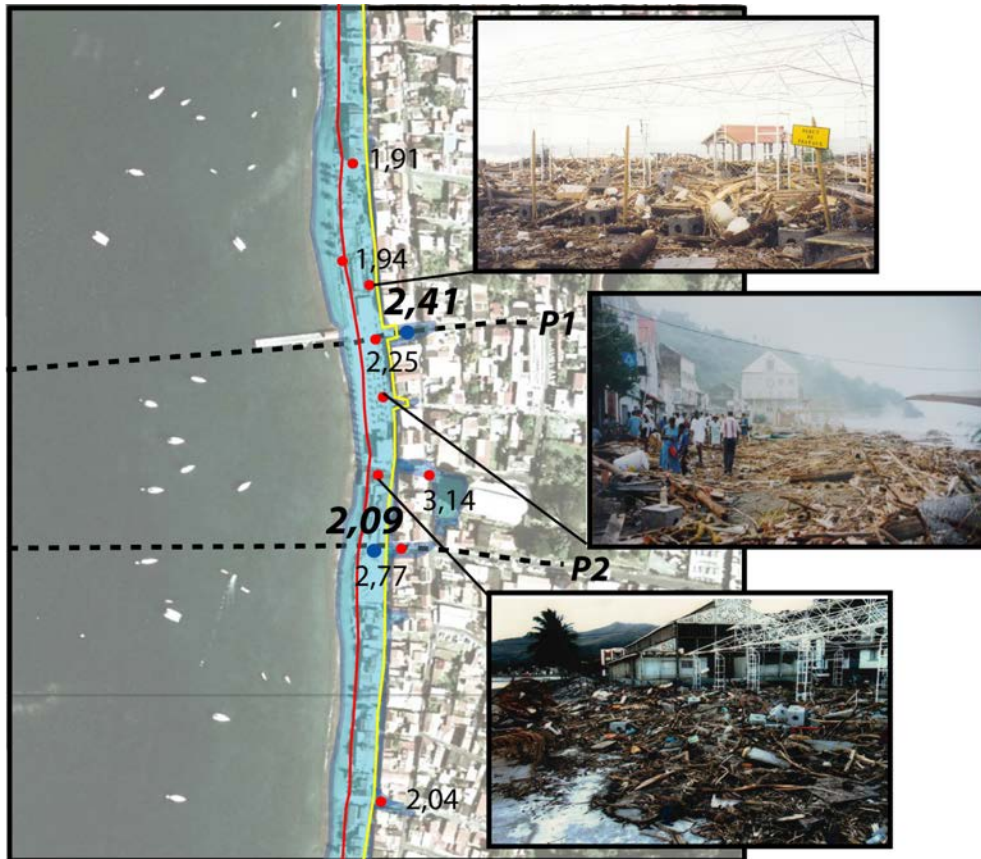
### Validation par les témoignages locaux

36 Parallèlement à l'exercice de modélisation, un travail important d'enquête et de recherche de témoignages a été mené localement auprès des populations, de la mairie et au sein des organismes locaux de presse (France Antilles). Ces documents ont permis d'obtenir des compléments d'information au rapport du Bureau de Recherche Géologique et Minière (BRGM), Barras et al., 2008 (clichés AV Barras, P. Bastin) et aux travaux de Saffache et al. (2002). Ils permettent d'avoir une idée précise de l'ampleur des inondations lors de la circulation de chacun des cyclones étudiés (cf. figure 11a et 11b).

37 Ces informations diverses ont été localisées et des relevés topographiques (D-gps) ont permis d'associer une hauteur atteinte par les eaux pour différents témoignages. On a ainsi pu juger de la pertinence des niveaux modélisés avec les documents illustrant les inondations et les dégâts sur le terrain apportant une validation au travail de reconstitution des niveaux extrêmes.

