

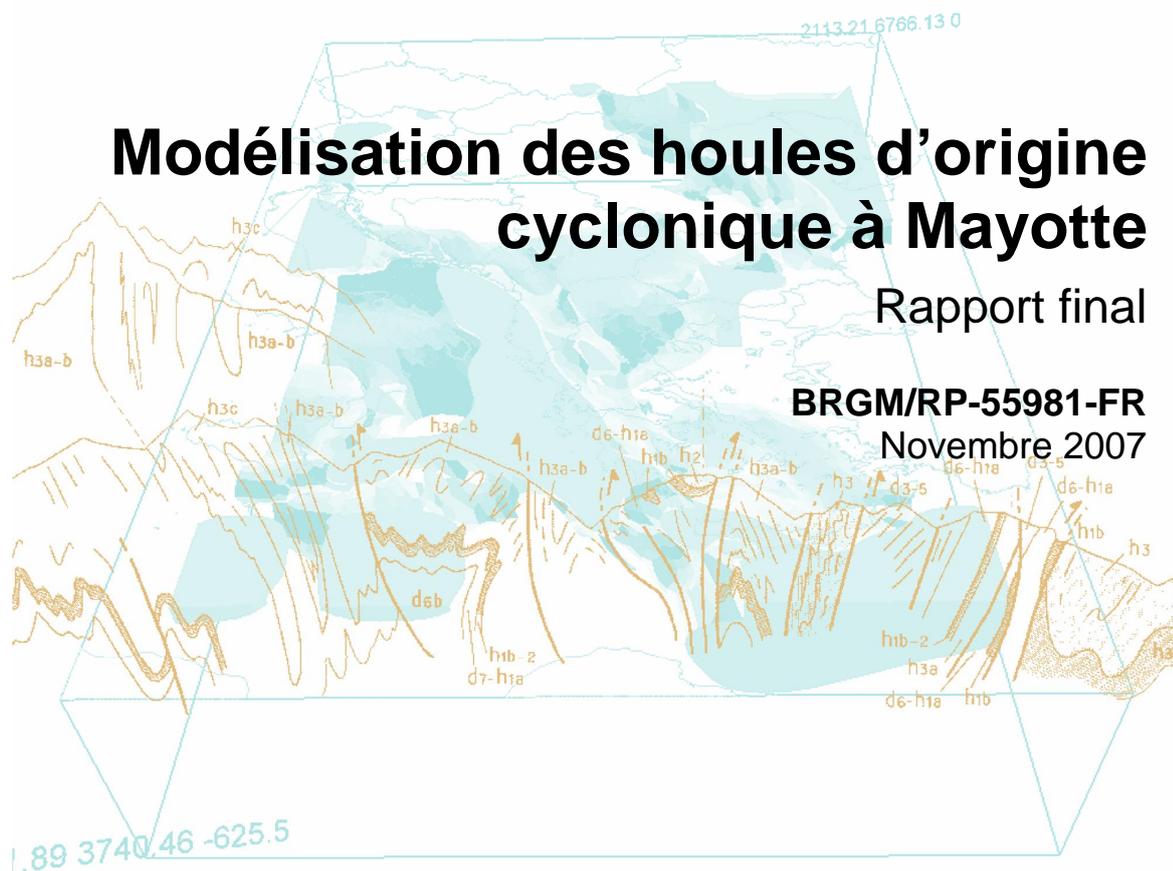


# Modélisation des houles d'origine cyclonique à Mayotte

Rapport final

BRGM/RP-55981-FR

Novembre 2007



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**



# Modélisation des houles d'origine cyclonique à Mayotte

Rapport final

**BRGM/RP-55981 -FR**  
Novembre 2007

Étude réalisée dans le cadre des projets  
de Service public du BRGM 2007 07LITZ01

**S. Lecacheux, Y. Balouin, Y. de la Torre**

**Vérificateur :**

Nom : R. Pedreros

Date :

Signature :

**Approbateur :**

Nom : J-L. Nedellec

Date :

Signature :

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,  
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

**Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.**

**Mots clés** : modélisation, surcote, vagues, cyclone, Mayotte

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

**LECACHEUX S. ; BALOUIN Y. et DE LA TORRE Y. (2007)** – Modélisation des vagues d'origine cyclonique à Mayotte. BRGM/RP-55981-FR, 100 p., 62 fig.

© BRGM, 2007, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

## Synthèse

Cette étude cofinancée par la DE et la dotation de Service Public du BRGM s'attache à la modélisation de la houle cyclonique et de la surcote engendrée par celle-ci (appelée set-up) à Mayotte. Une étude ultérieure pourra permettre d'estimer la surcote totale, intégrant le set-up et la surcote atmosphérique, pour évaluer les submersions marines sur l'île. Dans ce rapport, la surcote désigne uniquement le set-up.

L'objectif est donc de modéliser, pour différents cas de cyclones (standards et extrêmes), l'élévation du niveau de la mer liée à la houle (hauteur de vague et *surcote*) arrivant sur le récif-barrière et dans le lagon de Mayotte.

Les résultats permettent de mettre en évidence un impact relativement modéré pour des cyclones standards (Gloria et cyclone théorique de type Nadia) avec des houles ne dépassant pas 2 m au large et une surcote n'excédant pas 8 cm dans le lagon.

Dans les cas de cyclones théoriques extrêmes de type Kamisys (plusieurs directions ont été simulées), la houle peut atteindre entre 4 et 6 m dans le lagon avec des surcotes allant jusqu'à 25 cm.

Enfin, pour des cyclones plus intenses encore, en faisant l'hypothèse que Mayotte est située à la position la plus critique (le rayon de vent maximum ou mur de l'œil), les vagues peuvent atteindre 7 m dans le lagon et la surcote 1 m sur les récifs.

Ainsi, il semble que le lagon de Mayotte soit suffisamment « vaste » pour contredire le principe selon lequel, en milieu récifal, les surcotes liées à la houle sont supérieures que les surcotes atmosphériques. En effet, le set-up à la côte n'excède pas 55 cm pour un cyclone extrême potentiel tandis que la surcote atmosphérique modélisée par Météo-France dépasse fréquemment 60 cm pour un cyclone « standard » de type Feliksa.

La direction Ouest apparaît en outre comme la plus sensible en terme de hauteur de la houle (Hs) du fait de l'ouverture des côtes sur le large. En revanche, les zones de lagon fermées par le récif (Nord et Sud) sont plus propices à des surcotes significatives.

Sur quelques zones stratégiques de l'île (Longoni, Mamoudzou, Sada, M'Tsapéré, aéroport de Pamandzi) les résultats font apparaître une surcote modérée (entre 14 et 25 cm) pour une exposition à la houle toutefois relativement importante pour Mayotte (cas du cyclone Kamisys).

L'absence de mesures de vagues sur Mayotte en conditions cycloniques ne nous a pas permis de valider les différentes simulations effectuées. Néanmoins des études comparables où des observations étaient disponibles ont révélé des erreurs maximales de près de 18% sur la hauteur des vagues modélisées (Phadke et al. 2003).

En termes de cartographie de l'aléa submersion, il ne s'avère pas souhaitable d'utiliser ces valeurs pour reproduire la méthode des « Atlas des aléas naturels de Mayotte ». Il serait plus judicieux de mettre en œuvre une méthode basée sur le calcul de l'altitude extrême atteinte par les vagues sur le rivage suite au déferlement (modélisation numérique du run-up).

# Sommaire

<b>1. Introduction .....</b>	<b>11</b>
<b>2. Rappels théoriques .....</b>	<b>3</b>
2.1. CYCLONES ET HOULES CYCLONIQUES .....	3
2.1.1. Structure et trajectoire d'un cyclone .....	3
2.1.2. Houle cyclonique .....	4
2.1.3. Les cyclones à Mayotte .....	5
2.2. LES FACTEURS A L'ORIGINE DES SURCOTES .....	6
2.2.1. Surcote atmosphérique .....	6
2.2.2. Surcote liée aux vagues : set-up .....	7
2.3. PARAMETRES CALCULES DANS CETTE ETUDE .....	9
<b>3. Données bathymétriques utilisées et construction des MNT .....</b>	<b>11</b>
3.1. DONNEES BATHYMETRIQUES .....	11
3.2. CONSTRUCTION DES MNT .....	11
3.3. INCERTITUDE ET VALIDITE DES MNT .....	13
<b>4. Modèle utilisé .....</b>	<b>15</b>
<b>5. Données initiales et choix des scénarii .....</b>	<b>21</b>
<b>6. Un cas réel : Gloria .....</b>	<b>23</b>
6.1. CARTE D'IDENTITE ET OBSERVATIONS .....	23
6.2. CONFIGURATION DE LA SIMULATION .....	23
6.3. SIMULATION AU RANG 1 .....	24
6.3.1. Données d'entrée .....	24
6.3.2. Test de sensibilité au vent .....	25
6.3.3. Résultats .....	27
6.4. SIMULATION AU RANG 2 .....	28
6.4.1. Recherche du pic de tempête .....	28
6.4.2. Résultats .....	30

6.5. INCERTITUDES ET VALIDITE DE LA SIMULATION .....	33
6.6. CONCLUSIONS .....	33
<b>7. Tempête tropicale théorique.....</b>	<b>35</b>
7.1. CARTE D'IDENTITE.....	35
7.2. SIMULATIONS NUMERIQUES .....	36
7.2.1. Simulation au rang 1.....	36
7.2.2. Simulation au rang 2.....	39
7.3. INCERTITUDES ET VALIDITE DE LA SIMULATION .....	42
7.4. CONCLUSIONS .....	43
<b>8. Cyclone intense.....</b>	<b>45</b>
8.1. CARTE D'IDENTITE.....	45
8.2. SIMULATIONS NUMERIQUES .....	46
8.3. RESULTATS .....	47
8.3.1. Hauteur et surcotes liées aux vagues .....	47
8.3.2. Tests de sensibilité au vent dans le lagon .....	68
8.4. ETUDE DE ZONES PARTICULIERES .....	69
8.4.1. AEROPORT DE PAMANDZI .....	69
8.4.2. PORT DE LONGONI .....	71
8.4.3. VILLE DE MAMOUDZOU .....	72
8.4.4. VILLE DE SADA.....	73
8.4.5. DEVIATION ROUTIERE DE M'TSAPERRE.....	75
8.5. INCERTITUDES ET VALIDITE DE LA SIMULATION .....	77
8.6. CONCLUSIONS .....	77
<b>9. Situation très intense potentielle .....</b>	<b>79</b>
9.1. SIMULATIONS NUMERIQUES .....	79
9.2. RESULTATS .....	80
9.2.1. Hauteur des vagues .....	80
9.2.2. Surcote.....	87
9.3. CONCLUSIONS .....	94

<b>10.</b>	<b>Exploitation des résultats de l'étude dans le cadre des risques littoraux</b>	<b>95</b>
10.1.	NOTIONS DE BASE .....	95
10.2.	EXPLOITATION DES RESULTATS .....	95
<b>11.</b>	<b>CONCLUSIONS.....</b>	<b>97</b>
<b>12.</b>	<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>99</b>

## Liste des illustrations

Illustration 1- Schémas de la trajectoire classique des cyclones ( <a href="http://www.prim.net">http://www.prim.net</a> ): A gauche, effet de la force de coriolis (déviation à droite dans l'HN et à gauche dans l'HS). A droite, trajectoires classiques des cyclones vers Mayotte.....	3
Illustration 2- Schéma explicatif de la direction de la houle dans le cas d'un cyclone lent. $\Theta$ représente la déviation de la houle par rapport au vent (Moon and al. 2003).....	5
Illustration 3 - Atténuation de la houle et surcote induite au niveau d'un récif frangeant (d'après Massel et Gourlay, 2000, modifié).....	8
Illustration 4 – Délimitation des grilles de « Rang 1 » et « Rang 2 » .....	12
Illustration 5 – Grille de MNT finale pour les simulations de Rang 2 .....	12
Illustration 6 - Tableau récapitulatif des propriétés de SWAN .....	19
Illustration 7 - Tableau des simulations de l'étude .....	22
Illustration 8- Trajectoire de Gloria (©MétéoFrance, à gauche) et Image Meteosat de Gloria (©NOAA, à droite).....	23
Illustration 9 – Caractéristiques de la grille de calcul au rang 1.....	24
Illustration 10 – Caractéristiques des grilles de données ou simulations atmosphériques et océanographiques.....	24
Illustration 11 - Champ de vent SeaWinds visualisé avec IDV le 02/03/2000 lors de la tempête Gloria. La croix rouge indique la position de Mayotte.....	25
Illustration 12 – Résultats du test de sensibilité aux données de vent pour Gloria. Sur les trois figures, le vent (en m/s) est représenté par les vecteurs et la hauteur significative (en m) par les contours colorés. A : Simulation en utilisant le vent issu de NWW3 ; B : simulation en utilisant le vent de SeaWinds, C : simulation sans vent.....	26
Illustration 13- Simulation de la tempête tropicale Gloria à grande échelle avec les données de vent SeaWinds ; Evolution de la tempête du 01/03/2000 au 02/03/2000 : hauteurs significatives des vagues (m) et vecteurs du champ de vent.....	27
Illustration 14 – Caractéristiques de la grille de calcul au rang 2.....	28

Illustration 15 – A : Position des capteurs virtuels. B : Série temporelle illustrant l'augmentation de la hauteur significative des vagues (m) lors du cyclone Gloria sur la côte ouest de Mayotte. ....	29
Illustration 16 - Résultats de la simulation du pic du cyclone Gloria au rang 2 : Surcote liée à la houle. Les traits en gras marquent les récifs. ....	31
Illustration 17- Résultats de la simulation du pic du cyclone Gloria au rang 2 : Hauteur significative (m) et vecteurs de direction de la houle.....	32
Illustration 18 – Variations de la hauteur significative du large vers la côte au pic du cyclone Gloria. Coupe dans la baie de Tsingoni (A) et au niveau de la Pointe Kani (B). ....	33
Illustration 19 - Trajectoire de Nadia ( <a href="http://www.ac-reunion.fr/pedagogie/cotamarp/temps/cyclone/mayotte1950-1999/annees90/an90.htm">http://www.ac-reunion.fr/pedagogie/cotamarp/temps/cyclone/mayotte1950-1999/annees90/an90.htm</a> ). ....	35
Illustration 20 –Données SeaWinds pour le 24/03/1994 à 6h. ....	36
Illustration 21 - Caractéristiques de la simulation d'une tempête tropicale théorique .....	37
Illustration 22 - Résultats du test de sensibilité aux conditions hydrodynamiques initiales pour la tempête tropicale théorique. Sur les deux figures, la hauteur de houle significative (en m) est représentée par les contours colorés et la direction des vagues par des flèches. A: Simulation avec une houle de 1 m au bord est, B : Simulation avec une houle nulle au bord est. ....	38
Illustration 23 - Résultat de la simulation pour une tempête tropicale théorique: hauteur significative (m) et vecteurs de direction de la houle.....	40
Illustration 24 - Résultat de la simulation pour une tempête tropicale théorique: Surcote liée à la houle.....	41
Illustration 25 - Résultat de la simulation d'une tempête tropicale théorique: Zoom de la carte de surcote sur Petite-Terre et l'aéroport de Pamandzi.....	42
Illustration 26 - Trajectoire du cyclone Kamisy ( site <a href="http://www.ac-reunion.fr/pedagogie/cotamarp/temps/cyclone/mayotte1950-1999/annees90/an90.htm">http://www.ac-reunion.fr/pedagogie/cotamarp/temps/cyclone/mayotte1950-1999/annees90/an90.htm</a> ) .....	45
Illustration 27 – hauteurs des vagues en fonction de la vitesse du vent et de sa durée. Extrait du manuel de l'USACE (2001) .....	46
Illustration 28 - - Atténuation de la houle du nord sur le récif. A : coupe NE illustrant la forte diminution de hauteur des vagues sur le récif ; B : pénétration de la houle entre le récif du Nord et M'Zamboro ; C : propagation et reformation des vagues dans le lagon ouest. ....	48
Illustration 29 - – Propagation de la houle du sud vers la côte : A : propagation du large vers la baie de Soulou avec une hauteur restant importante ( plus de 4 m) à l'arrivée dans la baie ; B : forte diminution de la hauteur des vagues sur le Récif Sud qui passent de 7 à 1m. ....	49
Illustration 30 - Propagation des houles d'E, SE et NE. A : ile de M'Zamboro : Malgré une forte diminution des vagues au niveau de la passe de M'Zamboro, les hauteurs à proximité de l'île sont de l'ordre de 4 m ; B : Au sud de Brandele : quelque soit la provenance, les vagues atteignent la côte avec des hauteurs de l'ordre de 3 m. ....	50
Illustration 31 - Propagation des houles d'W, SW et NW. A : secteur de Moliha :la diminution de hauteur des vagues sur le récif est très faible, et elles arrivent à la côte avec une hauteur supérieure à 5 m ; B : A la Pointe Bouéni : quelques soit la provenance, les vagues atteignent la côte avec des hauteurs de l'ordre de 4-5 m. ....	51

Illustration 32 - Résultats de la simulation de Kamisy pour une houle du nord. A : les contours colorés indiquent la hauteur des vagues et les flèches leur direction. B : surcote liée aux vagues. ....	52
Illustration 33 - Résultats de la simulation de Kamisy pour une houle du sud. A : les contours colorés indiquent la hauteur des vagues et les flèches leur direction. B : surcote liée aux vagues. ....	54
Illustration 34 - Résultats de la simulation de Kamisy pour une houle du nord-est. A : les contours colorés indiquent la hauteur des vagues et les flèches leur direction. B : surcote liée aux vagues. ....	56
Illustration 35 - Résultats de la simulation de Kamisy pour une houle d'est. A : les contours colorés indiquent la hauteur des vagues et les flèches leur direction. B : surcote liée aux vagues. ....	58
Illustration 36 - Résultats de la simulation de Kamisy pour une houle de sud-est. A : les contours colorés indiquent la hauteur des vagues et les flèches leur direction. B : surcote liée aux vagues. ....	60
Illustration 37 - Résultats de la simulation de Kamisy pour une houle de nord-ouest. A : les contours colorés indiquent la hauteur des vagues et les flèches leur direction. B : surcote liée aux vagues. ....	62
Illustration 38 - Résultats de la simulation de Kamisy pour une houle d'ouest. A : les contours colorés indiquent la hauteur des vagues et les flèches leur direction. B : surcote liée aux vagues. ....	64
Illustration 39 - Résultats de la simulation de Kamisy pour une houle de sud-ouest. A : les contours colorés indiquent la hauteur des vagues et les flèches leur direction. B : surcote liée aux vagues. ....	66
Illustration 40 – Test de sensibilité au vent par houle d'ouest de 6m : Résultats de la simulation pour une houle avec vent (A1) et sans vent (A2) : Hauteur significative et direction des vagues. B : Surcote liée aux vagues avec vent (B1) et sans vent (B2). ....	68
Illustration 41- Aéroport de Pamandzi: Photographie IGN 2003.....	70
Illustration 42 - Zooms des cartes de vagues sur l'aéroport de Pamandzi. Les contours représentent la hauteur des vagues et les flèches leurs directions. A : Cas Kamisy avec une houle d'est. B : Cas Kamisy avec une houle de sud-ouest.....	70
Illustration 43 - Zoom de la carte du setup sur l'aéroport de Pamandzi pour le cas Kamisy avec une houle d'est. ....	71
Illustration 44 - Baie de Longoni et son port en 2003.A : photographie aérienne IGN 2003. B : Source BRGM.....	71
Illustration 45 – Section allant du large de Mayotte au port de Longoni pour un cyclone type Kamisy avec une houle de nord-ouest.....	72
Illustration 46 - Ville de Mamoudzou (IGN 2003) .....	73
Illustration 47 - Image aérienne de Sada (IGN 2003) .....	73
Illustration 48 - Section allant du large de Mayotte (ouest) à la ville de Sada pour un cyclone type Kamisy, la houle provient du nord-ouest. ....	74
Illustration 49 – Zoom de la carte de la surcote liée aux vagues sur Sada pour un cyclone type Kamisy avec une houle de provenance sud-ouest. ....	75
Illustration 50 - Déviation routière de M'Tsapéré (IGN 2003) .....	76

Illustration 51 – Hauteur significative et surcote liée aux vagues le long de la déviation routière pour un cyclone type Kamisy et une houle d’est.....	76
Illustration 52- Hauteur et direction des vagues pour la marée basse et une houle de sud-ouest d’un cyclone très intense potentiel .....	81
Illustration 53 - Hauteur et direction des vagues pour la mi-marée et une houle de sud-ouest d’un cyclone très intense potentiel.....	82
Illustration 54 - Hauteur et direction des vagues pour la marée haute et une houle de sud-ouest d’un cyclone très intense potentiel .....	83
Illustration 55 - Hauteur et direction des vagues pour la marée basse et une houle de nord-est d’un cyclone très intense potentiel .....	84
Illustration 56 Hauteur et direction des vagues pour la mi-marée et une houle de nord-est d’un cyclone très intense potentiel.....	85
Illustration 57 - Hauteur et direction des vagues pour la marée haute et une houle de nord-est d’un cyclone très intense potentiel .....	86
Illustration 58 - Surcote liée aux vagues pour la marée basse et une houle de sud-ouest d’un cyclone très intense potentiel .....	88
Illustration 59 - Surcote liée aux vagues pour la mi-marée et une houle de sud-ouest d’un cyclone très intense potentiel. ....	89
Illustration 60 - Surcote liée aux vagues pour la marée haute avec une houle de sud-ouest d’un cyclone très intense potentiel.....	90
Illustration 61 Surcote liée aux vagues pour la marée basse et une houle de nord-est d’un cyclone très intense potentiel .....	91
Illustration 62 - Surcote liée aux vagues pour la mi-marée et une houle de nord-est d’un cyclone très intense potentiel. ....	92
Illustration 63 Surcote liée aux vagues pour la marée haute avec une houle de nord-est d’un cyclone très intense potentiel .....	93

# 1. Introduction

Dans le cadre de la réalisation par le BRGM des atlas des aléas naturels à Mayotte (2004), les menaces de submersion marine liées aux surcotes cycloniques ont été mises en évidence. Or, le rôle de la houle sur ces surcotes est aujourd'hui totalement inconnu à Mayotte.

Cette étude cofinancée par la DE et la dotation de Service Public du BRGM s'attache à la modélisation de la houle cyclonique à Mayotte afin de pouvoir disposer de valeurs de surcote liée à la houle pour l'estimation des submersions marines<sup>1</sup>.