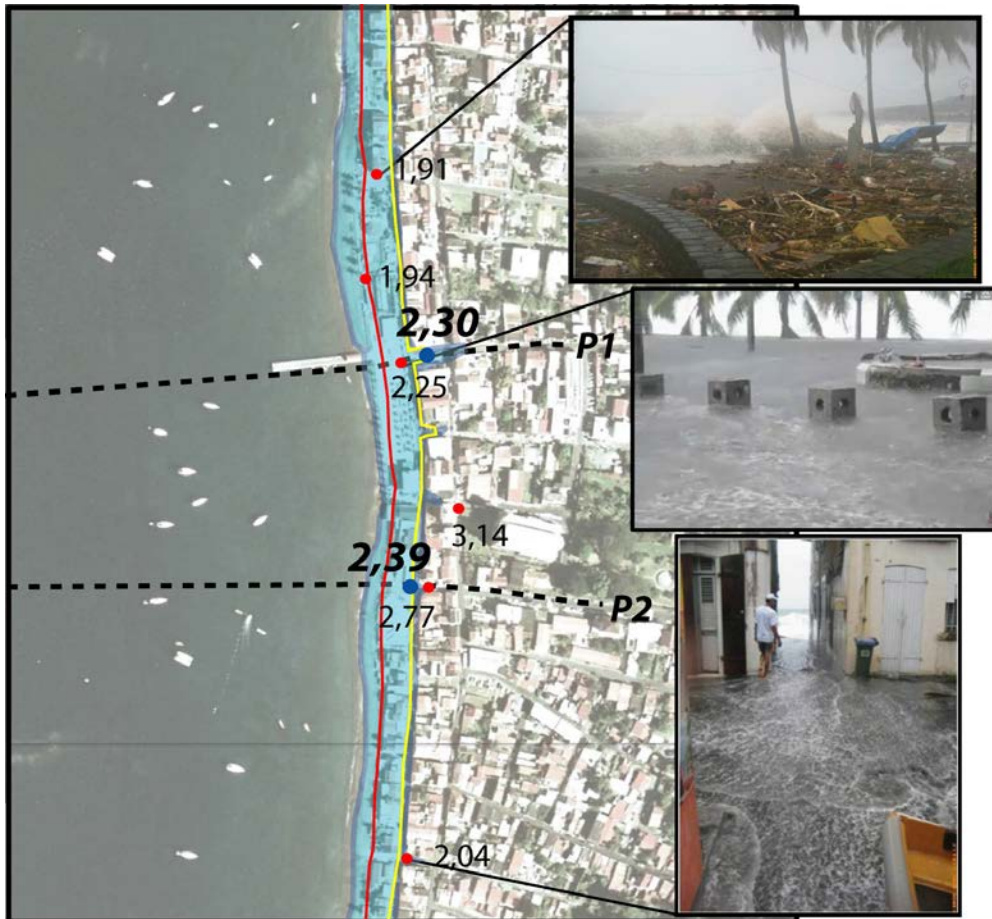


**Figure 11a. Validation des modélisations par les différents témoignages : le cas Lenny / Simulation validation by different evidences: Lenny case.**



Légende : Sur les figures, les points représentent : zones inondées d'après les témoignages (rouge), niveaux modélisés (bleu). Les lignes représentent : limites proposées par les PPR de « risque de surcote » (rouge), de risque de houles cycloniques (jaune) / On the figures, the points represents: flooded areas in accordance with evidence (red), simulated levels (blue). Lines represents: limits proposed by PPR "storm surge risk"(red), "Hurricane swell risk" (yellow).

**Figure 11b. Validation des modélisations par les différents témoignages : le cas Omar / Simulation validation by different evidences:Omar case.**



Légende : Sur les figures, les points représentent : zones inondées d'après les témoignages (rouge), niveaux modélisés (bleu). Les lignes représentent : limites proposées par les PPR de « risque de surcote » (rouge), de risque de houles cycloniques (jaune) / On the figures, the points represents: flooded areas in accordance with evidence (red), simulated levels (blue). Lines represents: limits proposed by PPR "storm surge risk"(red)," Hurricane swell risk" (yellow)

## Conclusion

- 38 La méthode de reconstitution par modélisation et prise en compte analytique du signal niveau extrême présentent des résultats tout à fait pertinents et en bon accord avec les différents types d'observation et de témoignages obtenus sur le terrain. Cette approche, déjà éprouvée sur différents sites, Nicolae et al., 2013; Andrade et al., 2013, Anselme et al., 2011, confirme ici son adaptabilité aux caractéristiques topo-bathymétriques du site. On pourra ainsi tirer plusieurs conclusions de la reconstitution des niveaux marins atteints lors des cyclones Lenny et Omar.
- 39 Une délimitation différenciée des zones de surcote et de houle cyclonique semble inadéquate. Les Plans de Prévention des Risques considèrent de manière différenciée l'aléa de submersion (surcote météorologique associée à une marée des vives-eaux) et l'aléa de houle cyclonique (surélévation provoquée par la déformation et le déferlement des vagues sur les plages). Si les épisodes étudiés ont mis en avant l'influence des houles dans l'aléa de submersion, il ne semble pas légitime de dissocier deux types d'aléa qui peuvent intervenir simultanément et à plus forte raison lors d'événements exceptionnels.
- 40 D'autre part, les lignes tracées sur les documents et délimitant la frange littorale soumise aux aléas correspondent assez bien aux niveaux atteints lors de l'épisode Omar, mais sous-estiment les niveaux atteints lors de l'épisode Lenny. Outre les méthodes qui semblent devoir être reconsidérées, certains quartiers doivent être compris dans les zones pouvant être affectées par les inondations, notamment le quartier de l'église et le sud de la commune. De surcroit, ces deux cyclones, bien qu'ayant eu un impact considérable, ont circulé loin du littoral de la Martinique et les houles bien qu'imposantes (Lenny  $H_s = 3,5$  m;  $T_p = 11$  s et Omar  $H_s = 2,8$  m;

$T_p = 9,8$  s) ont atteint des niveaux pouvant tout à fait être dépassés dans la mer des Caraïbes (Thomas et al., 2012).

- 41 Il semble important de redéfinir les limites pouvant être atteintes par les eaux sous un seul type d'aléa. Celui-ci devra prendre en compte, dans le cadre d'une étude prospective, l'influence simultanée des composantes de variation du niveau de la mer associées à la marée, aux surcotes météorologiques et à l'effet des vagues lors du déferlement. Ces travaux peuvent être généralisés sur les littoraux martiniquais en tenant compte de la tendance régionale d'élévation du niveau marin moyen.

## Remerciements

- 42 L'étude menée a été réalisée dans le cadre d'une collaboration scientifique ponctuelle entre le CEREGMIA (Centre d'Étude et de Recherche en Économie, Gestion, Modélisation et Informatique Appliquée), l'Université des Antilles et de la Guyane, le Laboratoire de Géographie Physique (UMR 8591 du CNRS et l'Université Paris 1-Panthéon-Sorbonne). Notre reconnaissance va également à l'ensemble des services locaux ayant permis d'obtenir différentes sources de témoignages : Journal France Antilles, BGRM, DIREN, Météo France. Nous remercions enfin les évaluateurs de l'article dont les remarques ont permis d'enrichir notre travail.