L'objectif est donc de modéliser, pour différents cas de cyclones (standards et extrêmes), l'élévation du niveau de la mer liée à la houle (hauteur de vague et *surcote*) arrivant sur le récif-barrière et dans le lagon de Mayotte.

Après un bref rappel théorique sur les cyclones et les phénomènes engendrés (vagues, surcote, submersion), le rapport présente la méthodologie mise en œuvre (données, modèle, choix des scénarii) puis les résultats des simulations pour les différents cas de cyclones étudiés sur l'ensemble du lagon et sur certains secteurs particuliers. Une situation extrême potentielle y est enfin proposée.

---

<sup>1</sup> Cette étude porte uniquement sur la modélisation de la houle. L'estimation de la surcote totale intégrant les données de houle sera conduite ultérieurement.



## 2. Rappels théoriques

### 2.1. CYCLONES ET HOULES CYCLONIQUES

#### 2.1.1. Structure et trajectoire d'un cyclone

Les cyclones se construisent autour d'un point central de très basse pression (jusqu'à 950 hPa) appelé **œil du cyclone**, dont le rayon est compris entre 30 et 60 km. Les isobares, qui forment des cercles concentriques autour de l'œil, ont une pression croissante avec le rayon jusqu'à atteindre la pression atmosphérique standard (1013 hPa). Dans le mouvement des vents entre les zones de hautes et basses pressions, un équilibre se crée entre la force de Coriolis, la force centrifuge, et la force de gradient de pression. Il en résulte un mouvement d'enroulement des vents autour de l'œil, suivant à peu près les isobares mais avec une déviation vers le centre dépressionnaire : la structure générale est une spirale. La rotation est cyclonique (sens trigonométrique dans l'hémisphère nord et horaire dans l'hémisphère sud). Ces vents sont caractérisés en surface par leur turbulence.

La zone la plus active se situe à un rayon entre 50 et 100 km où les effets du cyclone (vent, pluie, houle cyclonique) sont les plus dévastateurs: c'est le **rayon de vent maximum** ou **mur de l'œil**.

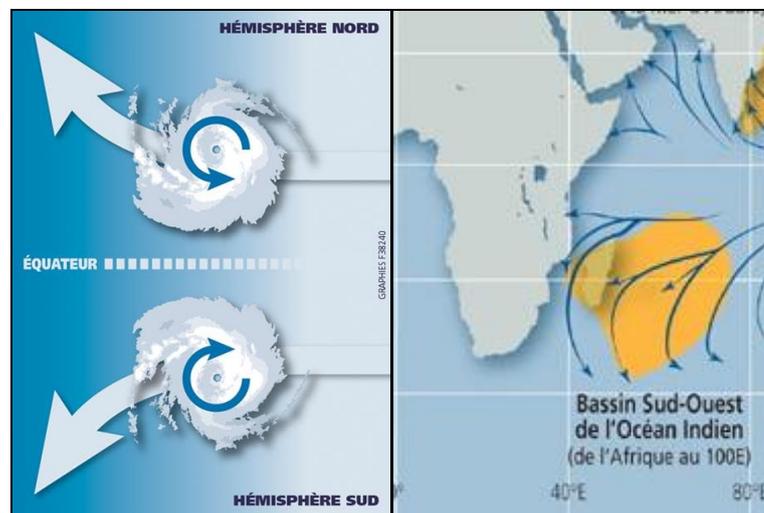


Illustration 1- Schémas de la trajectoire classique des cyclones (<http://www.prim.net>): A gauche, effet de la force de coriolis (déviation à droite dans l'HN et à gauche dans l'HS). A droite, trajectoires classiques des cyclones vers Mayotte.

L'œil du cyclone se déplace, dessinant ainsi la **trajectoire**. Celle-ci est globalement guidée par les alizés aux latitudes tropicales (d'est en ouest), mais dans les régions plus tempérées, elle est fortement déviée par la force de Coriolis qui tend à éloigner le cyclone de l'équateur (cf. Illustration 1). La trajectoire prend alors une allure parabolique en théorie (cf. Illustration 1). En fait, elle est plus complexe à prévoir car les vents dominants sont assez imprévisibles lors de tempêtes et les creux barométriques en surface de l'océan peuvent faire dévier la direction et la vitesse de déplacement du cyclone. Ce déplacement a deux conséquences :

- La vitesse de déplacement du cyclone s'ajoute à celle du vent (à un facteur multiplicatif près). Ainsi, dans l'hémisphère sud, la force du vent est augmentée à gauche de la trajectoire et diminuée à droite (et inversement au nord). La position la plus vulnérable se situe donc à gauche du cyclone dans l'hémisphère sud (et inversement au nord).
- Le fait que le cyclone se déplace produit des changements brutaux dans la direction des vents qui peuvent être diamétralement opposés après le passage de l'œil sur une zone. Il n'est donc pas évident de prévoir l'orientation et la force des vents, surtout près de l'œil, même si elles sont globalement connues.

### 2.1.2. Houle cyclonique

Au cours d'un cyclone, les vents violents soulèvent une mer énorme avec des vagues pouvant atteindre 12 à 15 mètres au mur de l'œil. Ils génèrent une houle caractérisée par des ondulations de grande amplitude se propageant très rapidement sur des centaines de kilomètres. La **houle cyclonique** se déplace souvent plus rapidement que le cyclone lui-même (jusqu'à 100 km à l'avant) et arrive ainsi en signe précurseur de la dégradation atmosphérique.

Elle dépend de nombreux facteurs tels la pression à l'œil, l'intensité des vents, le rayon de vent maximum, la vitesse de déplacement et la trajectoire. Ainsi, elle peut se propager dans plusieurs directions selon les cas avant d'arriver près des côtes où les variations bathymétriques modifient ses caractéristiques et déterminent la hauteur<sup>2</sup> et la direction des **vagues** qui arrivent sur la côte.

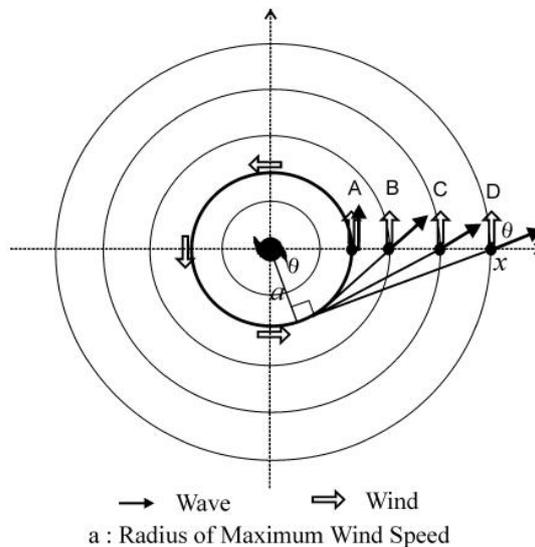
Deux facteurs déterminent principalement la direction de la houle: la distance à l'œil et la vitesse de translation du cyclone (Moon and al. 2003) :

- Si la vitesse de déplacement est faible, la houle suit globalement la direction du vent entre l'œil et le rayon de vent maximum puis est déviée vers l'extérieur du cyclone au fur et à mesure qu'on s'éloigne du centre (cf. Illustration 2). Cette houle se déplace bien plus vite que le cyclone ;

---

<sup>2</sup> La **hauteur** d'une vague concerne la distance entre le creux et la crête de la vague. Pour des besoins statistiques, on utilise couramment la **hauteur significative** (souvent abrégée en Hsig, Hs, H1/3 ou SWH) qui correspond à la moyenne du tiers supérieur de l'ensemble des vagues.

- Si la vitesse de déplacement est suffisamment élevée ( $>8\text{m/s}$ ), la direction dominante de la houle tend vers celle de la trajectoire du vent par le phénomène de résonance. En effet, le **fetch** (distance sur laquelle le vent souffle et forme les vagues) se trouve comme rallongé dans cette direction : les vagues formées sont plus hautes et donnent la direction dominante de la houle. Elles se propagent à une vitesse équivalente à celle du cyclone.



*Illustration 2- Schéma explicatif de la direction de la houle dans le cas d'un cyclone lent.  $\theta$  représente la déviation de la houle par rapport au vent (Moon and al. 2003).*

### 2.1.3. Les cyclones à Mayotte

Dans le cas de Mayotte, située dans le bassin sud-ouest de l'océan indien, les trajectoires des cyclones passant à proximité sont plutôt dirigées vers le sud-ouest (cf. Illustration 1). La direction de la houle cyclonique dépend de la position de l'œil par rapport à l'île. Dans beaucoup de cas, où la célérité du cyclone est suffisamment importante, la houle suit la trajectoire et arrive sur Mayotte du nord-est.

Madagascar joue un rôle « d'écran protecteur » et limite considérablement l'impact des cyclones dont la trajectoire reste à l'est de Madagascar. C'est le cas du cyclone Gloria étudié au chapitre 6.

Pour les cyclones passant à l'ouest de Madagascar, plusieurs configurations sont envisageables : une trajectoire passant au nord de Mayotte (chapitre 7) ou au sud (chapitre 8). Dans ce cas, l'œil du cyclone passe très proche de l'île et les directions de

houle sont fortement dépendantes de la position exacte de l'œil ainsi que des déviations brutales de trajectoire.

Une analyse statistique fréquentielle sur les trajectoires des cyclones et de la houle n'est pas prévue dans le cadre de cette étude. Elle pourra cependant être conduite ultérieurement à partir des données brutes de Météo-France et compléter la démarche entreprise dans cette étude.

## 2.2. LES FACTEURS A L'ORIGINE DES SURCOTES

Les surcotes marines correspondent à une surélévation temporaire du plan d'eau par rapport au niveau moyen lors de tempêtes ou de cyclones. Deux principaux facteurs participent à ce phénomène :

- Les conditions atmosphériques : pression atmosphérique et vent, qui génèrent la **surcote atmosphérique ou onde de tempête**;
- La houle, qui génère la **surcote ou set-up**.

Il faut noter que la **bathymétrie** (profondeur d'eau, récifs...) joue un rôle important sur le set-up car elle modifie considérablement les vagues (hauteur et direction) arrivant sur la côte qui conditionnent le set-up (cf. 2.2.2).

**La marée de tempête** est la superposition de l'onde de tempête et de la marée.

### 2.2.1. Surcote atmosphérique

La chute de la pression atmosphérique entraîne une surélévation du niveau du plan d'eau, c'est le phénomène du **baromètre inverse**. Il s'agit d'une relation linéaire : la perte d'1 hPa équivaut à une élévation d'1 cm du plan d'eau. Il n'est pas rare, au niveau de l'œil, que la pression chute à des valeurs de 950-960 hPa. Ainsi lors du cyclone KAMISY, qui s'est abattu sur Mayotte le 10/04/1984, la pression est descendue à 969 hPa, la chute barométrique accuse 19 hPa en 24 heures. Cela correspond à une élévation de 19 cm du plan d'eau au niveau de l'œil.

Le vent exerce une contrainte à la surface de l'océan qui est à l'origine de trois phénomènes :

- la génération de la houle
- la génération de courants
- **la modification directe de l'élévation du plan d'eau** (surcote, décote)

**Le phénomène de baromètre inverse et l'action directe du vent sont à l'origine de la surcote atmosphérique.**

### 2.2.2. Surcote liée aux vagues : set-up

Les houles, à leur arrivée sur la côte, transfèrent leur énergie sur la colonne d'eau, modifiant ainsi l'élévation moyenne du plan d'eau. Cette force induite par la houle est appelée tension de radiation. L'intensité des tensions de radiation varie en fonction des hauteurs et des directions des vagues, elles mêmes dépendantes des phénomènes de gonflement (*shoaling*), de réfraction, de diffraction et de dissipation qui ont lieu au niveau des côtes récifales et pour des bathymétries particulières. Le set-up est principalement causé par le **déferlement** des vagues sur les récifs et/ou les côtes.

Si l'on considère le cas d'une houle se propageant perpendiculairement sur un récif frangeant, nous pouvons constater (cf. Illustration 3):

- sur la face externe du récif, la hauteur de la houle augmente (zone de gonflement) progressivement jusqu'au déferlement, les tensions de radiation sont alors maximales engendrant la décote du plan d'eau ;
- suite au déferlement, les hauteurs des vagues et par conséquent les tensions de radiation, chutent brusquement transférant leur énergie à la colonne d'eau. Il en résulte une surélévation exponentielle du plan d'eau sur une centaine de mètres ;
- la pente de la plage sous-marine induit de nouveau le gonflement et le déferlement des vagues (zone de surf) qui se sont reformées dans le lagon. Cela s'accompagne d'une nouvelle décote et surcote du plan d'eau.

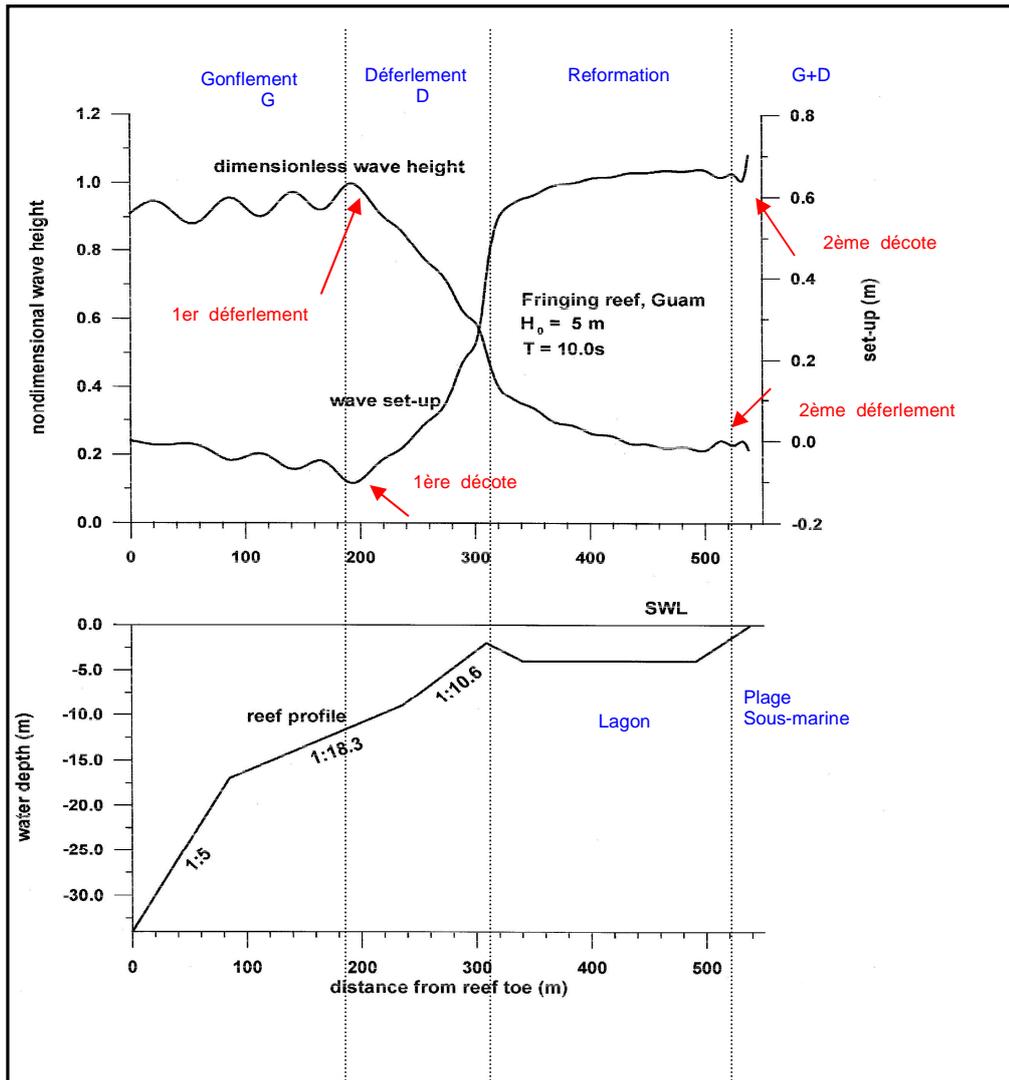


Illustration 3 - Atténuation de la houle et surcote induite au niveau d'un récif frangeant (d'après Massel et Gourlay, 2000, modifié).

L'influence relative de la surcote atmosphérique ou bien de la houle sur l'ampleur de la surcote est fortement dépendante de la bathymétrie du domaine considéré. En présence d'un plateau continental large, c'est-à-dire une zone de pente douce et de profondeur limitée, l'action du forçage atmosphérique est prépondérante. Par contre, lorsque les pentes sont fortes et que les côtes sont protégées par un récif barrière comme à Mayotte, c'est, en théorie, l'action de la houle qui prédomine.

### **2.3. PARAMETRES CALCULES DANS CETTE ETUDE**

Dans le cadre de cette étude, les paramètres calculés sont la hauteur des vagues et le set-up (surcote liée à l'action des vagues) au niveau du récif, du lagon et des côtes de Mayotte en tenant en compte du vent, de la marée et de la houle au large. La surcote atmosphérique n'est pas modélisée. Elle a déjà été étudiée par Météo-France en 2003.



### 3. Données bathymétriques utilisées et construction des MNT

#### 3.1. DONNEES BATHYMETRIQUES

Trois sources de données bathymétriques ont été utilisées dans cette étude pour la construction des MNT (Modèle Numérique de Terrain). Elles concernent les données issues de GEBCO, BathyMay et SHOM :

- **GEBCO** (General Bathymetric Chart of the Oceans), est soutenu par l'organisation hydrographique internationale (IHO), par les Nations Unies (UNESCO) ainsi que par la commission océanographique intergouvernementale (IOC). Les informations bathymétriques contenues dans GEBCO résultent d'une compilation à l'échelle du globe de sondages bathymétriques et de données issues de l'altimétrie satellitale. Elles sont délivrées gratuitement et sont accessibles à l'adresse suivante <http://www.gebco.net/>. La taille de la maille est de 1 minute x 1 minute (~1,85kmx1,85km). Une extraction a été réalisée pour le domaine allant de l'ouest des Comores à l'est de Madagascar.

- **BathyMay** est une campagne de levé bathymétrique de la pente externe de l'édifice volcanique sous-marin de Mayotte. Elle a été réalisée en 2004 en partenariat entre la DAF de Mayotte, le BRGM et l'IPEV, au moyen du sondeur multifaisceaux du navire Marion Dufresne. Les données ont été utilisées sous forme de grille MNT dont la résolution est de 50 m. Une extraction a été réalisée pour la zone entourant le récif barrière de Mayotte.

- le **SHOM** produit l'information bathymétrique de référence pour le territoire français. Les minutes bathymétriques n'étant pas disponibles sous forme numérique pour cette étude, nous avons utilisé les sondes digitalisées par le BRGM en 2003 de la carte de navigation du SHOM n°6237, seules données actuellement sous forme numérique (fichier ASCII des points de sonde en XYZ) pour le lagon de Mayotte.

#### 3.2. CONSTRUCTION DES MNT

Deux grilles MNT sont nécessaires pour la réalisation des modèles emboîtés (Illustration 4) :

- une grille pour les simulations de « rang 1 », pour le modèle allant des Comores à Madagascar. Cette grille est extraite des données GEBCO et n'a pas donné lieu à des traitements plus poussés ;
- une grille pour les simulations de « rang 2 », pour le modèle ciblé sur Mayotte. Cette grille a été construite à partir des données bathymétriques citées ci-dessus et des couches SIG vecteurs (polylignes « récifs » et « courbes de niveau 0 et 5m »

IGN) issues du « SIG inter-administratif de Mayotte ». La construction de cette grille réalisée sous SURFER v8 est détaillée ci-dessous.

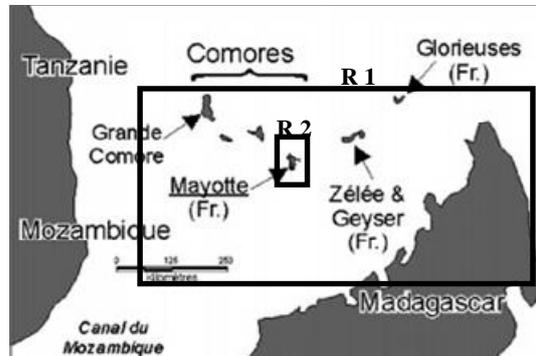


Illustration 4 – Délimitation des grilles de « Rang 1 » et « Rang 2 »

Le système de projection est Combani 1950, ce qui équivaut à de l'UTM 38S. Par contre certaines couches SIG conservent l'ellipsoïde International 1924 ou Hayworth 1909 et un datum. Ces couches ont donc été projetées en WGS84 afin de travailler uniquement en WGS84-UTM38S.

Afin de générer la grille, il est nécessaire de préparer les fichiers afin de convertir les différentes données sources en ASCII. Une cote Z est ainsi affectée aux données vectorielles : de -0.25 m pour la couche « récifs » et 5 et 10 m pour les courbes de niveau. Les fichiers ASCII sont ensuite fusionnés et permettent de créer une grille unique en utilisant une interpolation de type krigeage (Illustration 5).

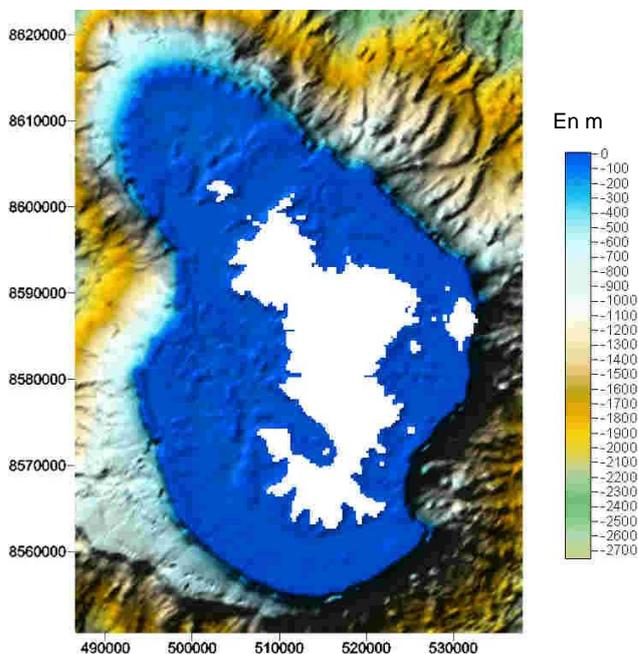


Illustration 5 – Grille de MNT finale pour les simulations de Rang 2

### 3.3. INCERTITUDE ET VALIDITE DES MNT

Le MNT issu de GEBCO conserve une maille de 1'x1' qui s'avère suffisante pour simuler les conditions aux limites pour le rang 2.