---

## Bibliographie

- Anselme B., P. Durand, Y.F. Thomas et A. Nicolae-Lerma, 2011, Storm extreme levels and coastal flood hazards, A parametric approach on the french coast of Languedoc (district of Leucate), *Comptes Rendus Geosciences*, n°343, 10, pp. 677-690,
- Abadie S. R. Butel et H. Dupuis Briere C., 2005, Paramètres statistiques de la houle au large de la côte sud-aquitaine, *Comptes Rendus Geosciences* 337, pp. 769-776
- Andrade, C.A., Y.-F.Thomas, A. Nicolae Lerma et P. Durand, B. Anselme, 2013, Coastal flooding hazard related to swell events in Cartagena de Indias, Colombia. *Journal of Coastal Research*, 29(5), pp. 1126-1136.
- Ardhuin F. et N. Rascle, 2006, États de mer et circulation océanique en zone côtière, IXes Journées Nationales Génie Civil – Génie Côtier, 12-14 septembre 2006, Brest, 10p.
- Ardhuin F., R. Magne, N. Rascle, P. Queffeuou et M. Hamon, 2008, *Modélisation des vagues avec le code WAVEWATCH III : version 3.13-SHOM et Prévimer, aspects multiéchelles et multidisciplinaires*, Journée PCIM, Ifremer, SHOM, Prévimer, 16 p.
- Barras A.V., 2008, *Inventaire des impacts de la houle cyclonique OMAR (16 octobre 2008) sur la côte Caraïbe de la Martinique*, Compte rendu du 18/10/2008. Rapport BRGM/RP-56803-FR, 25p.
- Barras A.V., C. Oliveros, Joseph B., Marimoutou C., 2008, *Inventaire et caractérisation des impacts de la houle sur le littoral de la Martinique au passage de l'Ouragan Dean (17 aout 2007)*, Rapport BRGM/RP-55954-FR, 53p.
- Blain , C.A., J.J. Westerink et R.A. Luetlich, 1994, The influence of domain size on the response characteristics of a hurricane storm surge model. *Journal of Geophysical Research* 99, pp. 18467-18479.
- Blain , C.A., J.J. Westerink et R.A. Luetlich, 1998, Grid convergence studies for the prediction of hurricane storm surge. *International Journal of Numerical Methods in Fluids* 26, pp. 369-401
- Booij, N.C., R.C. Ris et L.H. Holthuijsen, 1999, A Third-Generation Wave Model for Coastal Regions, Part I, Model Description and Validation, *J. Geophysical Research*, 104(C4), pp.7649-7666
- Bouligand R. et P-A. Pirazzoli, 1999, Les surcotes et les décotes marines à Brest, étude statistique et évolution. *Oceanologica Acta* 22, 2, pp. 153-166.
- Bouws, E., H. Gunther, W. Rosenthal et C.L. Vincent, 1985, Similarity of the wind wave spectrum in finite depth water. 1. spectral form, *J. Geophys. Res.*, vol. 90, no. C1, pp. 975-986.
- Cariolet J.M. et S. Suanez, 2009, Approche méthodologique pour une cartographie du risque de submersion des côtes basses, *La Houille Blanche*, n° 2, pp. 52-58.
- Chen, Q., L. Wang et H. Zhao, 2006, Simulation of storm surges and wind waves on the Mississippi and Alabama coasts during Hurricane Katrina. AGU Ocean Sciences Meeting (Honolulu, Hawaii), Abstract 0S16H-11.