Le MNT fusionné possède un maillage de 250 m compte-tenu de l'espacement des points de sondes de la carte SHOM. Bien que moins précise que les données multifaisceaux, cette résolution est jugée suffisante pour une modélisation à l'échelle de l'ensemble du lagon.

Il convient toutefois de préciser que les valeurs dans le lagon peuvent être localement surestimées (moins profonde sur le MNT que dans la réalité). En effet, les sondes figurant sur une carte de navigation correspondent aux « points hauts » du fond afin de signaler les pinacles coralliens et différents haut-fonds. Actuellement, ces points de sondes sont les seuls disponibles mais ils pourront être remplacés à l'avenir par les points de sondes des minutes bathymétriques du SHOM, une fois celles-ci numérisées.



## 4. Modèle utilisé

Le modèle SWAN (Simulating WAVes Nearshore), développé à l'Université de Technologie de Delft (Pays-Bas), permet de calculer de façon réaliste les paramètres décrivant la houle au niveau des zones côtières, des lacs et des estuaires, à partir de données de vent, de bathymétrie et de courants. Une description détaillée du modèle est faite dans Booij et al. (2004). SWAN est basé sur l'équation spectrale de conservation de l'action de la houle qui est résolue suivant un schéma implicite en différences finies.

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} (c_x N) + \frac{\partial}{\partial y} (c_y N) + \frac{\partial}{\partial \sigma} (c_\sigma N) + \frac{\partial}{\partial \theta} (c_\theta N) = S/\sigma$$

avec  $S = S_{in} + S_{nl} + S_{wc} + S_{bf} + S_{dib}$

$N(\sigma\theta)$	: Spectre de densité de l'action de la houle
$\sigma$	: Fréquence relative
$\theta$	: Direction de la houle
$S_{in}$	: Action du vent
$S_{nl}$	: Interaction houle-houle non linéaire
$S_{wc}$	: Dissipation liée au moutonnement
$S_{bf}$	: Dissipation liée au frottement au fond
$S_{dib}$	: Dissipation liée au déferlement bathymétrique

$c_x$  et  $c_y$  correspondent aux vitesses de propagation de la houle

SWAN peut fonctionner en mode stationnaire ou transitoire. Il est formulé en coordonnées cartésiennes (domaines de faible emprise) ou sphériques (pour les petites et grandes échelles), le maillage pouvant être rectangulaire ou curviligne.

### a) Processus pris en compte

SWAN peut modéliser les processus de **propagation** suivants :

- Propagation à travers un espace géographique ;
- Gonflement de la houle
- Réfraction due à des variations spatiales du fond ou des courants ;
- Diffraction

- Blocage ou réflexion par des courants de retour ;
- Transmission à travers des obstacles, blocage ou réflexion à cause de ces obstacles.

SWAN modélise également les processus suivants de **génération et de dissipation** dus à la houle :

- Génération par le vent ;
- Interactions houle – houle (quadruplets et triplets) ;
- Dissipation par moutonnement ;
- Dissipation par déferlement dû aux variations de profondeur ou aux courants ;
- Dissipation par frottement au fond ;

### Dissipation par déferlement

SWAN fait appel à la théorie de la propagation des bores développée par Battjes et Janssen (1978) et adaptée en formulation spectrale par Eldeberky et Battjes (1995) pour calculer la dissipation  $D_{tot}$  des houles irrégulières suite au déferlement :

$$D_{tot} = -\frac{1}{4}k_1Q_b\left(\frac{\bar{\sigma}}{2\pi}\right)H_{mo(max)}^2$$

où :

$k_1$  : est une constante proche de 1

$\bar{\sigma}$  : fréquence moyenne (Hz)

$H_{mo(max)}$  : Hauteur maximale atteinte par les houles lors du déferlement, estimé par :

$$H_{mo(max)} = \gamma d$$

$d$  : profondeur locale

$\gamma$  : estimée par défaut à 0.73 par SWAN mais qui peut être modifiée en fonction de la pente.

$Q_b$  est la fraction des vagues ayant déferlées établie à partir d'une approche probabiliste et en faisant l'hypothèse d'une distribution de Rayleigh des hauteurs des vagues :

$$\frac{1-Q_b}{\ln Q_b} = -8 \frac{E_{tot}}{H_{mo(max)}^2} \quad E_{tot} : \text{énergie totale des vagues contenue dans le spectre}$$

Finalement, le taux de dissipation correspondant à chaque composante spectrale  $S_{dib}(\sigma, \theta)$  est déterminé par :

$$S_{dib}(\sigma, \theta) = -D_{tot} \frac{E(\sigma, \theta)}{E_{tot}}$$

$E_{tot}$  étant l'énergie contenue par chaque composante spectrale de fréquence  $\sigma$  et de direction  $\theta$ .

Les valeurs de  $k_1$  et de  $\gamma$ , 1 et 0.73 respectivement, sont de valeurs "standards" qui pourront être ajustées en milieu récifal.

### Dissipation par frottement au fond

SWAN peut calculer la dissipation liée au frottement au fond selon 3 méthodes : celle de JONSWAP (Hasselmann et al., 1973), la loi de friction de Collins (1972) et celle de viscosité turbulente de Madsen et al. (1988). Toutes ces formulations peuvent s'exprimer de la forme suivante :

$$S_{bf}(\sigma, \theta) = -C_{fond} \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2(kd)} E(\sigma, \theta)$$

$k = \frac{2\pi}{L}$ , est le nombre d'onde.  $L$  correspond à la longueur d'onde

$C_{fond}$  : est le coefficient de frottement au fond qui dépend généralement de la vitesse orbitale de la houle.

Hasselmann et al. (1973) estiment  $C_{fond}$  à 0.038 ou à 0.067  $m^2s^{-3}$  en fonction des conditions de houle.

Collins (1972) utilise une formulation classique de dissipation pour déterminer ce paramètre :

$C_{fond} = C_f g U_{rms}$  avec  $C_f = 0.015$  et  $U_{rms}$  étant la racine des moindres carrés des vitesses des vagues.

Enfin Madsen et al. (1988) proposent la relation suivante tenant compte de la rugosité du fond et de la vitesse des vagues :

$$C_{fond} = f_w \frac{g}{\sqrt{2}} U_{rms}$$

$f_w$  étant un paramètre de friction adimensionnel qui peut être estimé par :

$$\frac{1}{4\sqrt{f_w}} + \log_{10}\left(\frac{1}{4\sqrt{f_w}}\right) = m_f + \log_{10}\left(\frac{a_b}{K_n}\right)$$

$$m_f = -0.08$$

$K_n$  : facteur d'échelle de la rugosité du fond.

$a_b$  représente l'incursion des vagues près du fond. Elle est calculée par :

$$a_b^2 = 2 \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{1}{\sinh^2(kd)} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta$$

### **b) Calcul des tensions de radiation et de la surcote**

SWAN est capable de calculer la surcote induite par la houle en mode profil ou zonal. Pour cela il se sert des tensions de radiations qui sont calculées de la façon suivante :

$$S_{xx} = E(n \cos^2 \theta + n - 1/2)$$

$$S_{xy} = S_{yx} = E n \cos \theta \sin \theta$$

$$S_{yy} = E(n \sin^2 \theta + n - 1/2)$$

$E = \frac{1}{8} \rho g H^2$  : énergie totale de la houle par unité de surface,

$n$  est le rapport de la vitesse de groupe sur la vitesse de phase.  $S_{xy}$  et de  $S_{yy}$  sont nécessaires pour le calcul zonal. La surcote est alors estimée par l'intégration de l'équation suivante :

$$\frac{\delta F_x}{\delta x} + \frac{\delta F_y}{\delta y} + \frac{\delta}{\delta x} (gd \frac{\delta \eta}{\delta x}) + \frac{\delta}{\delta y} (gd \frac{\delta \eta}{\delta y}) = 0$$

$$\text{où, } F_x = -\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \quad \text{et} \quad F_y = -\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} - \frac{\partial S_{yy}}{\partial y}$$

### **c) Limitations**

SWAN ne doit pas être utilisé sur des domaines où les variations de hauteur d'eau sont importantes sur une échelle horizontale de quelques longueurs d'onde. C'est pourquoi les résultats de SWAN ne seront pas précis à proximité immédiate d'obstacles ou au niveau des ports.

**d) Récapitulatif des propriétés du modèle**

<b>Propriétés des modèles</b>	<b>SWAN</b>
Base des formulations	Conservation de l'action de la houle
Domaine de propagation	360°
Théorie de la houle	Linéaire
Stationnaire ou transitoire	Stationnaire/Transitoire
Caractéristiques maillage	Différences finies, cartésien, sphérique, rectangulaire, curviligne
Densité maillage/longueur d'onde des vagues	Indépendant
Dépendance de la qualité des résultats/densité maillage	Faible
Réfraction	Oui
Diffraction	Oui (depuis déc. 2004)
Réflexion	Oui (ouvrages)
Gonflement	Oui
Déferlement	Battjes et Janssen (1978)
Interaction houle-courant	Oui
Interactions vague-vague	Triplet, quadruplet
Génération de la houle (Vent)	Modèles de Phillips, Miles/champs de vent homogènes ou hétérogènes
Dissipation énergie par frottements au fond	Modèle de Hasselman et al. (1973), Collins (1972), Madsen et al. (1988)
Dissipation énergie par moutonnement	Oui
Calcul de la surcote (set-up)	Oui (profil et zone)
Prise en compte d'obstacles	Modèle de Seelig

*Illustration 6 - Tableau récapitulatif des propriétés de SWAN*



## 5. Données initiales et choix des scénarii

En l'absence de données in situ sur la houle à Mayotte, il était prévu d'initialiser les calculs avec les données de l'atlas mondial des vagues ERA-40 (Caires et Sterl, 2004) établi grâce à la base de données de l'ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecast) couvrant 40 années d'analyse entre 1957 et 2002. Ces valeurs, disponibles sur une grille de  $1,5^\circ \times 1,5^\circ$  avec une fréquence de 6h, ne possèdent pas la résolution spatiale suffisante pour capturer les cyclones, aussi les hauteurs de houle peuvent être sous-estimées. Pour pallier à ce problème, un facteur correctif issu de la comparaison des champs de vent ECMWF et de Météo-France (2003) devait être appliqué à ces hauteurs.

L'examen détaillé des données ECMWF montre une :

- nette sous-estimation des vitesses du vent : par exemple, pour le cyclone Kamisy (1984), l'ECMWF indique un maximum de  $2 \text{ ms}^{-1}$  au lieu des  $31 \text{ ms}^{-1}$  estimés par Météo-France (journée du 10 avril)
- mauvaise description des directions

Ainsi, en ce qui concerne les cyclones, les données de l'atlas mondial ERA-40 ont tendance à sous-estimer largement la hauteur des vagues et à fournir des directions de propagation erronées rendant impossible la détermination d'un facteur correctif. Cette solution a donc été abandonnée.

Il a donc été décidé, après des recherches approfondies, et pour répondre au mieux aux scénarii envisagés dans le cahier des charges, d'appliquer des méthodes différentes avec des données d'entrée adaptées à chaque cas. Ces données concernent :

- les résultats du modèle de vague WaveWatch 3 (NWW3) opéré par la NOAA depuis 1997 (National Oceanic and Atmospheric Administration, <ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/waves/>)
- associés aux champs de vent SeaWinds issus de l'altimétrie satellitale depuis 1987 et suivant une grille de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  avec une fréquence de 6h, opéré également par la NOAA (<http://www.ncdc.noaa.gov/oa/rsad/seawinds.html>)
- et pour les événements antérieurs à 1990, les champs déterminés par Météo-France sur Mayotte (2003)

Quatre grands types d'événements ont été sélectionnés :

1) cas réel d'un cyclone modéré, **Gloria**. Les données de vagues sont issues des simulations du modèle opérationnel NWW3. Les données de vent sont celles du SeaWinds. Les valeurs de marée sont celles de la période étudiée, données par le modèle WXTide version 4.7. Ce modèle fournit la hauteur de marée par rapport à la cote marine avec une précision de 10 à 20 centimètres au niveau de Dzaoudzi. Des séries temporelles ont été établies du 29/02/00 à 00h au 02/03/00 à 18h ;

2) cas théorique d'un cyclone plus puissant, de type **Nadia**, construit avec des données de vent SeaWinds du 24/03/94 à 6h (pic du cyclone Nadia sur Mayotte). Les vagues ont été générées intégralement par ce champ de vent et la marée est celle du modèle WXTide version 4.7 pour la date considérée ;

3) des événements plus extrêmes basés sur les observations lors du cyclone **Kamisy** en 1984. Un forçage constant a été appliqué en respectant l'intensité des vents issus de l'étude de Météo-France (2003). Huit directions ont été envisagées. La marée du logiciel WXTide 4.7 a été prise au pic du cyclone sur Mayotte, le 10/04/84 à 12h.

4) des situations extrêmes **potentielles** où Mayotte se situerait au niveau critique du mur de l'œil (cf. 2.1.1) pour des cyclones de l'intensité de Kamisy. Cette dernière simulation, qui ne correspond pas à un cyclone connu et à une date précise, a été l'occasion d'effectuer des tests de sensibilité sur l'influence de la marée.

SCENARII		Données d'entrée	
CAS	Directions de provenance des vagues	VAGUES	VENT
Réel : GLORIA	ouest	WaveWatch III	SeaWinds
Théorique	est	-	SeaWinds
Extrême : KAMISY	8	Forçage constant	Forçage constant
Extrême potentiel	SO et NE	Forçage constant	Forçage constant

*Illustration 7 - Tableau des simulations de l'étude*

Les scénarii utilisés et les résultats obtenus sont présentés dans les chapitres suivants.

## 6. Un cas réel : Gloria

Le premier scénario utilisé pour évaluer l'hydrodynamique associée à un cyclone est basé sur un cas réel, la tempête tropicale Gloria.

### 6.1. CARTE D'IDENTITE ET OBSERVATIONS

Gloria naît le 28 février 2000 à 18 UTC à l'Est de Madagascar. Elle atteint le stade de tempête tropicale et est baptisé le 1<sup>er</sup> mars à 6 UTC. Son intensité maximale est observée le 2 mars à minuit, c'est alors une dépression sur terre qui ne dépassera pas Madagascar. Le 2 mars à minuit, le vent moyen est de 110 km/h avec des rafales de 160 km/h, la pression au centre est estimée à 974 mb.

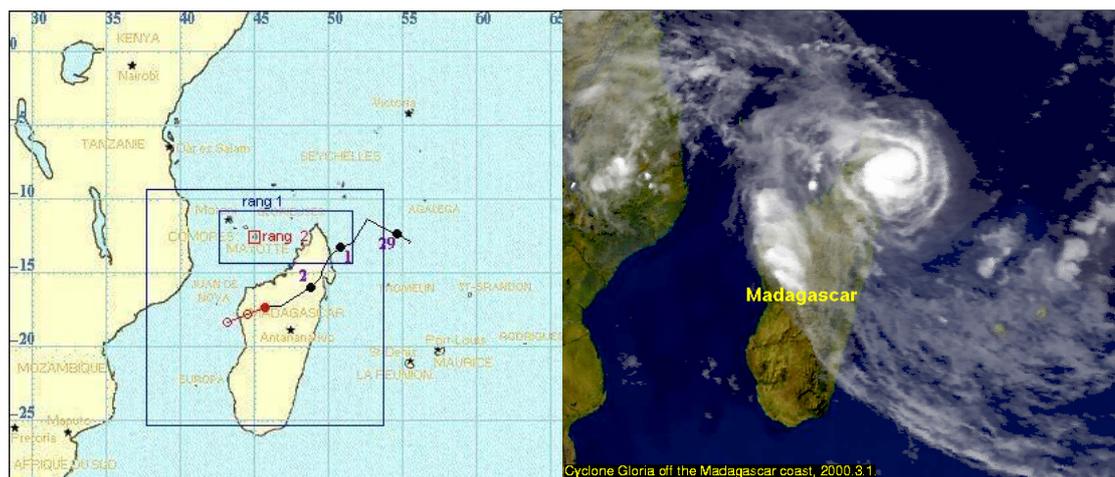


Illustration 8- Trajectoire de Gloria (©MétéoFrance, à gauche) et Image Meteosat de Gloria (©NOAA, à droite).

### 6.2. CONFIGURATION DE LA SIMULATION

Le cas de la tempête tropicale Gloria a été simulé à l'aide de deux grilles emboîtées : le rang 1 correspondant à la simulation des conditions à l'échelle de la région entre Madagascar et les Comores, et le rang 2 centré sur Mayotte. Le rang 1 est forcé par une houle au large issue de NWW3 et par un champ de vent cyclonique. La houle résultante est ensuite utilisée comme condition limite pour le rang 2, le même champ de vent est appliqué.

### 6.3. SIMULATION AU RANG 1

La phase de simulation au rang 1 correspond à une grille très large qui s'étend de l'ouest des Comores à l'est de Madagascar. La maille du modèle est de l'ordre de 4 km. Cette grille large est utilisée pour simuler les conditions de vagues et de vent à grande échelle et fournir les conditions limites qui viendront forcer le modèle à plus haute résolution centré sur Mayotte.

<b>Grille de Calcul au rang 1</b>						
Dimensions (m)	Coordonnées métriques UTM 38 Sud				Nbre de noeuds	Taille mailles (m)
	Xmin	Xmax	Ymin	Ymax		
954095 X 326033	229946	1184041	8450847	8776880	19920	3992 X 3976

Illustration 9 – Caractéristiques de la grille de calcul au rang 1.

#### 6.3.1. Données d'entrée

Les conditions initiales des vagues (hauteur, période, et direction) appliquées aux frontières du modèle sont issues de NWW3.

En ce qui concerne les données de vent, deux sources ont été testées :

- basse résolution spatiale : valeurs issues des archives NWW3. Celles-ci, possédant une résolution spatiale de  $1 \times 1.25^\circ$  (cf. Illustration 10), ne sont pas toujours en mesure de reproduire les vents cycloniques. Il convient donc de tester la validité des résultats avant utilisation
- haute résolution spatiale : des données SeaWinds qui produit des cartes des vents de surface océaniques avec une résolution de + ou – 2 m/s et un maillage de 27 km de résolution (cf. Illustration 10 et Illustration 11)

<b>Grille de NWW3</b>						
Dimensions (m)	Coordonnées métriques UTM				Nbre de noeuds	Taille mailles (m)
	Xmin	Xmax	Ymin	Ymax		
954095 X 326033	229946	1184041	8450847	8776880	32	135055 X 110685
<b>Grille de SeaWinds</b>						
Dimensions (m)	Coordonnées métriques UTM				Nbre de noeuds	Taille mailles (m)
	Xmin	Xmax	Ymin	Ymax		
954095 X 326033	229946	1184041	8450847	8776880	468	27018 X 27671

Illustration 10 – Caractéristiques des grilles de données ou simulations atmosphériques et océanographiques.

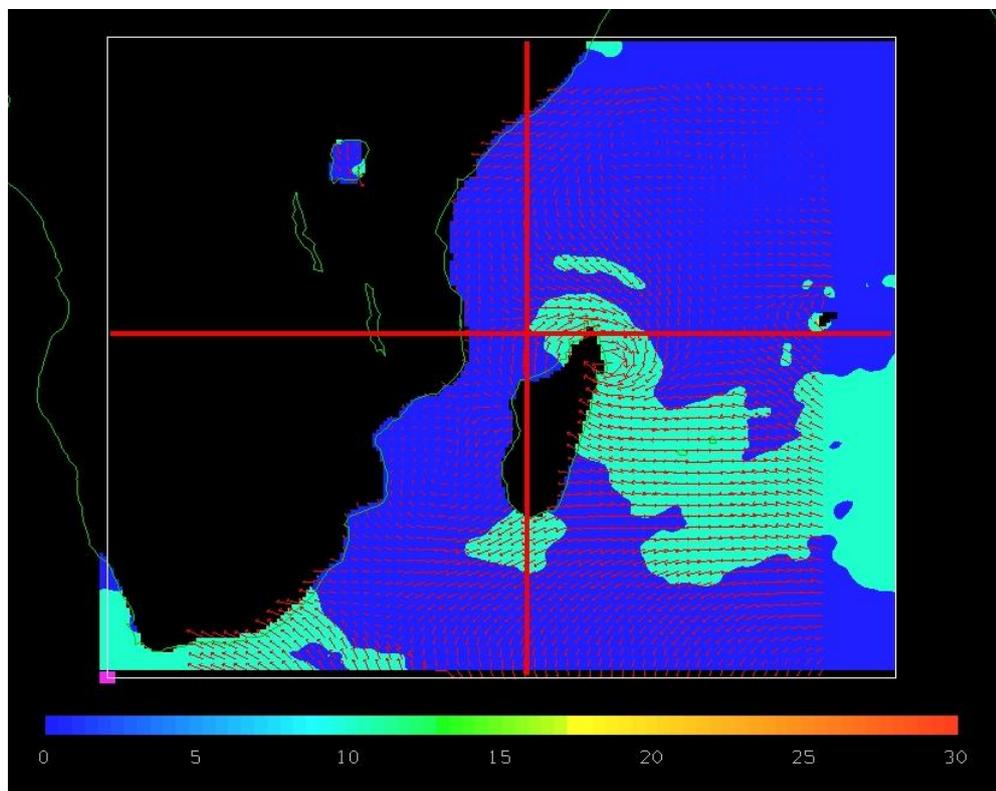


Illustration 11 - Champ de vent SeaWinds visualisé avec IDV le 02/03/2000 lors de la tempête Gloria. La croix rouge indique la position de Mayotte.

Les données de marée utilisées sont issues du modèle WXTide version 4.7 pour la période considérée.

### 6.3.2. Test de sensibilité au vent

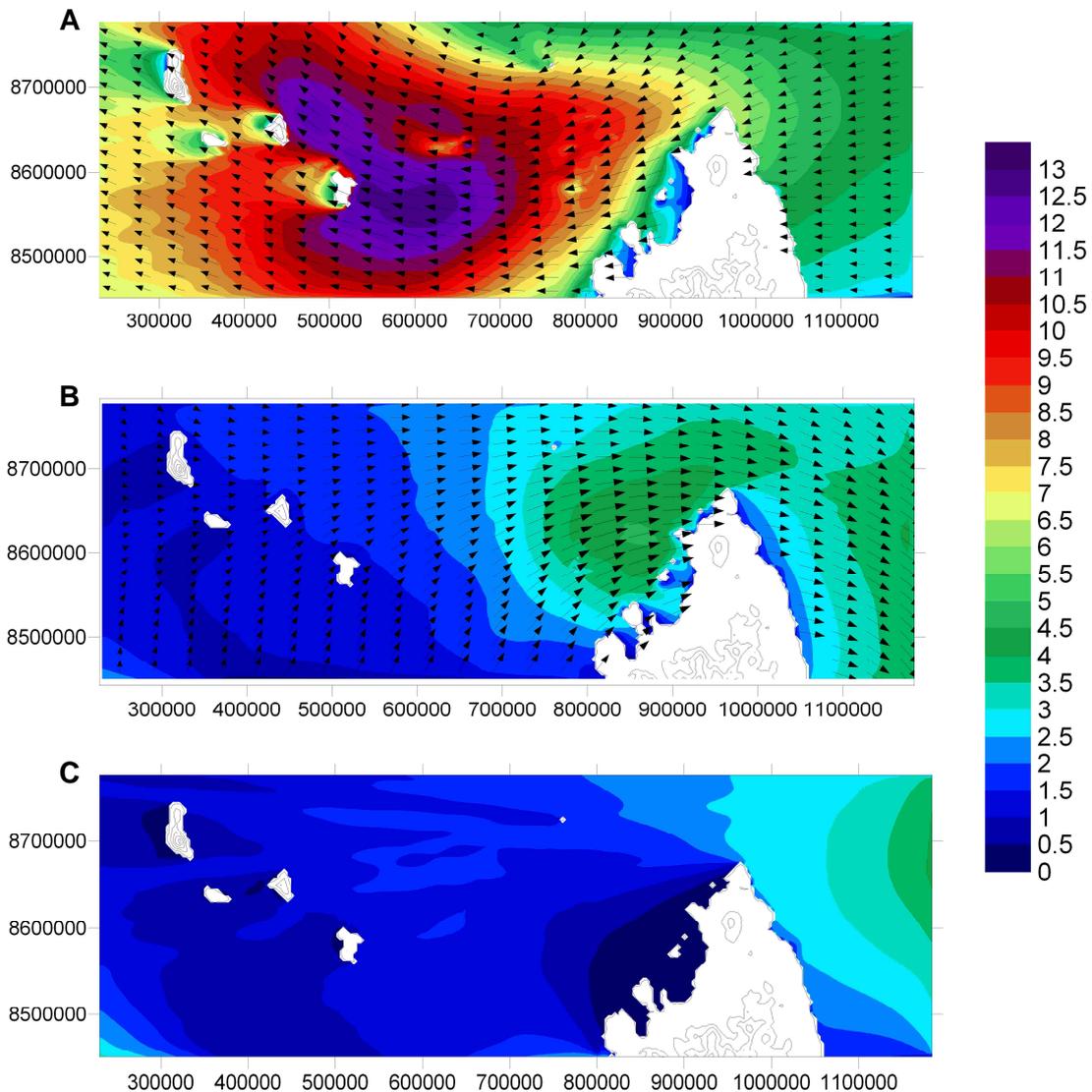
Afin de choisir les données d'entrée de vents pour la simulation à grande échelle, des tests ont été réalisés en utilisant respectivement les sorties du modèles NWW3, les observations SeaWinds, et une simulation sans vent. Les résultats de ces tests sont présentés Illustration 12.

Dans le cas où l'on utilise un forçage par les données du modèle NWW3 (cf. Illustration 12-A), on constate que le champ de vent simulé est erroné. La maille de NWW3 étant trop large, la position de l'œil du cyclone est très approximative, et opposée aux observations disponibles (cf. image satellitale sur Illustration 8). La hauteur de vague qui en résulte est supérieure à 10 m et on peut donc conclure que le vent NWW3 n'est pas représentatif de la réalité en intensité comme en direction.

Le forçage par des données SeaWinds (cf. Illustration 12-B) donne des résultats plus satisfaisants. La position de l'œil du cyclone à l'est de Madagascar est bien reproduite,

et le champ de vent est correct. La hauteur significative des vagues au niveau de Mayotte est de l'ordre de 1m.

Un dernier test sans vent a également été réalisé pour observer la sensibilité du modèle au forçage par le vent. On constate que l'utilisation de données de vent est primordiale à cette échelle car son influence sur la hauteur de la houle est très importante. On observe en effet une forte diminution de la hauteur des vagues (baisse de 50 cm environ) à proximité de Mayotte pour la simulation sans le vent.



*Illustration 12 – Résultats du test de sensibilité aux données de vent pour Gloria. Sur les trois figures, le vent (en m/s) est représenté par les vecteurs et la hauteur significative (en m) par les contours colorés. A : Simulation en utilisant le vent issu de NWW3 ; B : simulation en utilisant le vent de SeaWinds, C : simulation sans vent.*

### 6.3.3. Résultats

Les tests de sensibilité aux données de vent mettent en évidence l'importance du choix des forçages que l'on applique aux limites des modèles. Les données issues de SeaWinds permettent de bien reproduire la position et l'intensité de Gloria. Ce sont donc les résultats de cette simulation qui seront utilisés pour forcer le rang 2.

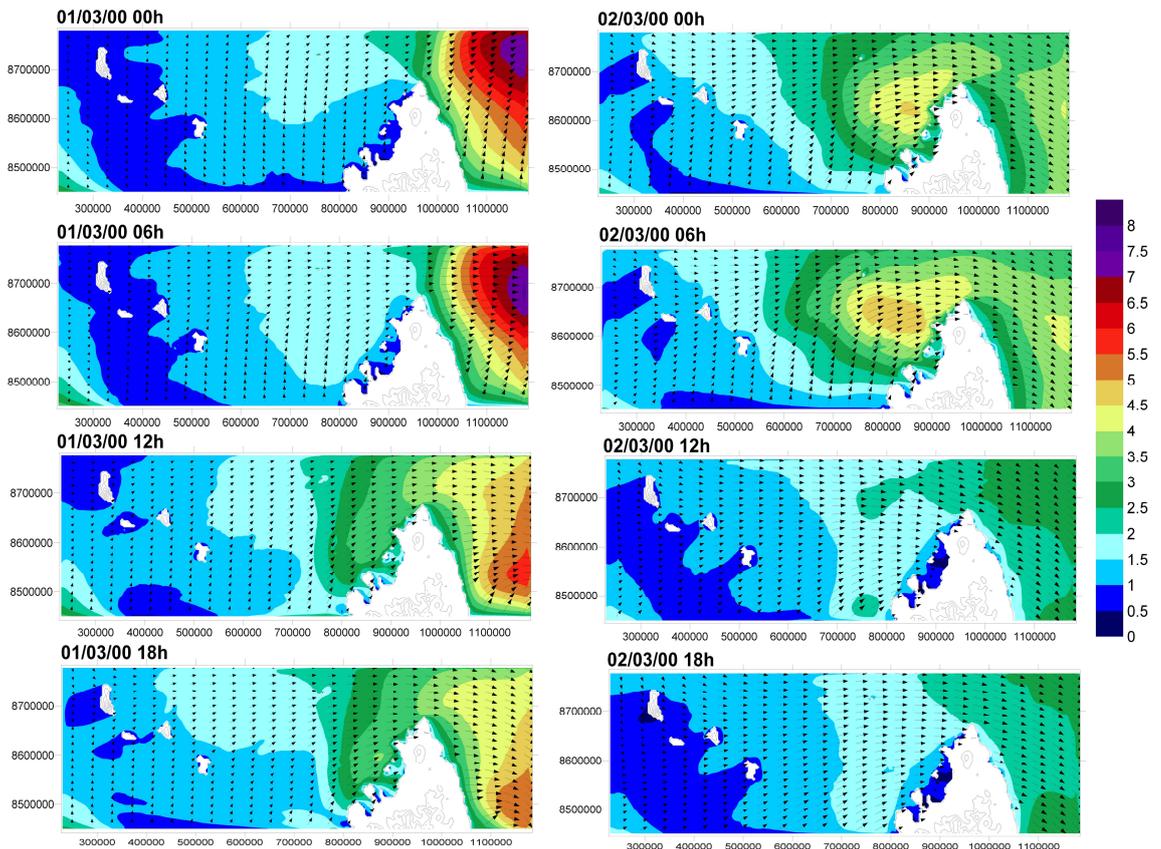


Illustration 13- Simulation de la tempête tropicale Gloria à grande échelle avec les données de vent SeaWinds ; Evolution de la tempête du 01/03/2000 au 02/03/2000 : hauteurs significatives des vagues (m) et vecteurs du champ de vent.

L'illustration 13 représente les conditions de vagues et de vents lors de la tempête Gloria, du 29/02/2000 à minuit jusqu'au 02/03/2000 à 18h. La formation et la montée en puissance de Gloria à l'est de Madagascar jusqu'au 01/03 est bien reproduite par le modèle. Le vent et les vagues sont très puissants à l'est de Madagascar (jusqu'à 10 m de hauteur pour les vagues), alors qu'ils restent modérés à l'ouest de celle-ci. Ainsi, les conditions sur Mayotte sont faiblement énergétiques, la hauteur significative des vagues restant inférieure à 1m jusqu'au 01/03 à 6h.

Lors de la journée du 01/03, l'intensité de la tempête tropicale décroît, mais son déplacement vers le sud-ouest génère une augmentation de la vitesse des vents à l'ouest de Madagascar, et en particulier sur Mayotte. Le vent dirigé vers le nord-est

atteint alors des vitesses de l'ordre de 30 m/s, ce qui induit une augmentation de la hauteur des vagues dans le secteur. Le maximum au niveau de Mayotte est atteint dans la nuit du 01 au 02 mars 2000. Dans la journée du 2 mars, la tempête perd en intensité et disparaît.

Les vagues sont restées modérées, atteignant des hauteurs significatives près de Mayotte de 1.5 à 2m au pic de la tempête.

***Cette simulation met en évidence, pour Mayotte, le rôle écran de Madagascar en ce qui concerne les tempêtes tropicales voire les cyclones en provenance de l'est et dont la trajectoire ne franchit pas l'île. Les hauteurs significatives varient de 1 à 2 m au large de Mayotte alors qu'elles atteignent 10 m à l'est de Madagascar.***

## 6.4. SIMULATION AU RANG 2

Grille de Calcul au rang 2						
Dimensions (m)	Coordonnées métriques UTM				Nbre de mailles	Taille mailles (m)
	Xmin	Xmax	Ymin	Ymax		
51500 X 73000	486500	538000	8550500	8623500	60651	250 X 250

*Illustration 14 – Caractéristiques de la grille de calcul au rang 2.*

### 6.4.1. Recherche du pic de tempête

En raison de la position de l'œil du cyclone à l'est de Madagascar, les vents qui atteignent Mayotte sont dirigés vers le nord-est. Les simulations du vent en utilisant les observations SeaWinds permettent de situer le pic de tempête le 02/03/2000 à minuit. Les hauteurs de vagues simulées confirment cette observation (cf. Illustration 15) : les capteurs virtuels (extraits des simulations SWAN) situés dans la partie ouest du lagon enregistrent une augmentation progressive de la hauteur significative de la houle qui atteint un maximum le 02/03/2000 à minuit.

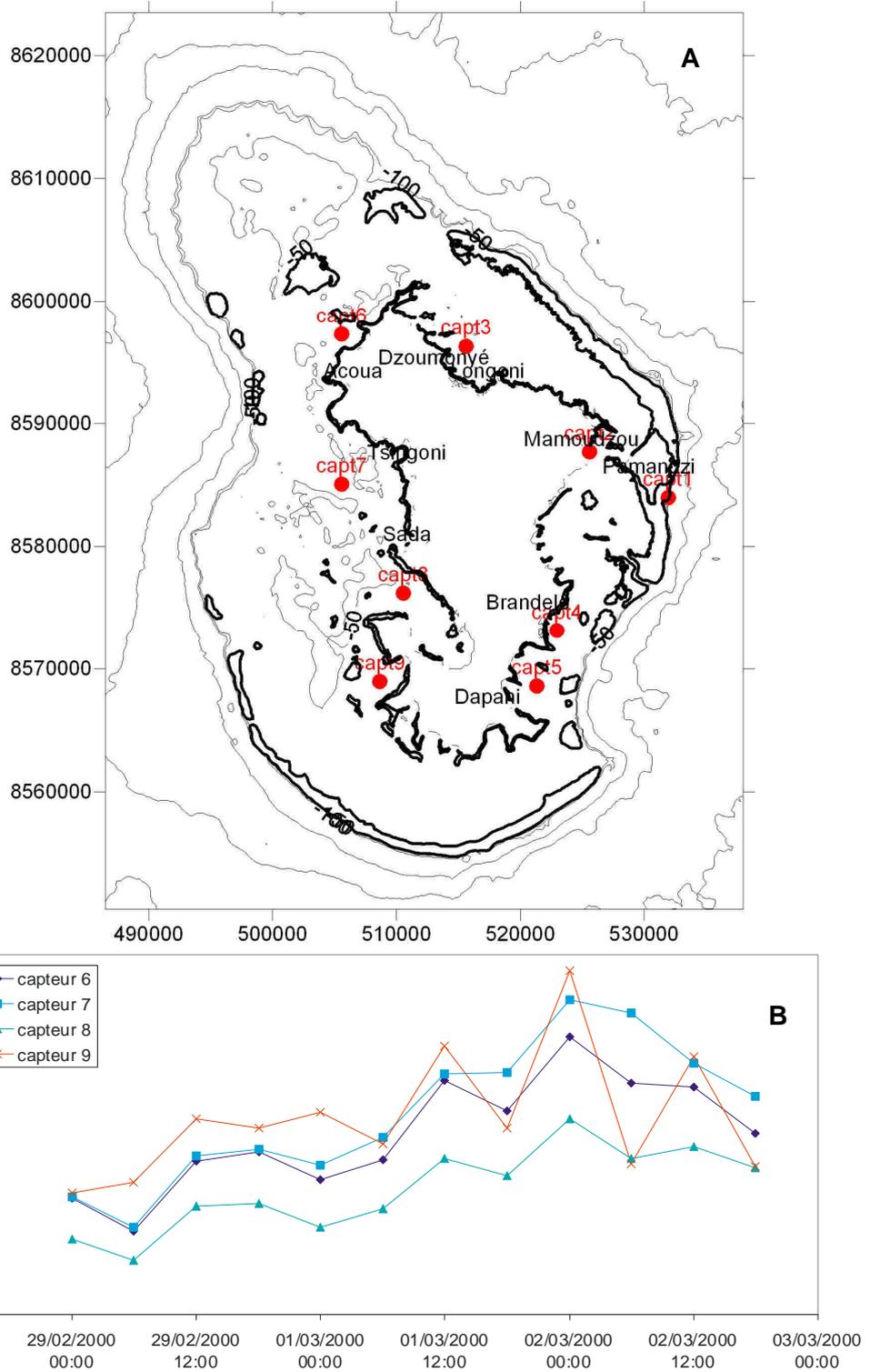


Illustration 15 – A : Position des capteurs virtuels. B : Série temporelle illustrant l'augmentation de la hauteur significative des vagues (m) lors du cyclone Gloria sur la côte ouest de Mayotte.

## 6.4.2. Résultats

Les résultats des simulations d'un cyclone de type Gloria illustrent l'impact modéré de ce type d'événement sur le littoral de Mayotte. On observe notamment que :

- les surcotes liées à la houle (cf. Illustration 16) restent extrêmement faibles et atteignent 1 cm dans la partie sud du lagon. L'augmentation du plan d'eau liée aux vagues est donc négligeable dans ce cas ;
- les hauteurs significatives de la houle (cf. Illustration 17) sont modérées. Atteignant 1.5 m au large, elles sont fortement dissipées en franchissant le récif et malgré une reformation dans le lagon, elles arrivent à la côte avec une hauteur inférieure à 1 m. En raison de la direction de propagation de la houle, deux secteurs sont plus sensibles. Il s'agit de la Pointe Kani, qui fait face à la passe aux bateaux, et de la baie de Tsingoni qui fait face à la Grande passe de l'Ouest (cf. Illustration 18). La houle entre dans le lagon par ces deux passes, et malgré la dissipation de son énergie sur le récif, elle conserve une hauteur supérieure à 1 m, qui se propage jusqu'à la côte. En dehors de ces deux secteurs, la hauteur des vagues à la côte est inférieure à 50 cm.

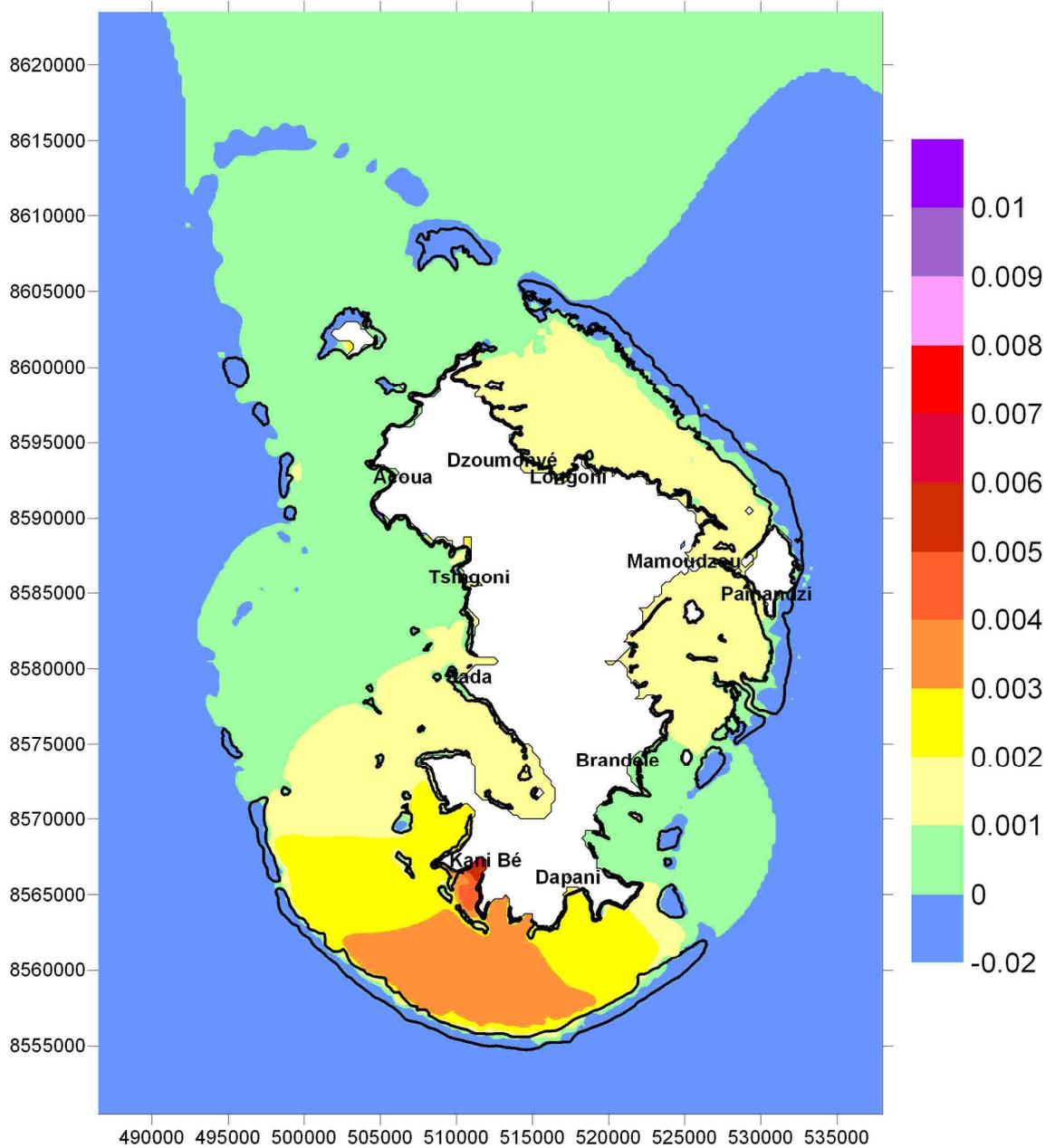


Illustration 16 - Résultats de la simulation du pic du cyclone Gloria au rang 2 : Surcote liée à la houle. Les traits en gras marquent les récifs.

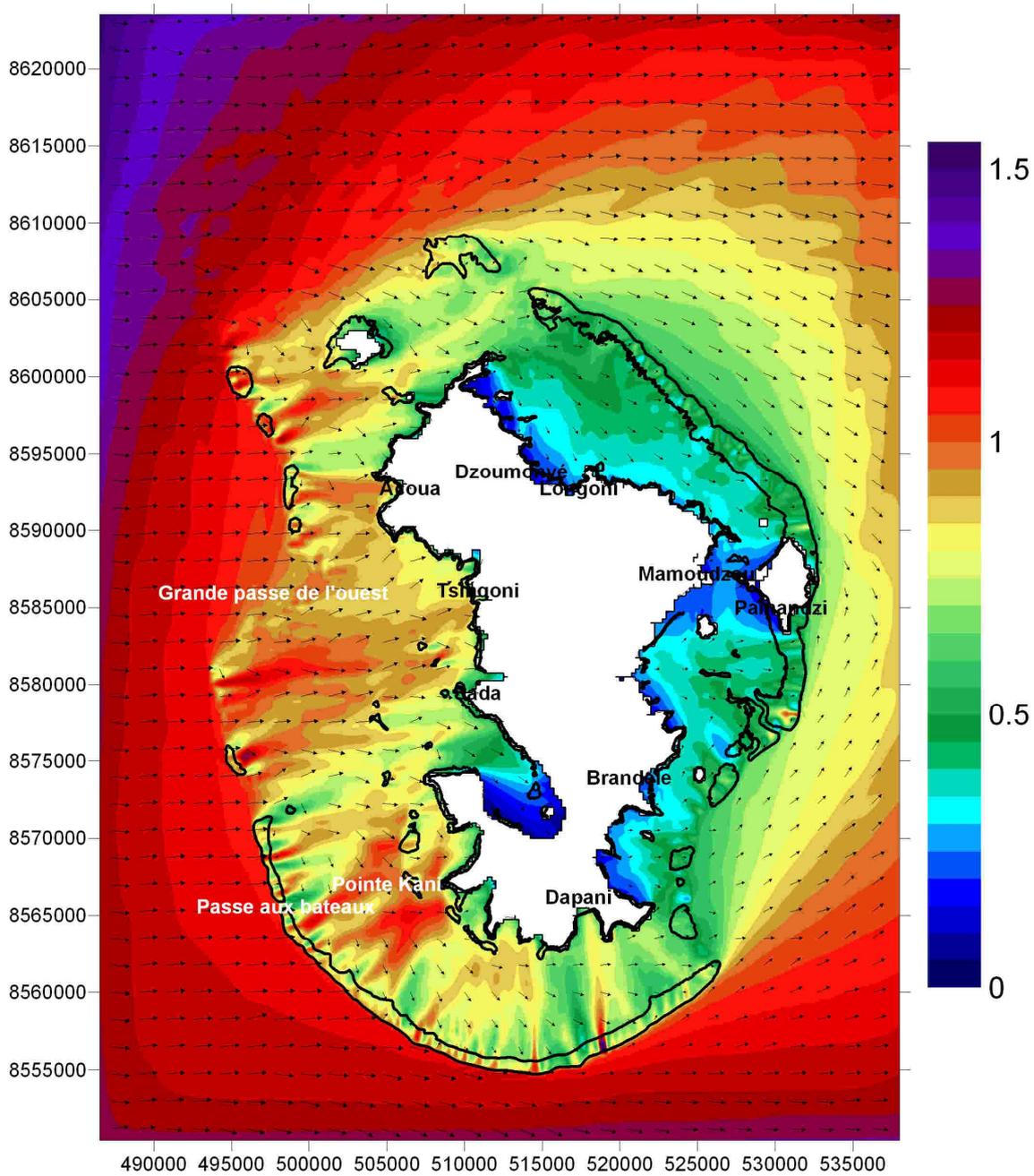


Illustration 17- Résultats de la simulation du pic du cyclone Gloria au rang 2 : Hauteur significative (m) et vecteurs de direction de la houle.