- Cheung, K., A. Phadke, Y. Wei, R. Rojas, Y. Douyere, C. Martino, S. Houston, P.L.-L. Liu, P. Lynnett, N. Dodd, S. Liao et E. Nakazaki, 2003 Modeling of storm-induced coastal flooding for emergency management, *Ocean Engineering*, 30, pp. 1353 –1386.
- Conner, W.C., R.H. Kraft et D.L. Harris, 1957, Empirical Methods for Forecasting the Maximum Storm Tide Due to Hurricanes and Other Tropical Storms. *Mon Weather Rev.* 85(4), pp.113-116.
- Cospar, O., P. Saffache et J.V. Marc, 2003, L'élaboration des plans de prévention des risques en Martinique entre contrainte socio-économique et gestion des risques naturels, *Le Courrier de l'environnement* n° 49, juin
- Costa, S., O. Cantat, P.A. Pirazzoli, M. Lemaitre et D. Delahaye, 2004, Vents forts et submersions de tempête en Manche Orientale : analyse météo-marine sur la période historique récente, Actes du colloque de l' Association Internationale de Climatologie «Climat, mémoire du temps. Les relations climat-espace-société », pp. 277-280.
- Direction départementale de l'équipement Martinique (DDE), 1997, Cartographie de l'aléa d'inondation. Commune du Lamentin - Rapport Direction départementale de l'équipement Martinique, Préfecture de la Martinique, BCEOM.
- Dean, R.G. et R.A. Dalrymple, 1991, *Water wave mechanics for engineers and scientist*, 2nd edn, Advanced Series on Ocean Engineering. Vol 2, World Scientific, Singapore, 353 p.
- Dietrich, J.C., M. Zijlema, J.J Westerink, L.H. Holthuijsen, C.N. Dawson, J.R Luetlich, R.E. Jensen, J.M. Smith, G.S Stelling et G.W. Stone, 2011, Modeling Hurricane Waves and Storm Surge using Integrally-Coupled, Scalable Computations. *Coastal Engineering*, 58, pp. 45-65.
- Doodson, A.T., 1924, Meteorological Perturbations of Sea-Level and Tides, *Geophysical Journal International*, 1: 124–147. doi: 10.1111/j.1365-246X.1924.tb05363.x
- Perret, G., L. Feuillatre, P. Frayssinet, 1996, Estimations du risque lié aux marées de tempête en Guadeloupe, Études et Développement n° 2, METEO-FRANCE, Direction interrégionale Antilles-Guyane, 20 pp.
- Geist, E.L., P.J. Lynnett et J.D. Chaytor, 2009, Hydrodynamic modeling of tsunamis from the Currituck landslide, *Marine Geology* 264, pp. 41–52.
- Guza, R.T. et E.B. Thornton, 1981, Wave Set-up on a Natural Beach, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 86, No. C5, pp. 4133 – 4137.
- Guza, R.T. et E.B. Thornton 1982, Swash oscillations on a natural beach, *J Geophysical Research*, 87(C1), pp. 483-491.
- Harris, D.L., 1963 Characteristics of the Hurricane Storm Surge. U.S. Department of Commerce Weather Service Technical Paper No. 48.
- Healy, R.T. et R. Dean, 1999, *Methodology for delineation of coastal hazard zones and development setback for open duned coasts*. In : “Handbook of Coastal Engineering” Herbich J.B, Ed. New York, Mac Graw Hill, multipagination, p. 19.1-19.30.
- Holland, G.J., 1980, “an analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes”, *Monthly Weather Review*, vol 108, pp. 1212-1218.
- Holland, K.T., B. Raubenheimer, R.T. Guza, et R.A. Holman, 1995, Runup kinematics on a natural beach. *J. Geophys. Res.*, 100(C3), pp. 4985-4993.
- Holman, R. A. et A.H. Sallenger, 1985, Setup and Swash on a Natural Beach. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 90, No. C1, pp. 945-953.
- Hsu, Y.L., R.A. Allard et T.R. Mettlach, 2002, *Wave model validation for the Northern Gulf of Mexico Littoral Initiative (NGLI) project*, Stennis Space Center, Mississippi: Naval Research Laboratory Report A037604.
- Kennedy A. B., J.J Westerink, J. M. Smith, M. E. Hope, M. Hartman, A. A. Taflanidis, S. Tanaka, H. Westerink, K. F. Cheung, T. Smith, M. Hamann, M. Minamide, A. Ota et C. Dawson, 2012, Tropical cyclone inundation potential on the Hawaiian Islands of Oahu and Kauai, *Ocean Modelling* 52-53, pp. 54–68.
- Komar, P.D., 1998, *Beach processes and sedimentation*, 2nd édit., Printice Hall, 544p.
- Longuet-Higgin, M.S. et R.W. Stewart, 1963, A note on wave-setup, *Journal of Marine Research*, vol.21, n° 4, pp. 4-10.
- Longuet-Higgins, M.S. et R.W. Stewart, 1964, Radiation stress in water waves, a physical discussion with application, *Deep-sea Research*, Vol. 11, pp. 529-562.