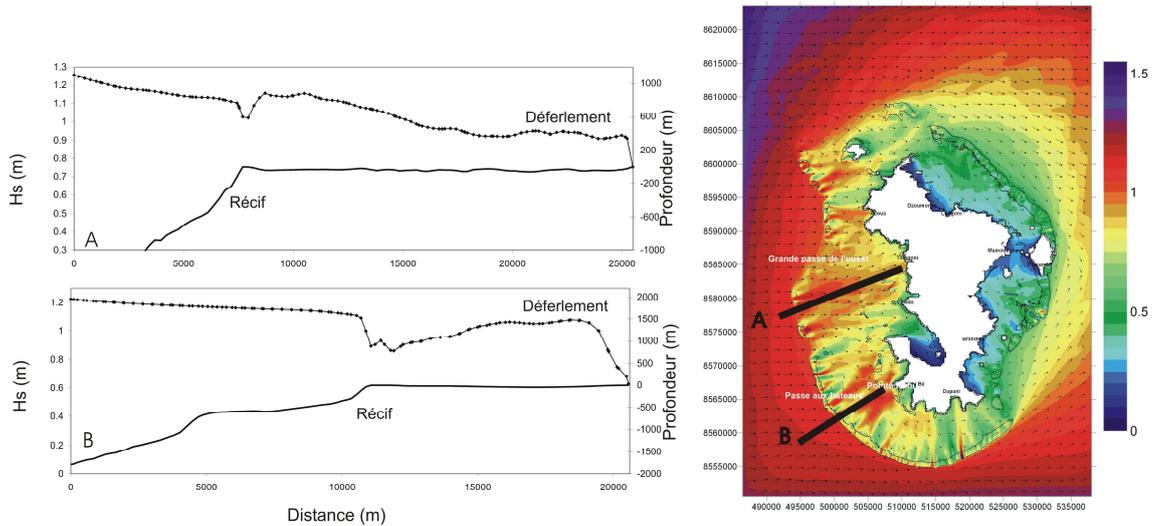


Illustration 18 – Variations de la hauteur significative du large vers la côte au pic du cyclone Gloria. Coupe dans la baie de Tsingoni (A) et au niveau de la Pointe Kani (B).

## 6.5. INCERTITUDES ET VALIDITE DE LA SIMULATION

Les caractéristiques des vagues issues du modèle NWW3 et utilisées pour forcer le rang 1 permettent de tenir compte des conditions océaniques en périphérie de Gloria. Les conditions des vagues associées à Gloria sont déterminées grâce au forçage du rang 1 avec le champ de vent SeaWinds (cf. test de sensibilité par rapport au vent). Aussi, les données utilisées en conditions aux limites du rang 2 sont satisfaisantes car elles intègrent aussi bien les caractéristiques des vagues océaniques environnantes que celles liées uniquement à Gloria.

## 6.6. CONCLUSIONS

Un cyclone du type de Gloria, dont la trajectoire reste à l'est de Madagascar n'a qu'un impact modéré sur Mayotte. En effet, les vagues générées à proximité du rayon de vent maximum sont bloquées par Madagascar qui protège ainsi le golfe du Mozambique. Au large de Mayotte, on observe des hauteurs de vagues qui atteignent plus d'un mètre, mais l'impact à la côte reste modéré grâce à la protection du récif frangeant.



## 7. Tempête tropicale théorique

Le second scénario testé correspond à un cyclone théorique dont la trajectoire passe au nord de Mayotte.

### 7.1. CARTE D'IDENTITE

Le but de cette section est d'étudier un cyclone un peu plus intense dont la trajectoire se prolonge dans le golfe du Mozambique. En effet, les résultats de la simulation précédente ont mis en évidence l'impact limité sur Mayotte que provoquent les cyclones se déplaçant seulement à l'est de Madagascar.

En mars 1994, la tempête tropicale NADIA passe à proximité de Mayotte avant d'atteindre la côte africaine. La base de données SeaWinds a des valeurs de vent dans la région pour le 24 mars 1994 à 6h. Le champ de vent SeaWinds est bien cyclonique, cependant il place l'œil du cyclone au nord de Mayotte alors que sa trajectoire observée passe au sud (cf. Illustration 19 et Illustration 20).

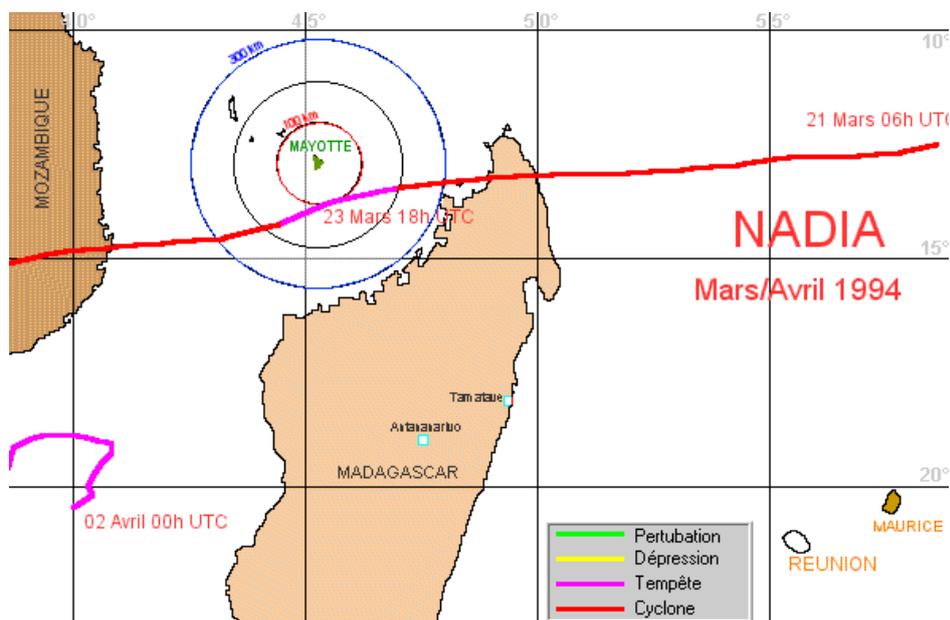


Illustration 19 - Trajectoire de Nadia (<http://www.ac-reunion.fr/pedagogie/cotamarp/temps/cyclone/mayotte1950-1999/annees90/an90.htm>).

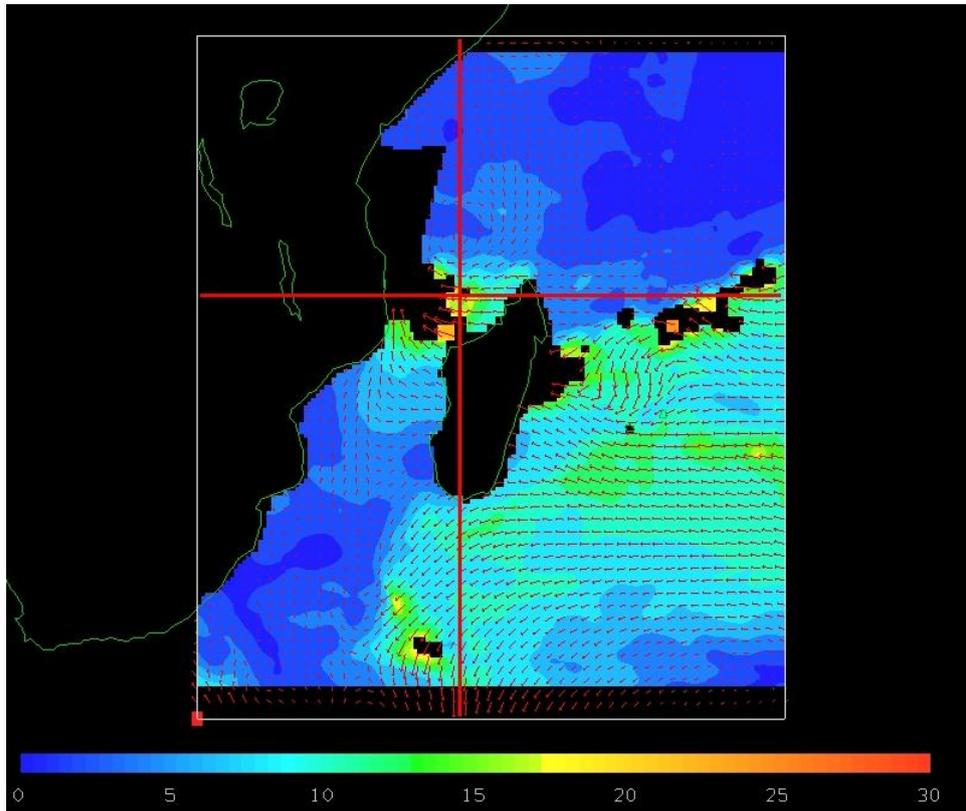


Illustration 20 –Données SeaWinds pour le 24/03/1994 à 6h.

Même si le champ de vent SeaWinds ne peut pas servir à simuler le cyclone Nadia, il nous fournit des données pour étudier le cas d'un cyclone théorique dont la trajectoire passe au nord de Mayotte avec un vent d'environ 20 m/s arrivant d'est sur l'île.

## 7.2. SIMULATIONS NUMERIQUES

De même que pour Gloria, deux simulations emboîtées sont réalisées. Les grilles de calcul au rang 1 et au rang 2 restent les mêmes.

### 7.2.1. Simulation au rang 1

#### Données d'entrée

Le vent est issu des observations SeaWinds de la NOAA avec le même maillage de 25 km. Il faut noter qu'à l'ouest de 44°E, il n'y a pas de donnée de vent et la grille de rang 1 va jusqu'à 42.5°E. Comme la houle se propage d'est en ouest, cela n'a pas de conséquence sur le rang 2 dont la grille commence à 45°E.

Ne disposant pas des conditions de vagues initiales en périphérie du cyclone (les données NWW3 débutant en 1997), leur influence a été évaluée grâce à des tests de sensibilité faisant intervenir plusieurs hauteurs de houle.

La marée, issue du modèle WXTide 4.7 est celle du 24/03/1994 à 6h.

### Tests de sensibilité à la hauteur de houle initiale

Pour évaluer l'influence de la hauteur de houle en entrée du modèle, deux cas sont testés ici (Illustration 21) :

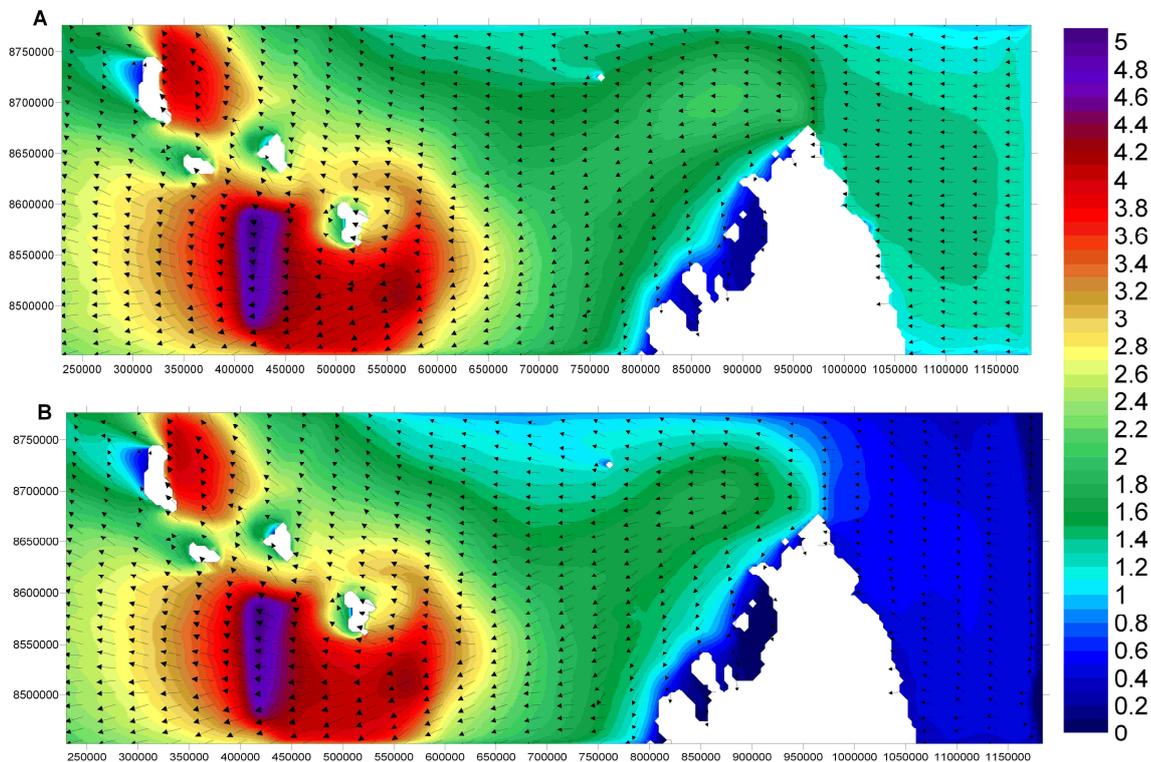
- hauteur de 1m en provenance de l'est, forçage avec Seawinds ;
- mêmes conditions que précédemment mais avec une hauteur de houle nulle au bord est.

<b>Conditions Hydrodynamiques Initiales</b>			
Hauteur houle (m)	Période houle (s)	Direction de provenance houle	Hauteur de marée (m)
1	8.5	Est	1.4
0	0	-	1.4

*Illustration 21 - Caractéristiques de la simulation d'une tempête tropicale théorique*

Dans les deux cas, la houle arrivant sur Mayotte est sensiblement la même en intensité comme en direction (cf. Illustration 22). En effet, la grille du rang 1 est suffisamment étendue pour que les conditions hydrodynamiques cycloniques y soient générées intégralement grâce au champ de vent.

C'est dans le golfe du Mozambique que la houle peut se développer sans obstacle jusqu'à l'île et atteindre des hauteurs significatives importantes grâce à un fetch (distance sur laquelle le vent souffle et génère les vagues) étendu.



*Illustration 22 - Résultats du test de sensibilité aux conditions hydrodynamiques initiales pour la tempête tropicale théorique. Sur les deux figures, la hauteur de houle significative (en m) est représentée par les contours colorés et la direction des vagues par des flèches. A: Simulation avec une houle de 1 m au bord est, B : Simulation avec une houle nulle au bord est.*

Les tests de sensibilité montrent la faible influence, dans la zone de Mayotte, de la hauteur de houle imposée initialement au bord est. Dans les deux cas testés, le vent fait croître considérablement les vagues à partir de la pointe de Madagascar. La hauteur significative passe de 1m environ à 3m à proximité de Mayotte. La direction des vagues suit celle du vent, aucun obstacle ne les dévie jusqu'à Mayotte.

***Cette simulation nous permet d'étudier le cas d'une houle cyclonique d'est avec une hauteur significative de 3m au large de Mayotte.***

### 7.2.2. Simulation au rang 2

Les résultats au rang 1 vers Mayotte étant indépendants de la hauteur de houle au bord est, le rang 2 est initialisé avec les résultats de rang 1 calculés pour une houle de hauteur nulle au bord est.

#### Résultats

Les hauteurs significatives de la houle restent modérées (cf. Illustration 23) dans le lagon :

- Les vagues de 3m arrivant de l'est déferlent sur le grand récif du nord-est qui protège ainsi la côte est de Mayotte. Arrivées dans le lagon, les vagues n'ont pas le temps de se reformer et atteignent la côte avec des hauteurs inférieures à 50 cm. L'endroit le plus sensible se situe au niveau des trois passes Sazilay, où des vagues de 2 m pénètrent dans le lagon, mais leur hauteur reste inférieure à 1 m en atteignant la côte;
- Quant à la partie ouest du lagon, elle reste bien protégée. Les vagues se forment à l'intérieur du lagon, elles gardent des hauteurs faibles à proximité de la côte.

L'illustration 23 permet de mieux comprendre la propagation des vagues dans le lagon et autour des récifs. Si les vagues pénètrent partiellement dans le lagon à l'est, elles contournent les récifs au nord et au sud.

La surcote liée à la houle n'est visible que dans la partie est du lagon (cf. Illustration 24). Elle est d'environ 6 cm autour de Petite-Terre avec des maximums de 8 cm au large de l'aéroport (cf. Illustration 25). Elle décroît graduellement jusqu'aux extrémités sud et nord avec quelques points plus élevés au niveau des passes de Sazilay. Mais de manière générale, la surélévation du plan d'eau liée aux vagues reste faible.

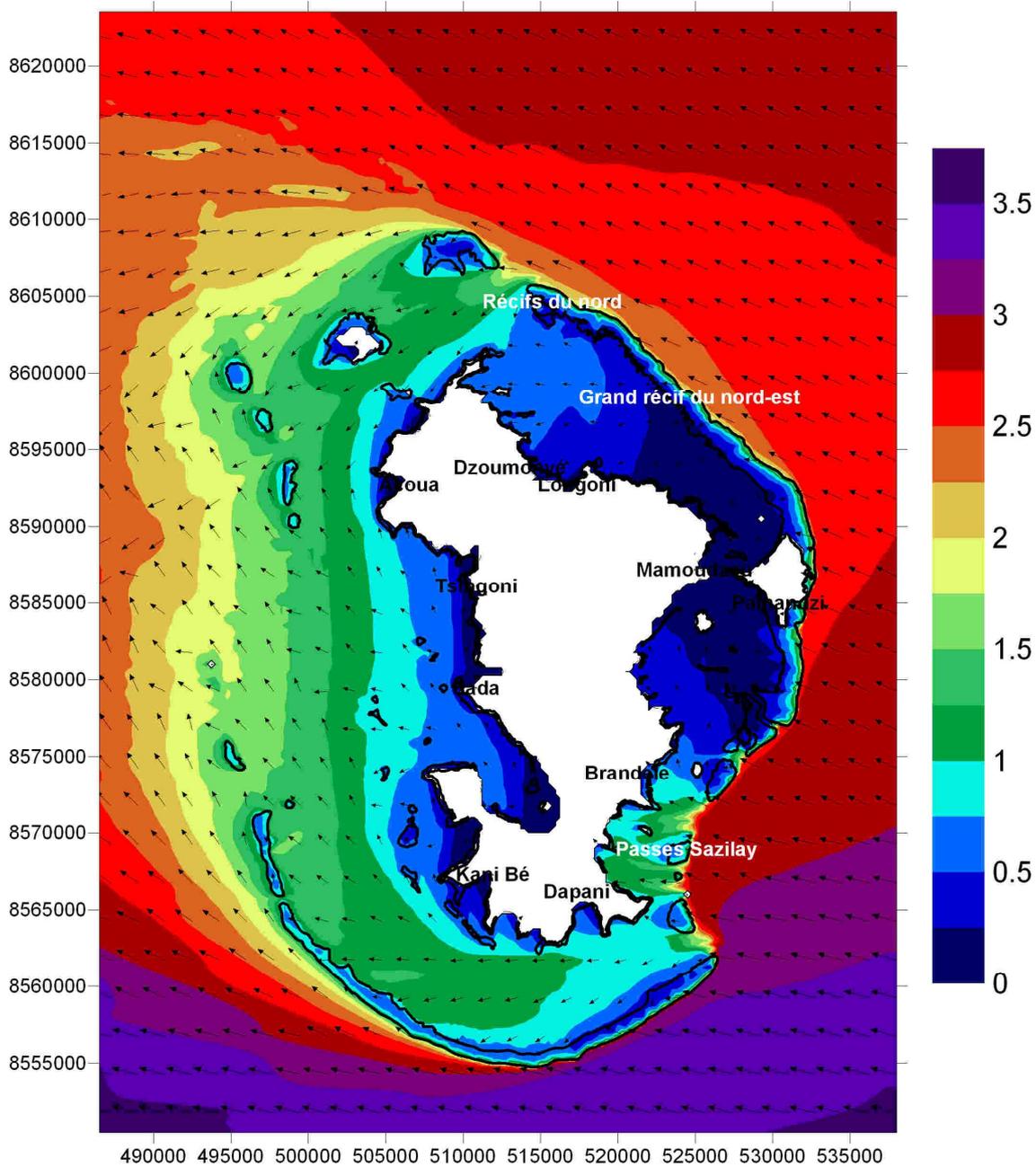


Illustration 23 - Résultat de la simulation pour une tempête tropicale théorique: hauteur significative (m) et vecteurs de direction de la houle.