- Luettich, R.A. Jr., J.J. Westerink, et N.W. Scheffner, 1992, *ADCIRC: An Advanced Three-Dimensional Circulation Model for Shelves, Coasts, and Estuaries – Report 1: Theory and Methodology. Technical Report DRP-92-6*, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Luettich, R.A. Jr. et J.J. Westerink, 2005, *ADCIRC – User Manual*, University of North Carolina at Chapel Hill – Institute of Marine Science, NC.
- Lyard, F., F. Lefèvre, T. Letellier et O. Francis, 2006, Modelling the global ocean tides : a modern insight from FES2004, *Ocean Dynamics*, 56, pp. 394-415.
- Lynett, P.J. et P.L.-F. Liu, 2002, *Modeling Wave Generation, Evolution, and Interaction with Depth-Integrated, Dispersive Wave Equations COULWAVE Code Manual*. Cornell University Long and Intermediate Wave Modeling Package, 179 p.
- Lynett, P.J., Liu, P.L.-F., Sitanggang, K.I. et D.H. Kim, 2008, *Modeling Wave Generation, Evolution, and Interaction with Depth-Integrated, Dispersive Wave Equations COULWAVE Code Manual*. Cornell University Long and Intermediate Wave Modeling Package v. 2.0, 90p.
- Mase, H., 1989, Random wave runup height on gentle slopes, *J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 115 (5), pp. 649-661
- Mazurie, R., J. Gueusquin et C. Brévignon, 1999, *Passage de l'Ouragan LENNY du 17 au 19 novembre 1999 sur l'archipel de la Guadeloupe*, compte rendu météorologique, Service régional de METEO-FRANCE en Guadeloupe,
- McInnes, K.L., J.G. O'grady et G.D. Hubbert, 2009, Modelling sea level extreme from tides, surges and wave setup for climate change assessment in Southern Australia, *Journal of Coastal Research*, SI 56, pp. 1005-1009.
- Nicolae Lerma, A., Y.-F. Thomas, P. Durand, B. Anselme et C. Andrade, 2013, Modélisation de submersions marines et leur validation par observation vidéo à Carthagène des Indes, Colombie », Géomorphologie : relief, processus, environnement, 4/2013, 481-498p.
- Nicolae Lerma, A., 2012, *Approche analytique et étude prospective de l'aléa de submersion, de la donnée observée à la modélisation, à Carthagène des Indes, Colombie*, PhD thesis, Université Paris 1 Panthéon - Sorbonne, 450p.
- Nielsen, P., 1989, Wave Setup and Runup: An Integrated Approach, *Coastal Engineering*, Vol. 13, pp. 1 – 9.
- Ortiz Royero, J.C., F.L. Martinez, E.D. Estrada et L.F. Bacca Arango, 2008, Estudio del Oleaje Generado por el Huracán Joan en la Costa Caribe Colombiana en 1988, Incluyendo a la Isla Andrés, *Revista Colombiana de Física*, vol. 40, No. 2, Julio, pp. 444-446
- Pedrerros, R., S. Lesacheux et D. Idier, 2009, *Étude des conditions de vagues sur le littoral de la côte Basque*, Rapport final BRGM/RP-57173-FR, 51p
- Pirazzoli, P.A., 1973, *Inondations et niveaux marins à Venise*. Mémoires du Laboratoire de Géomorphologie de l'École Pratique des Hautes Études, Dinard., n 22, 284 p.
- Pugh, D., 1987, *Tides, surges and mean sea-level*. John Wiley & Sons, 472 pp.
- Rogers, W.E., J.M. Kaihatu, L. Hsu, R.E. Jensen, J.D. Dykes et K.T. Holland, 2007, Forecasting and hindcasting waves with the SWAN model in the Southern California Bight, *Coastal Engineering* 54, pp.1–15
- Ruggerio, P., P.D. Komar, W.G. Mcdouglas, J.J. Marra et R.A. Beach, 2001, Wave Runup, extreme water levels and the erosion of properties backing beaches, *Journal of Coastal Research* 17 (2), pp. 407-419
- Saffache, P., J.V. Marc et O. Cospar, 2002, *Les cyclones en Martinique : quatre siècles cataclysmiques (éléments pour une prise de conscience de la vulnérabilité de l'île de la Martinique)*, Paris : Ibis Rouge Éditions - Presses Universitaires Créoles, Collection Géographie & Aménagement des Espaces Insulaires, 197 p.
- Salmon, S.A., K.R. Bryan et G. Coco, 2007, The use of video systems to measure run-up on beaches. *Journal of Coastal Research*, SI 50 (Proceedings of the 9th International Coastal Symposium), pp. 211 – 215
- Sheremet, A., T. Staples, F. Arduin, S. Suanez et B. Fichaut, 2014, Observations of large infragravity wave runup at Banneg Island, France. *Geophysical Research Letters*, 41(3), pp. 976-982
- Service hydrographique et océanographique de la Marine (SHOM), 2010, *Références altimétriques maritimes (zéros hydrographiques)- Zone Antilles*. Edition 2010, 2p.
- Simon, B., 1994, *Statistique des niveaux marins extrêmes le long des côtes de France*, Rapport SHOM n° 001/94, avril.