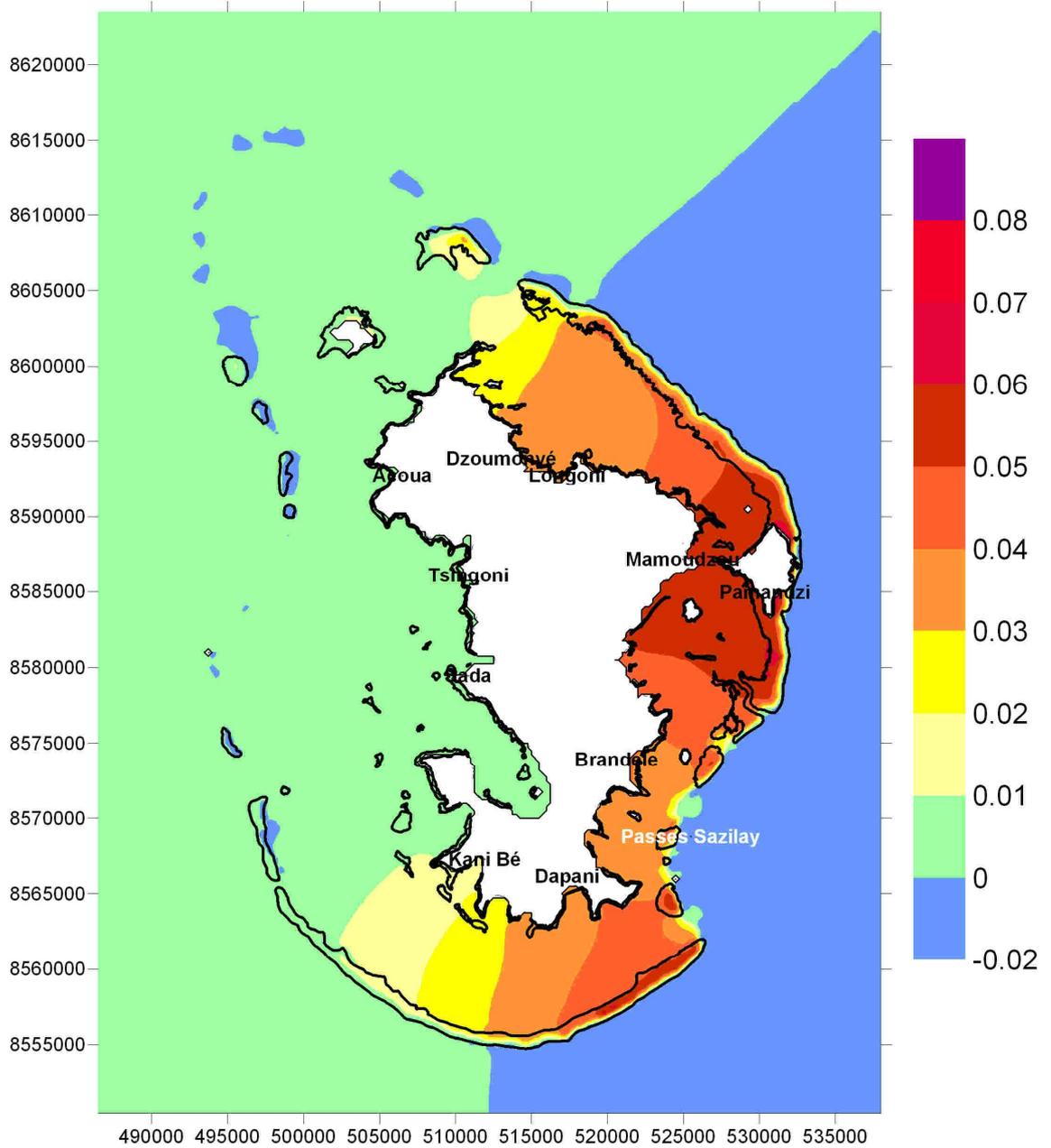


Illustration 24 - Résultat de la simulation pour une tempête tropicale théorique: Surcote liée à la houle

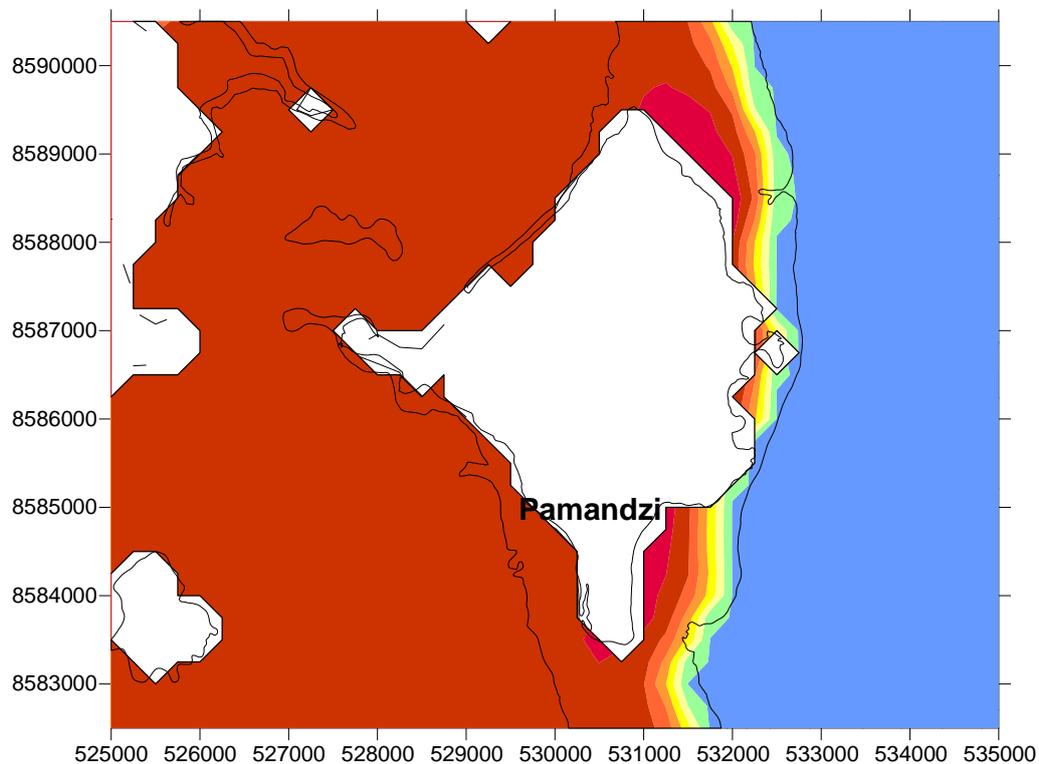


Illustration 25 - Résultat de la simulation d'une tempête tropicale théorique: Zoom de la carte de surcote sur Petite-Terre et l'aéroport de Pamandzi.

### 7.3. INCERTITUDES ET VALIDITE DE LA SIMULATION

Pour le champ de vent donné, l'incertitude porte sur la hauteur et la direction des vagues en entrée du rang 2 puisqu'elles ont été construites au rang 1 avec des caractéristiques arbitraires. Cependant, on a vu dans le test de sensibilité que le rang 1 est suffisamment large pour que les vagues soient construites intégralement par le champ de vent. On doit donc avoir une bonne correspondance entre les vagues et le vent.

## **7.4. CONCLUSIONS**

L'impact du cyclone simulé reste modéré. La houle est fortement dissipée sur le récif est, d'où une pénétration des vagues dans le lagon limitée. Les hauteurs significatives maximales des vagues atteignent un mètre sur la côte et la surcote liée aux vagues reste inférieure à 8 cm. On note toutefois la génération de vagues de plus de 3 m au sud de Mayotte, pouvant avoir un impact significatif sur le récif lui-même.



## 8. Cyclone intense

Les simulations suivantes correspondent à des cyclones de forte intensité. Afin d'évaluer la sensibilité du littoral à de tels cyclones, les caractéristiques de Kamisy ont été utilisées pour simuler des cyclones provenant des directions N, NW, NE, E, W, SW, SE, S, soient 8 scénarii.

### 8.1. CARTE D'IDENTITE

On étudie ici le cas de cyclones intenses tel que Kamisy. Celui-ci est caractérisé par ses vents violents ayant causé de nombreux dégâts matériels.

Kamisy né le 3 avril dans le sud-est de Diego-garcia. Sa route générale va en direction du sud-ouest et, le 10 avril, son œil passe à 30 milles dans le sud-sud-est de Mayotte. Kamisy est alors un cyclone intense (renforcé par son passage sur les eaux chaudes du canal du Mozambique) et sa trajectoire amorce une courbe serrée qui fait diminuer sa vitesse de 12 à 5 nœuds. D'après les informations de Météo France, Mayotte reste sous l'influence cyclonique environ 6 heures avec un vent moyen de 65 nœuds de nord-ouest et des rafales à 80 nœuds. La pression à l'œil est estimée à 969 hPa et le rayon de vent maximum à 62 km.

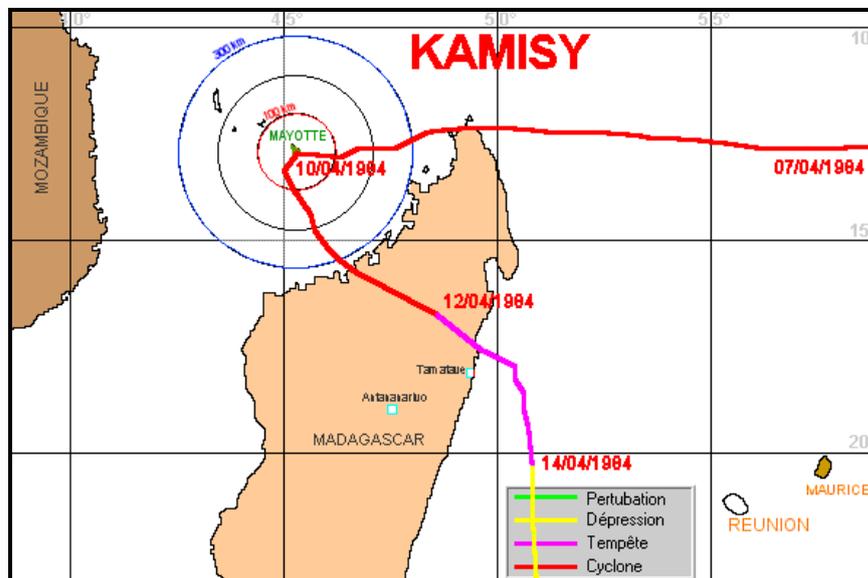


Illustration 26 - Trajectoire du cyclone Kamisy ( site <http://www.ac-reunion.fr/pedagogie/cotamarp/temps/cyclone/mayotte1950-1999/annees90/an90.htm>)

Ici, Mayotte se situe entre l'œil et le rayon de vent maximum. Au pic du cyclone sur l'île, la trajectoire subit une déviation brutale et l'œil stagne au même endroit pendant 6 heures, au sud sud-est de l'île. Ainsi, la direction du vent peut changer complètement en quelques heures. Les directions de provenance du vent les plus probables avant le « tournant de la trajectoire » sont l'ouest, le sud-ouest et le nord-ouest. Cependant les autres sont également envisageables durant les 6 heures où le cyclone s'est plus ou moins arrêté. La vitesse de déplacement était alors presque nulle et on peut considérer que vent et houle vont dans la même direction (cf. 2.1.2).

## 8.2. SIMULATIONS NUMERIQUES

Les vitesses de vent utilisées correspondent à celles calculées par Météo-France (2003) au niveau de Mayotte et correspondant à notre rang 2. En outre, 8 directions de provenance du vent ont été testées.

### Données d'entrée

La hauteur des vagues au large, en fonction de la vitesse du vent et de la durée pendant laquelle ce vent souffle, peut être estimée grâce à des abaques établis par l'USACE en 2001 (U.S. Army Corps of Engineers) suite à des centaines d'observations sur les cyclones. Les observations sur Kamisy font référence à un vent moyen de 65 nœuds soufflant pendant 6 heures à Mayotte. La hauteur significative de la houle correspondante est donc de 6 mètres avec cette méthode. C'est la hauteur que l'on retiendra pour forcer le modèle.

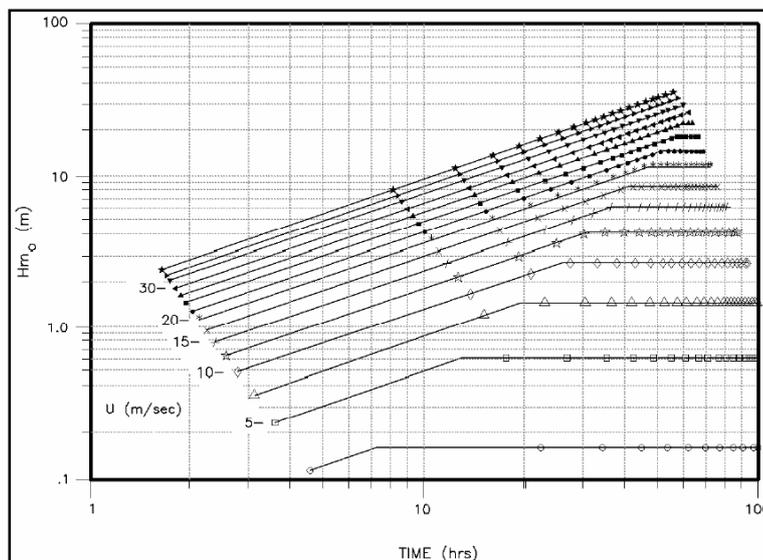


Illustration 27 – hauteurs des vagues en fonction de la vitesse du vent et de sa durée. Extrait du manuel de l'USACE (2001)

Les directions du vent et de la houle étant inconnues, et en l'absence de données, 8 directions principales ont été testées : N, NE, E, SE, S, SW, W, NW, en considérant que houle et vent vont dans la même direction.

On a donc appliqué pour chaque direction un vent constant de 65 nœuds sur toute la grille et une hauteur de vagues constante de 6 m sur le bord correspondant.

La marée est prise à 2,5 m, valeur réelle du 10/04/84 à 12h d'après le logiciel WXTide version 4.7.

### **8.3. RESULTATS**

Les cartes des simulations sont toutes présentées en fin de chapitre.

#### **8.3.1. Hauteur et surcotes liées aux vagues**

##### ***Houle et vent de nord***

Les conditions de vagues et de vent de nord (cf. Illustration 32-A) peuvent correspondre au passage d'un cyclone à l'ouest de Mayotte. Un forçage de type Kamisy étant imposé dans le modèle, la hauteur significative de la houle arrivant à proximité de Mayotte est de 6 m. lors de son approche, la houle gonfle et les vagues atteignent près de 8 m en arrivant sur le Grand Récif du nord-est. La dissipation par le récif est très importante, diminuant fortement la hauteur des vagues dans le lagon (cf. Illustration 28-A). Elles atteignent tout de même environ 3 m à proximité de la côte dans la Baie de Longoni. Les secteurs faisant face aux passes sont les plus sensibles :

- La pointe nord de l'île est exposée en raison de la pénétration de la houle par la passe de M'Zamboro, par le chenal entre le récif du nord et l'île M'Zamboro et entre l'île M'Zamboro et le récif ouest. Les vagues qui entrent dans le lagon atteignent 5 m (cf. Illustration 28-B). La majorité de ces vagues viennent déferler sur le récif frangeant assez large dans ce secteur;
- La côte ouest et sud-ouest, et en particulier la Pointe Bouéni est également exposée en raison de la pénétration de la houle par la Grande Passe de l'ouest. Les vagues atteignent une hauteur significative de l'ordre de 4 m à proximité de la côte. En effet sous l'action du vent, la houle provenant du nord a le temps de se redévelopper dans le lagon entre la passe et la côte (cf. Illustration 28-C).

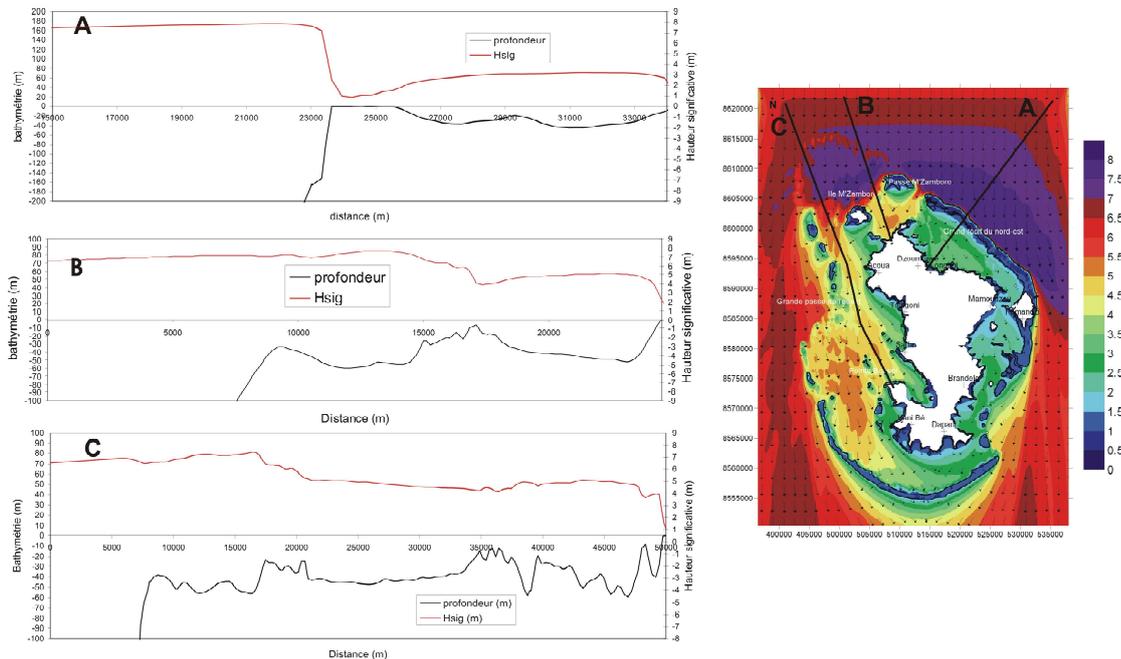


Illustration 28 - - Atténuation de la houle du nord sur le récif. A : coupe NE illustrant la forte diminution de hauteur des vagues sur le récif ; B : pénétration de la houle entre le récif du Nord et M'Zamboro ; C : propagation et reformation des vagues dans le lagon ouest.

La surcote est maximum dans la partie nord-est du lagon (en moyenne 15 cm) bordée par le grand récif du nord-est. Les extremums sont atteints sur le récif même (25 cm), dans la baie de Longoni (20 cm) et sur la côte nord de l'île M'Zamboro (20 cm). On note une décote dans la partie du lagon bordée par le récif sud (cf. Illustration 32-B).

### Houle et vent de sud

Les conditions de vagues et vent du sud (cf. Illustration 33-A) peuvent correspondre au passage d'un cyclone à l'est de Mayotte. Les vagues de 6 m viennent déferler sur le Récif du Sud qui protège bien le lagon (cf. Illustration 29-B). Les vagues dans le sud et l'est du Lagon sont inférieures à 3 m. Cependant, le même phénomène que précédemment se reproduit dans la partie ouest qui est large et étendue. Les vagues ayant franchi le Récif du Sud se reforment dans le lagon sous l'impact du vent et viennent s'associer aux vagues pénétrant par les passes de Bouéni et Sada. Les vagues atteignent la côte avec une hauteur de plus de 4 m dans la baie de Soulou (cf. Illustration 29-A) et au niveau de Moliha et jusqu'à près de 6 m à la Pointe Acoua.

L'impact d'un tel cyclone sur Mayotte reste plus localisé que dans le cas d'une houle et d'un vent de Nord, cependant, les vagues de plus de 2.5 m, observées dans la quasi-totalité du lagon, peuvent avoir un impact non-négligeable à la côte. En raison de la

direction de propagation des vagues dans le lagon, c'est principalement le sud, la baie de Soulou et l'île M'zamboro qui apparaissent les plus sensibles.

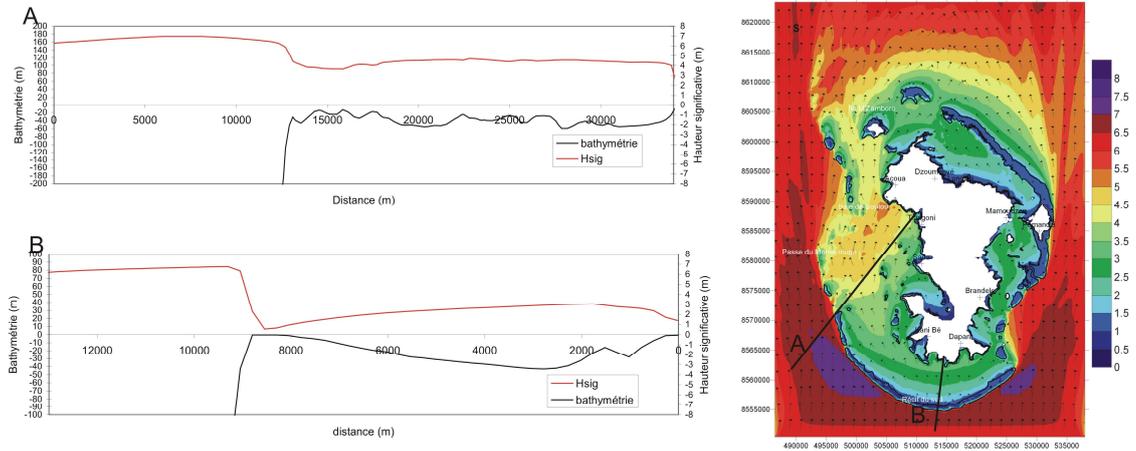


Illustration 29 - – Propagation de la houle du sud vers la côte : A : propagation du large vers la baie de Soulou avec une hauteur restant importante ( plus de 4 m) à l'arrivée dans la baie ; B : forte diminution de la hauteur des vagues sur le Récif Sud qui passent de 7 à 1m.

La surcote est plus intense dans la partie sud du lagon avec une moyenne de 10 cm. Le maximum est atteint sur le récif sud où la surcote peut monter à 18 cm ponctuellement. En revanche, il existe une légère décote entre Mayotte et le grand récif du nord-est. Le reste du lagon a une surcote nulle ou ne dépassant pas 5 cm (cf. Illustration 33-B).

**Houle et vent d'est, sud-est et nord-est :**

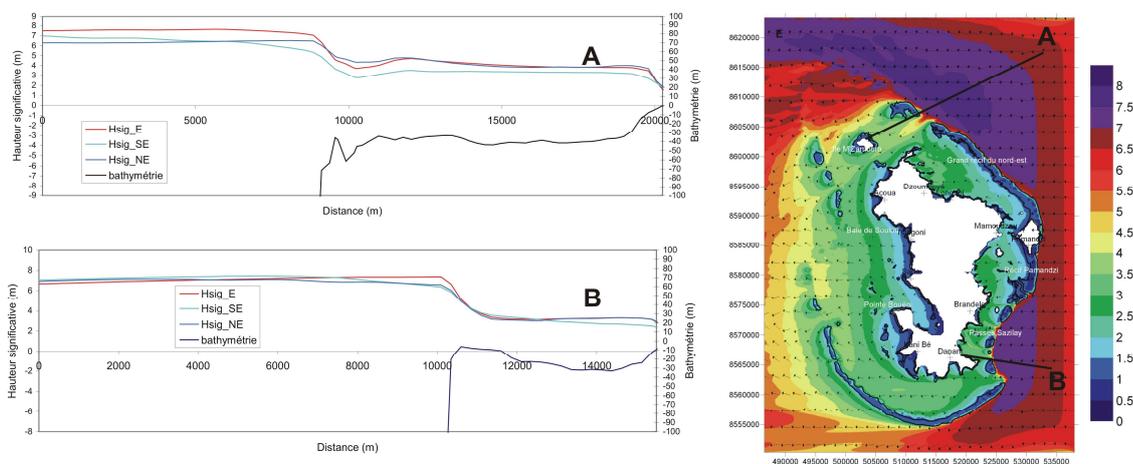
Les conditions de vagues et vent d'est (cf. Illustration 34-A, Illustration 35-A, Illustration 36-A) peuvent correspondre au passage d'un cyclone au nord de Mayotte. Les houles cycloniques arrivent à proximité de Mayotte avec des hauteurs significatives pouvant atteindre 8 m. Elles viennent déferler sur le Grand Récif du nord-est qui protège bien la côte.