Stockdon, H.F., R.A. Holman, P.A. Howd et A.H. Sallenger, 2006, Empirical parametrization of setup, swash and runup. *Coastal Engineering*, n° 53, pp. 573-588.

Shureman, P., 1971, *Manual of harmonic analysis and prediction of tides*, U.S. Department of Commerce, Coast and Geodetic Survey, Special Publication No 98, October 1971, Second Edition, 336 p.

The SWAN team, 2010-a, *SWAN User Manual, SWAN Cycle III version 40.81*. Delft, The Netherlands, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Environmental Fluid Mechanics Section, 129 p.

The SWAN team, 2010-b, *SWAN Scientific and Technical Documentation, SWAN Cycle III version 40.81*. Delft, The Netherlands, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Environmental Fluid Mechanics Section, 126 p.

Thomas, Y.-F., A. Nicolae Lerma et B.O. Posada, 2012, *Atlas climatologico del mar Caribe colombiano*, INVEMAR, Serie Publicaciones Especiales No. 25, Santa Marta. 132 p.+ CD.

Tolman, H.L., 2002, *Testing of WAVEWATCH III version in NCEP/NWW3 ocean wave model suite*. Tech. Note. No. 214, Ocean Modeling Branch, NCEP/NWS/NOAA, U.S. Department of Commerce, 99 pp.

Westerink, J.J., C.A. Blain, R.A. Luetlich et N.W. Scheffner, 1994, *ADCIRC: An Advanced Three-Dimensional Circulation Model for Shelves, Coasts, and Estuaries, Report No. 2. User's Manual for ADCIRC-2DDI*, Technical Report

Wöppelmann, G., 1997, *Rattachement géodésique des marégraphes dans un système de référence mondial par techniques de géodésie spatiale*. Paris, Observatoire de Paris, Thèse de Doctorat, 252 p.

### **Pour citer cet article**

#### Référence électronique

Alexandre Nicolae Lerma, Yves François Thomas, Pascal Saffache, Paul Durand et Mathieu Lamy, « Modélisation des niveaux marins extrêmes associés à la circulation des cyclones Lenny (1999) et Omar (2008), commune de saint-pierre, littoral nord-ouest de la Martinique », *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne], Volume 14 Numéro 3 | Décembre 2014, mis en ligne le 16 janvier 2015, consulté le 30 octobre 2015. URL : <http://vertigo.revues.org/15326> ; DOI : 10.4000/vertigo.15326

### **À propos des auteurs**

#### **Alexandre Nicolae Lerma**

Laboratoire de Géographie Physique 'Pierre Birot', UMR 8591 CNRS et Université Paris1Panthéon-Sorbonne, 1 place Aristide Briand, 92195 Meudon, France, courriel : alexandre.nicolae@gmail.com

#### **Yves François Thomas**

Laboratoire de Géographie Physique 'Pierre Birot', UMR 8591 CNRS et Université Paris1Panthéon-Sorbonne, 1 place Aristide Briand, 92195 Meudon, France, courriel : thomas@cnrs-bellevue.fr

#### **Pascal Saffache**

Université des Antilles et de la Guyane, Campus de Schoelcher, 97275 Schoelcher Cedex, Martinique, France, courriel : pascal.saffache@martinique.univ-ag.fr.

#### **Paul Durand**

Laboratoire de Géographie Physique 'Pierre Birot', UMR 8591 CNRS et Université Paris1Panthéon-Sorbonne, 1 place Aristide Briand, 92195 Meudon, France, courriel : pdurand@univ-paris1.fr

#### **Mathieu Lamy**

Laboratoire de Géographie Physique «Pierre Birot», UMR 8591 CNRS et Université Paris1Panthéon-Sorbonne, 1 place Aristide Briand, 92195 Meudon, France, courriel : lamy.mathieu@gmail.com

### **Droits d'auteur**

© Tous droits réservés

## **Résumés**

Les submersions marines sont le plus souvent associées à des conditions météorologiques locales de tempête et aux phénomènes bien connus de surcote résultant du cumul de l'effet barométrique inverse et des vents d'afflux. Le déferlement des vagues joue également un rôle prépondérant dans la surélévation totale. Il provoque des variations du niveau d'eau de deux types : une surélévation statique du niveau moyen (surcote de vague) et des variations instantanées provoquées par le jet de rive. Ces deux phénomènes sont responsables dans certains cas de plus de 2/3 de la surélévation totale. Lors de la circulation des cyclones Lenny et Omar, le littoral ouest de l'île de la Martinique a été considérablement affecté. Les surélévations du niveau marin lors du passage au large de ces deux cyclones ont été reconstituées pour le nord-ouest de l'île et particulièrement sur les plages de la commune de St Pierre. Les facteurs de variations du niveau marin ont été décomposés et modélisés en emboîtement d'échelles à partir des modèles ADCIRC pour les composantes de marée et de surcotes météorologiques, SWAN pour la propagation des vagues en zone côtière et les surcotes de vague et enfin pCOULWAVE pour le jet de rive. Ce travail de décomposition des facteurs de variations du niveau marin, associé à la reconstitution par enquêtes de terrain et témoignages, des limites des inondations, met en avant la vulnérabilité de la commune face aux houles cycloniques et la nécessité de prendre en compte l'ensemble des facteurs de variation du niveau marin dans l'étude de l'aléa de submersion et les documents de prévention des risques.

Coastal floods are commonly associated to meteorological local storm conditions and well-known storm surge phenomenon resulting from both reversed barometric effect and wind driven setup. The wave breaking plays a major role too in water level variation on the beach. It causes two kinds of water level changes: a static component called wave setup and an instantaneous one called swash or uprush. Those two phenomenon are responsible in certain case for more than 2/3 of total level rises above mean sea level. During Lenny and Omar hurricane circulation, the Martinique island west coast was considerably affected. Water levels reached during the two hurricanes circulation was reconstituted (hindcasting method) for North West Coast of the island, particularly for the district of St Pierre. Variation factors was decomposed and modeled with nesting method using ADCIRC hydrodynamic model for tide and meteorological surge. The propagation model SWAN and breaking wave model pCOULWAVE, was used to estimate wave setup and swash components. This work about decomposition of sea water variation level associated to reconstitution of floods limits by field inquest and evidences, point up the district vulnerability in front of strong hurricane swell. It also shows the necessity to consider all sea level variation factors in flood risk studies in terms of preventive documents and actions.

## **Entrées d'index**

**Mots-clés** : submersion, houles cycloniques, surcote de vague, jet de rive, Mer des Caraïbes, Martinique

**Keywords** : coastal floods, hurricane swell, wave setup, runup, Caribbean Sea, Martinique Island

**Lieux d'étude** : Amérique centrale et Caraïbe