De manière globale, la côte est de Mayotte est moins touchée que la côte ouest. En effet, la houle est fortement dissipée sur le récif à l'est, et les vagues dans le lagon ont des hauteurs de l'ordre de 2m. En revanche, sur la côte ouest, la réfraction et la génération de vagues par le vent dans le lagon fait augmenter les hauteurs significatives jusqu'à plus de 4 m.

Les zones les plus sensibles pour ces directions de propagation correspondent aux secteurs situés :

- face aux passes Salizey, et en particulier les secteurs de Bandélé et Choungui Kélé où les vagues atteignent plus de 4 m à la côte (cf. Illustration 30-B);
- face à la passe M'Zamboro, et en particulier l'île de M'Zamboro (cf. Illustration 30-A).

Pour des directions de propagation sud-est et nord-est, on observe également des vagues de fortes amplitudes, respectivement au Nord de la Baie de Soulou, et à la Pointe Bouéni.



*Illustration 30 - Propagation des houles d'E, SE et NE. A : ile de M'Zamboro : Malgré une forte diminution des vagues au niveau de la passe de M'Zamboro, les hauteurs à proximité de l'île sont de l'ordre de 4 m ; B : Au sud de Brandele : quelque soit la provenance, les vagues atteignent la côte avec des hauteurs de l'ordre de 3 m.*

Les houles venant d'est, sud-est et nord-est sont les plus pénalisantes pour la surcote. En effet, la partie est du lagon est bordée par le grand récif du nord-est qui se prolonge au sud de Petite-Terre et ne possède pas beaucoup de passes. Par exemple, pour une houle de provenance nord-est, on remarque une large zone à 20 cm de surcote dans la partie nord-est du lagon, le maximum étant atteint sur le récif même (25 cm). A l'opposé, la partie ouest présente une légère décote ou une surcote nulle (cf. Illustration 34-B, Illustration 35-B, Illustration 36-B).

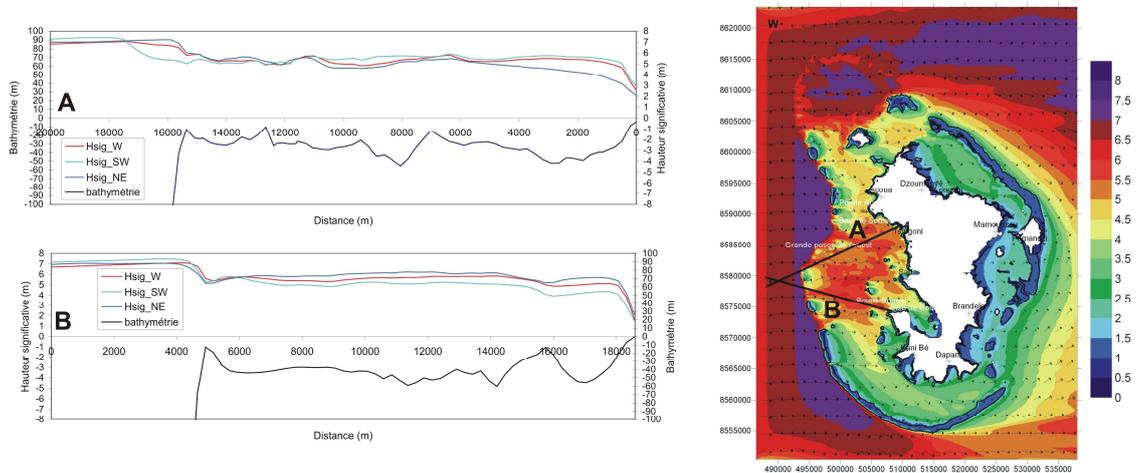
**Houle et vent d'ouest, sud-ouest et nord-ouest :**

Les conditions de vagues et vent d'ouest (cf. Illustration 37-A, Illustration 38-A, Illustration 39-A) peuvent correspondre au passage d'un cyclone au Sud de Mayotte. Les houles cycloniques arrivent à proximité de Mayotte avec des hauteurs significatives pouvant atteindre 8 m. Cependant, contrairement aux autres secteurs de provenance des houles cycloniques, elles sont très peu freinées par le récif, et se

propagent dans le lagon par la grande passe de l'ouest. Ce sont les houles cycloniques qui génèrent les plus hautes vagues dans le lagon.

Les côtes nord, sud et est sont assez peu touchées par ces conditions de houle. Même si les vagues atteignent près de 3 m dans le lagon, leur direction de propagation limite fortement les impacts éventuels sur la côte.

En revanche, tout le secteur ouest de l'île est fortement touché. La zone comprise entre la Pointe Acoua et la Pointe Bouéni est particulièrement exposée et l'on observe des vagues de près de 6 m dans le lagon (cf. Illustration 31-B). Les baies de Soulou, Tsingoni, Chiconi et dans une moindre mesure la baie de Bouéni sont particulièrement vulnérables.



*Illustration 31 - Propagation des houles d'W, SW et NW. A : secteur de Moliha : la diminution de hauteur des vagues sur le récif est très faible, et elles arrivent à la côte avec une hauteur supérieure à 5 m ; B : A la Pointe Bouéni : quelques soit la provenance, les vagues atteignent la côte avec des hauteurs de l'ordre de 4-5 m.*

Pour des houles d'ouest et de nord-ouest, la surcote reste faible grâce aux larges passes dans le récif à l'ouest et au nord. Sur la côte ouest, elle ne dépasse pas les 15 cm sauf au nord de l'île M'Zamboro où elle atteint 25 cm. La houle de sud-ouest est un peu plus pénalisante car le récif sud se prolonge au sud-ouest de l'île. Le maximum est de 20 cm sur le récif même et dans toute la baie de Kani (cf. Illustration 37-B, Illustration 38-B, Illustration 39-B).

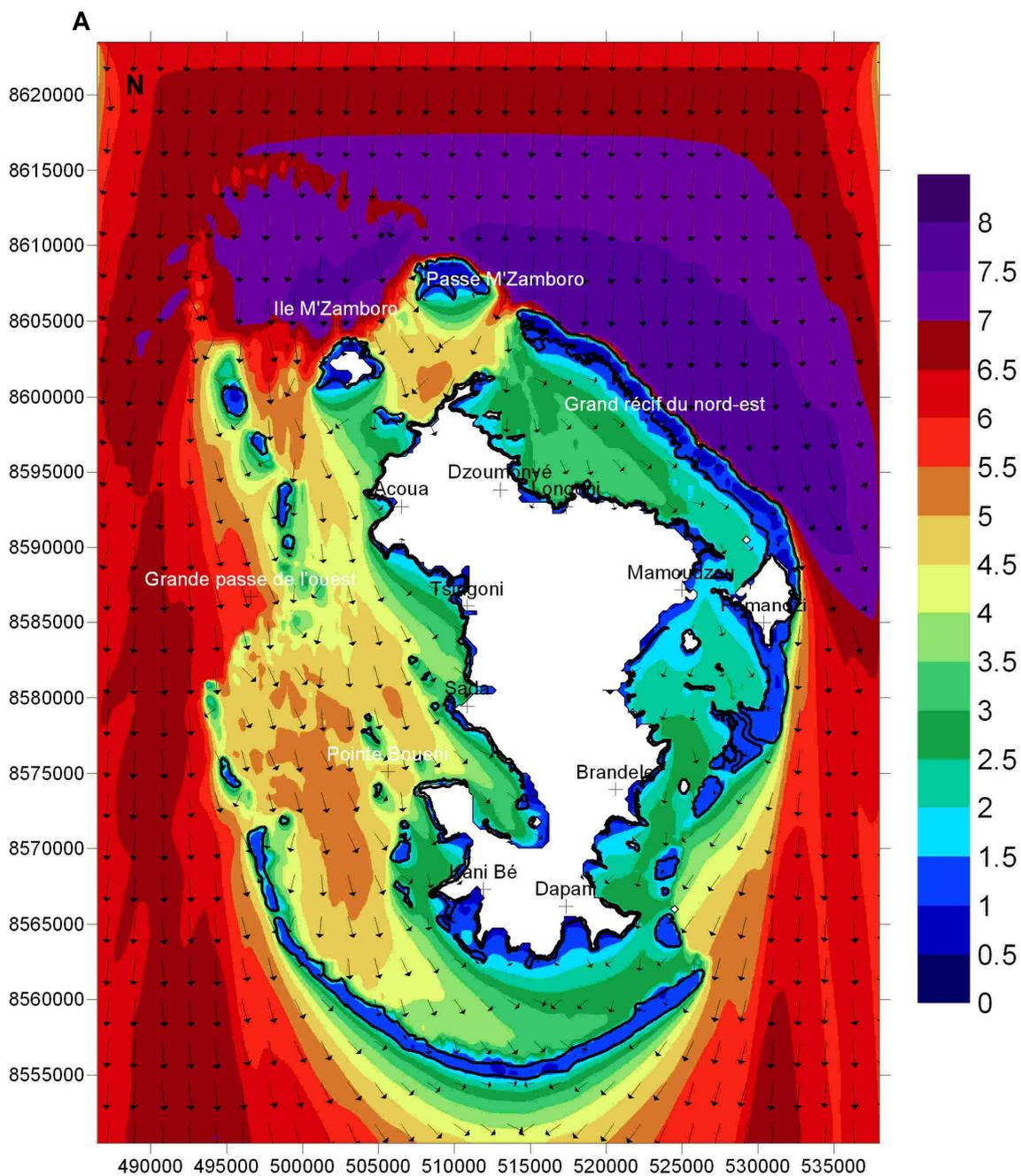
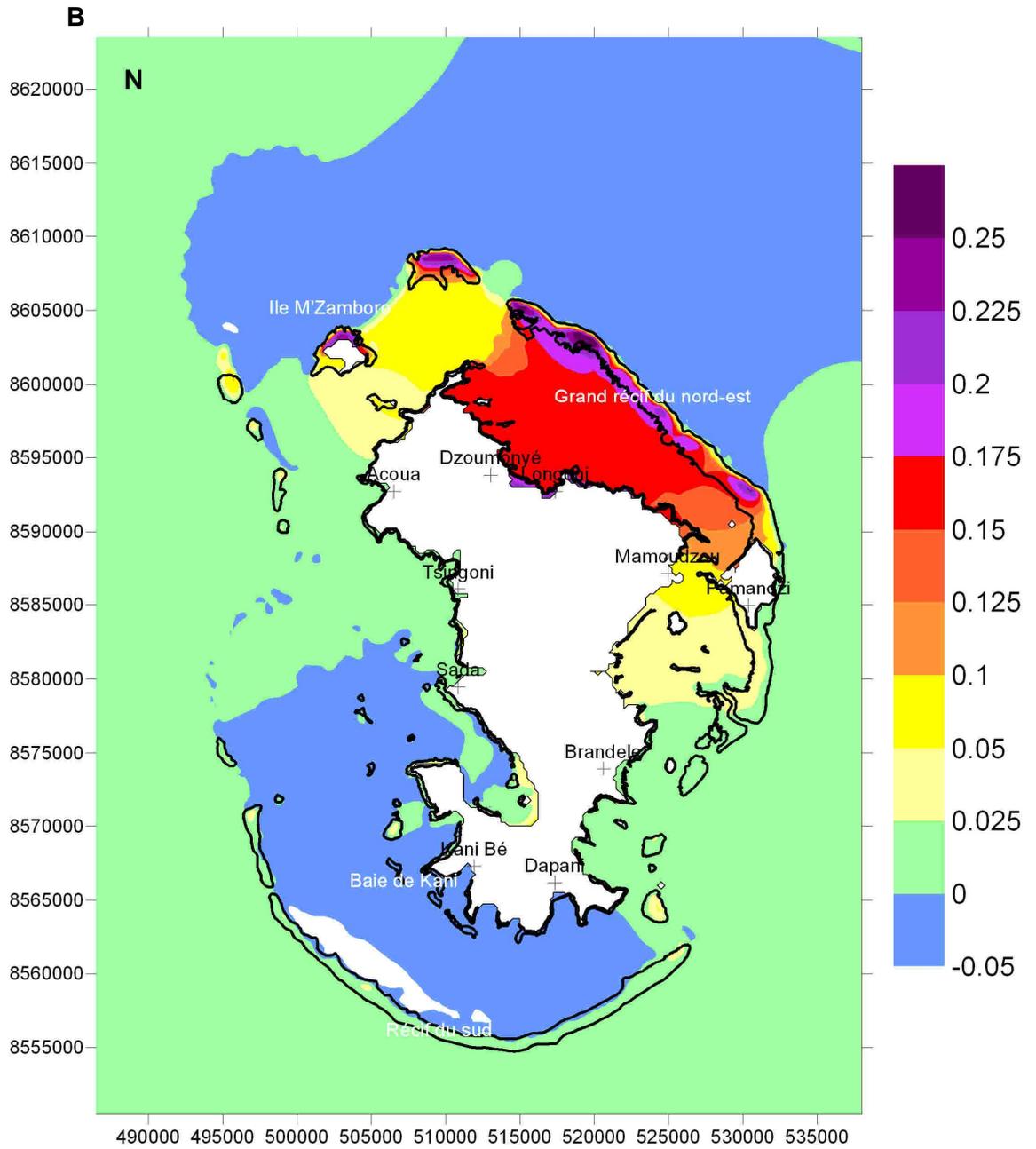


Illustration 32 - Résultats de la simulation de Kamisy pour une houle du nord. A : les contours colorés indiquent la hauteur des vagues et les flèches leur direction. B : surcote liée aux vagues.



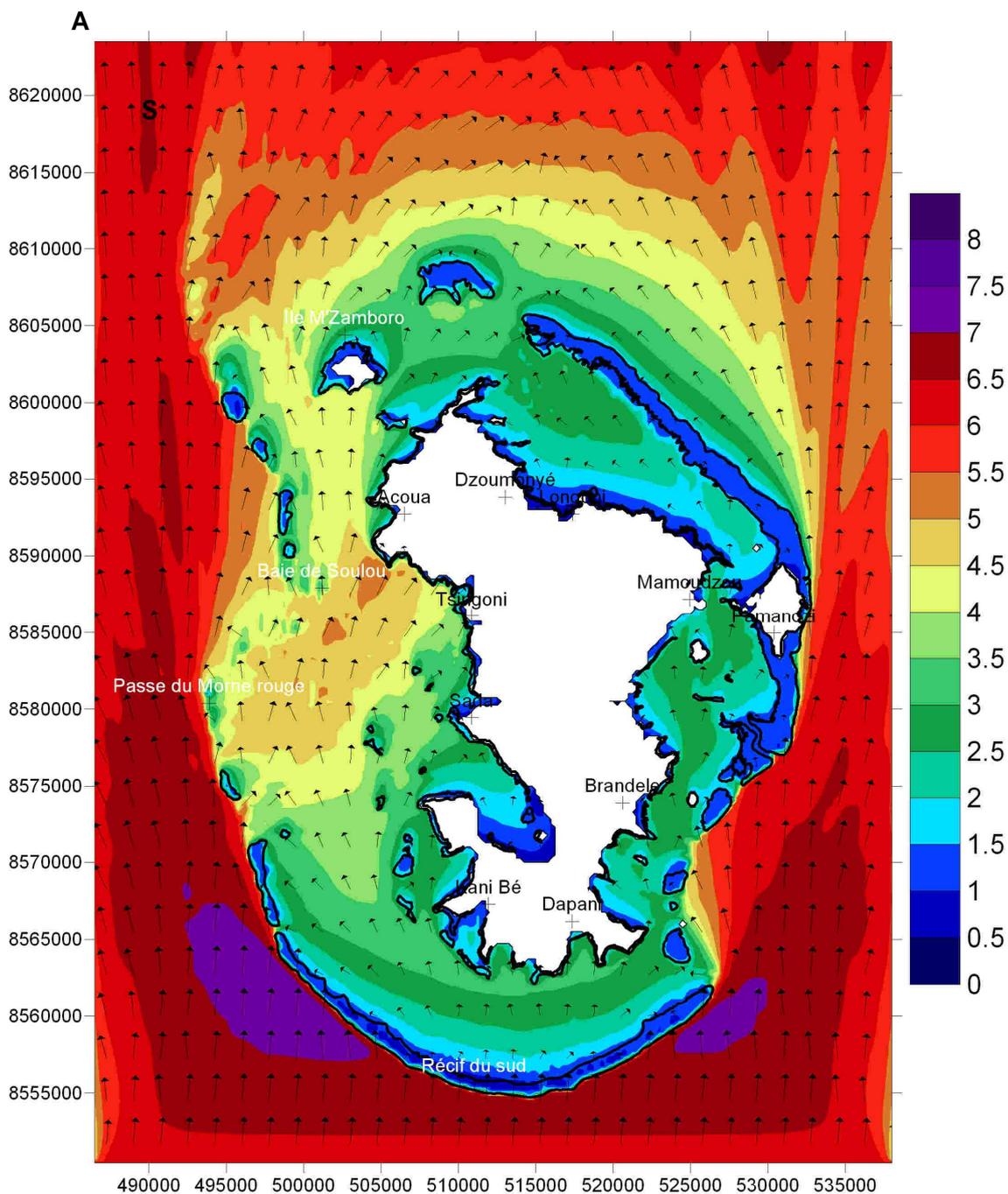
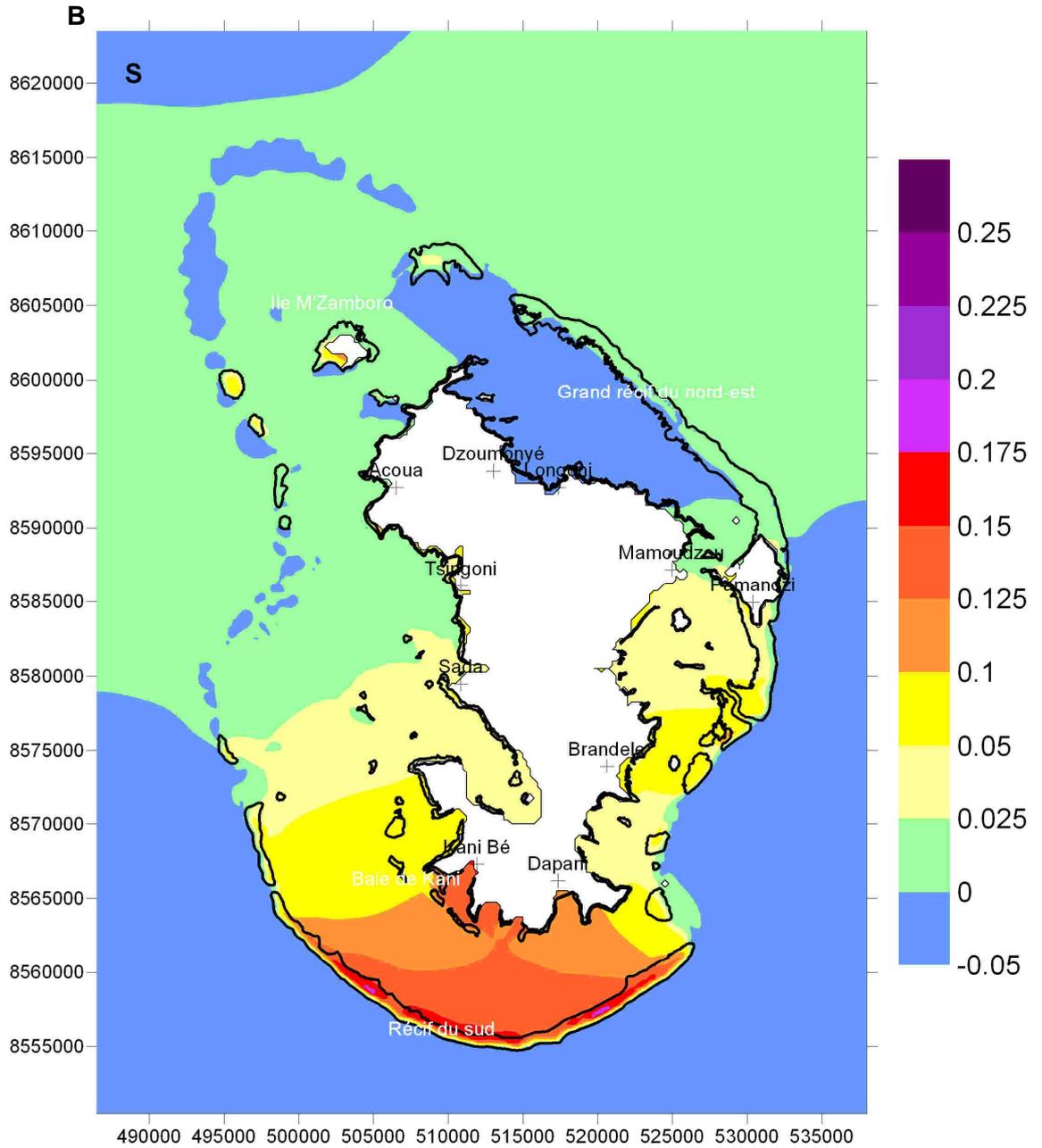


Illustration 33 - Résultats de la simulation de Kamisy pour une houle du sud. A : les contours colorés indiquent la hauteur des vagues et les flèches leur direction. B : surcote liée aux vagues.



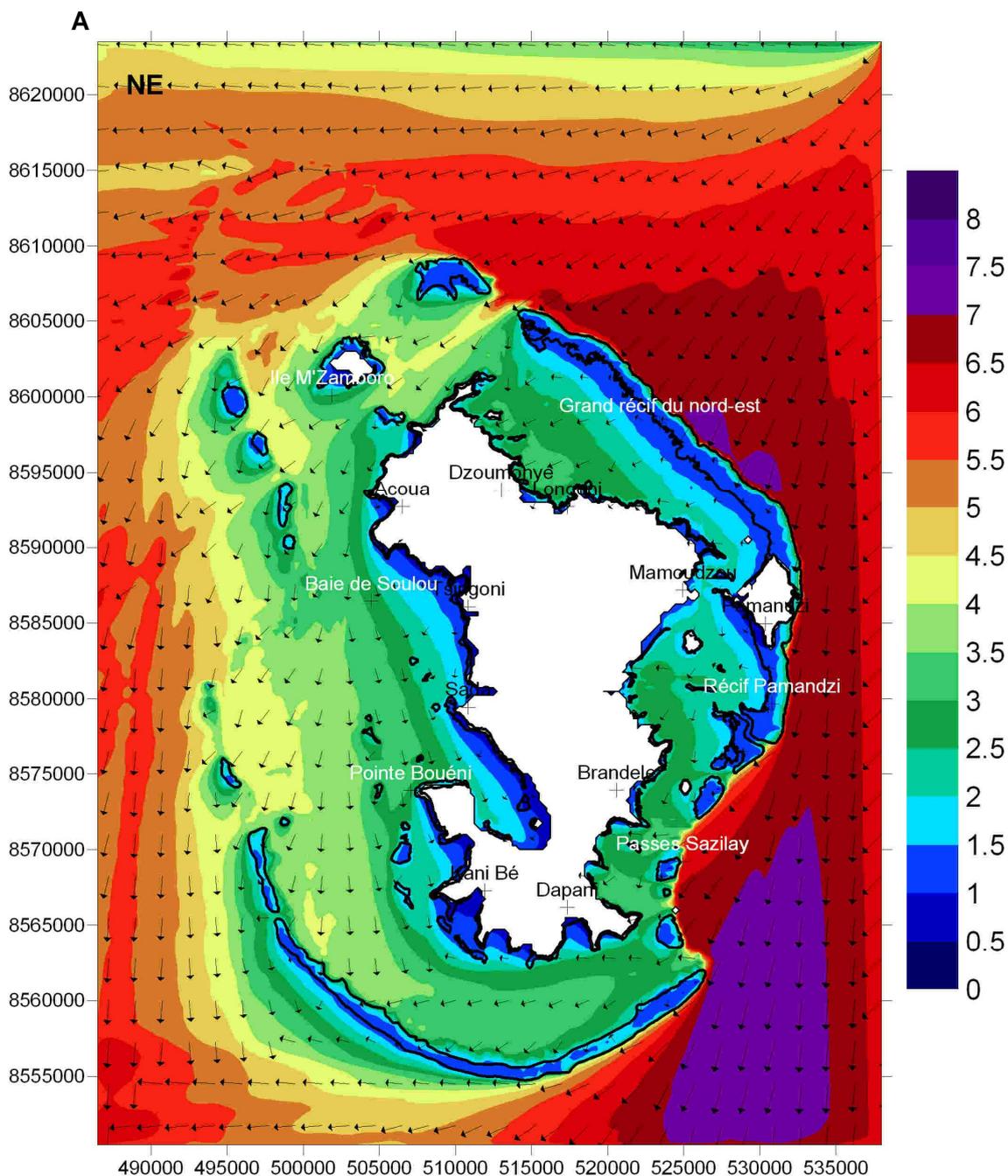
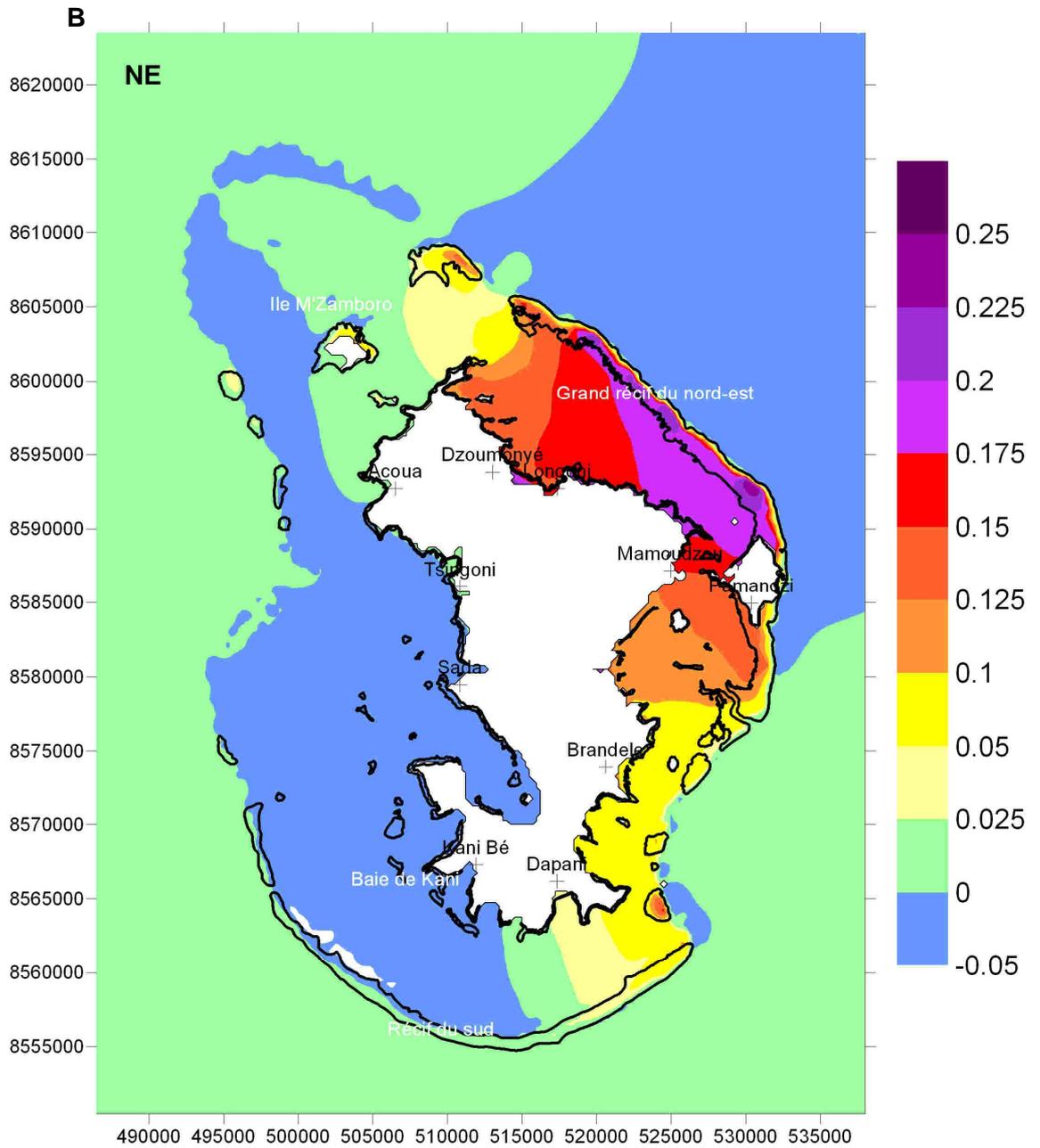


Illustration 34 - Résultats de la simulation de Kamisy pour une houle du nord-est. A : les contours colorés indiquent la hauteur des vagues et les flèches leur direction. B : surcote liée aux vagues.



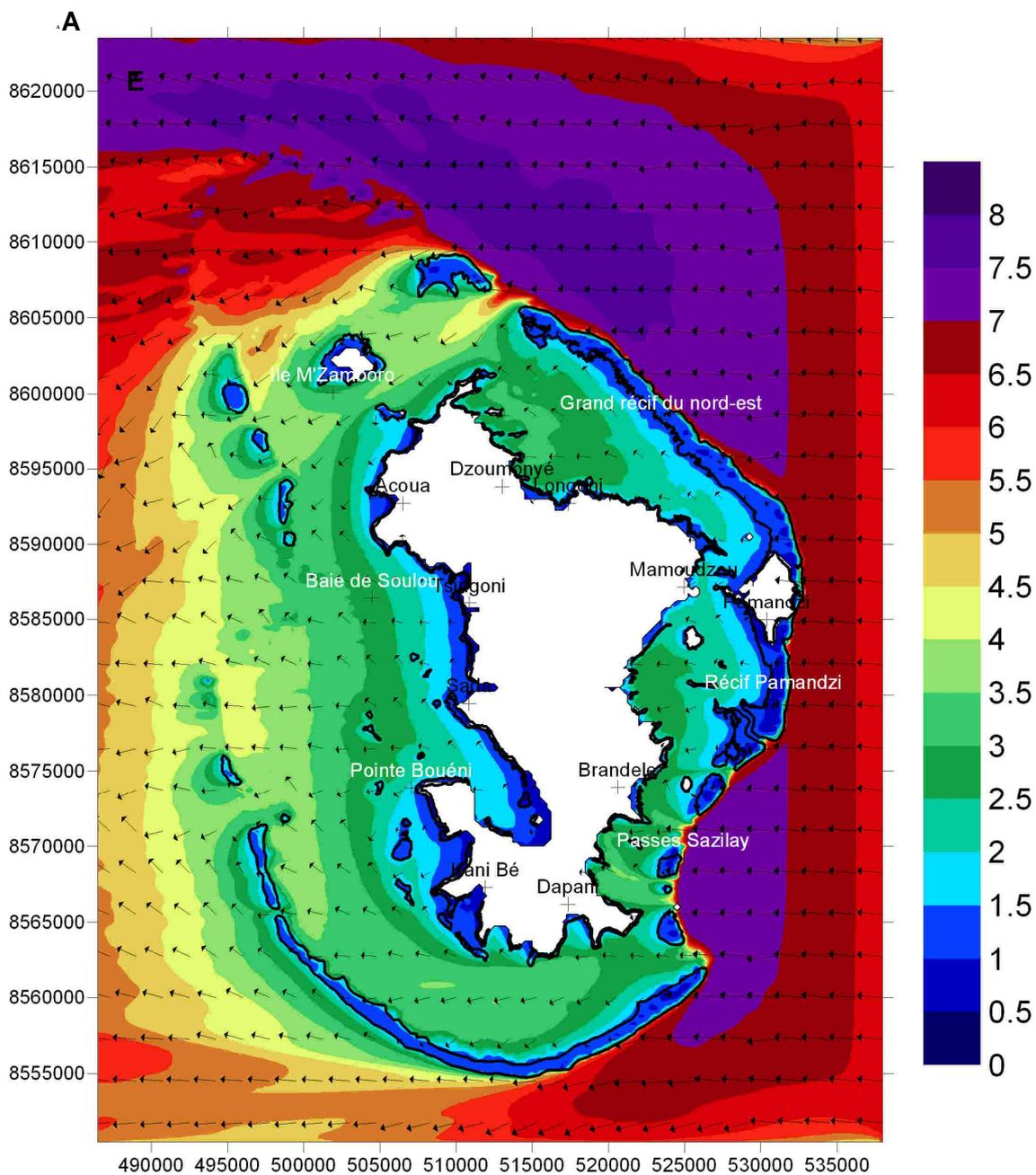
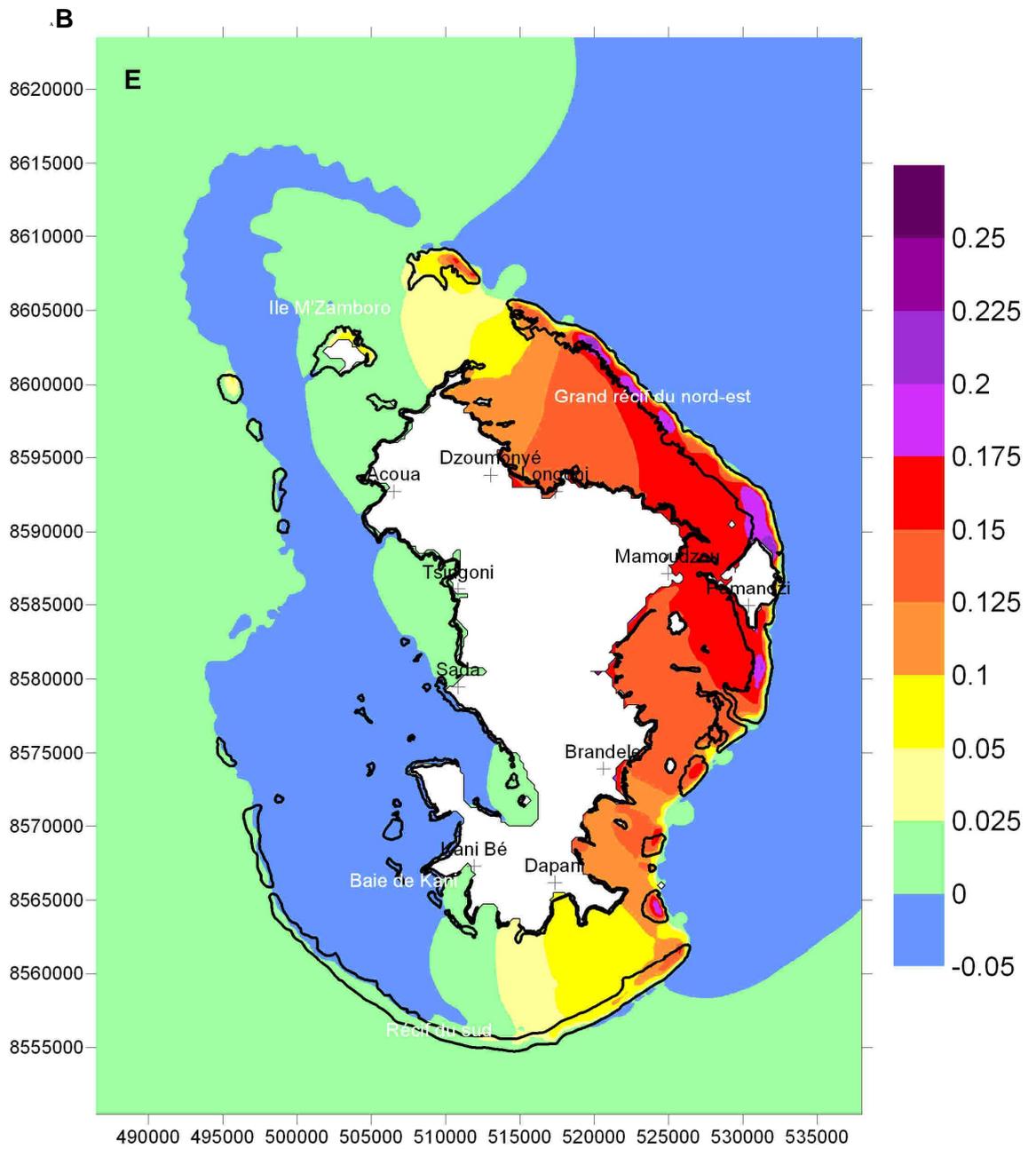


Illustration 35 - Résultats de la simulation de Kamisy pour une houle d'est. A : les contours colorés indiquent la hauteur des vagues et les flèches leur direction. B : surcote liée aux vagues.



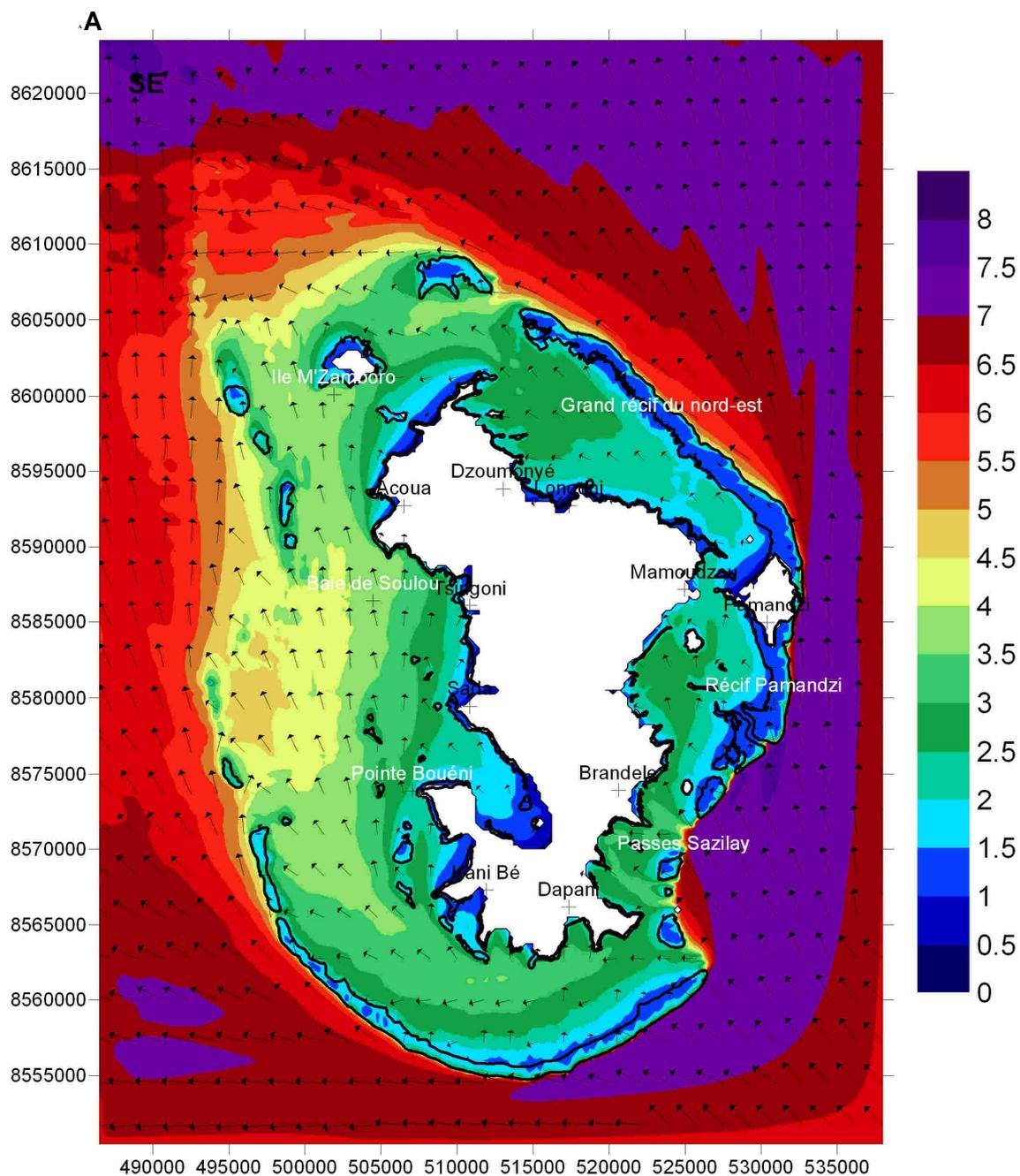
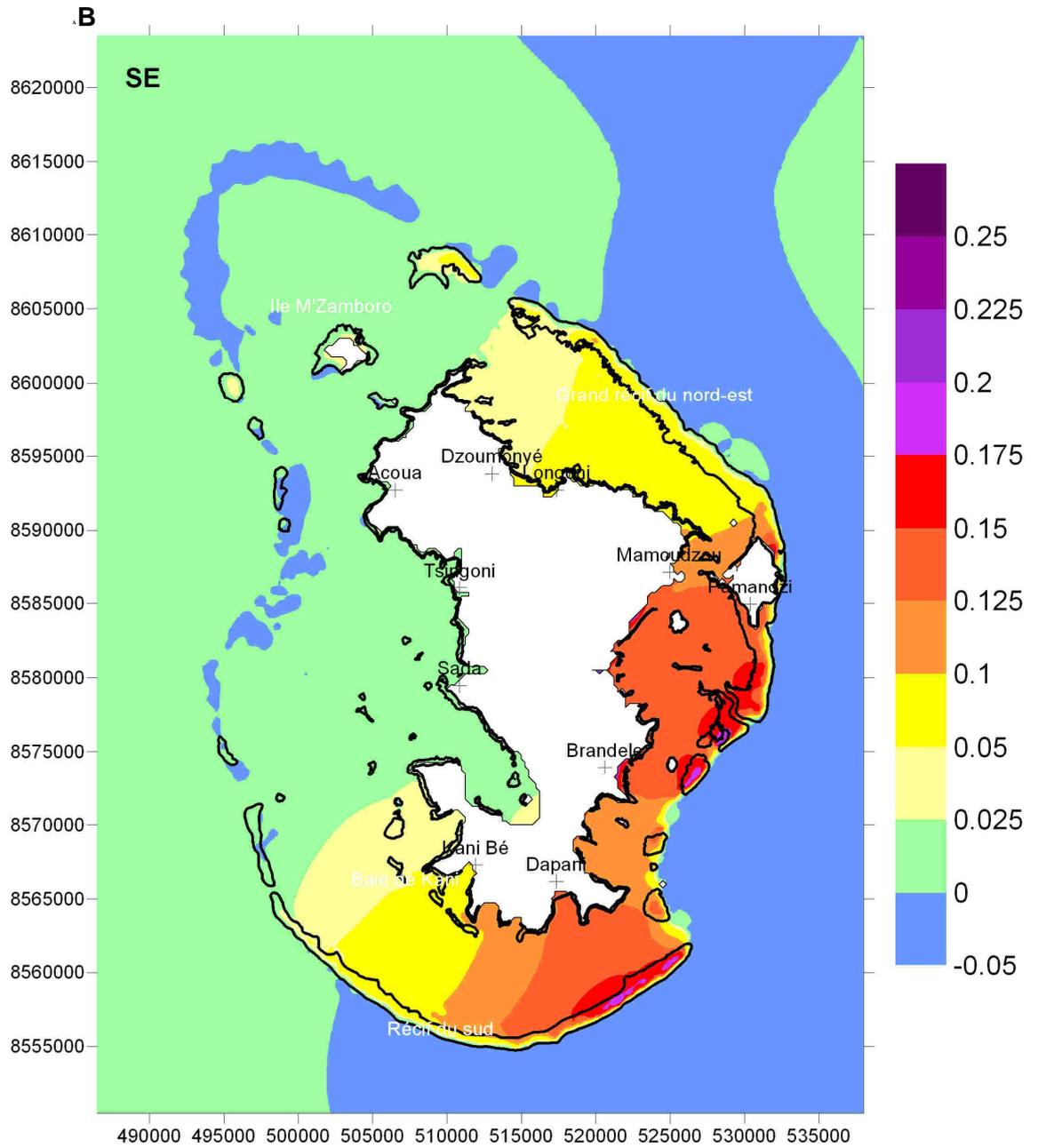


Illustration 36 - Résultats de la simulation de Kamisy pour une houle de sud-est. A : les contours colorés indiquent la hauteur des vagues et les flèches leur direction. B : surcote liée aux vagues.



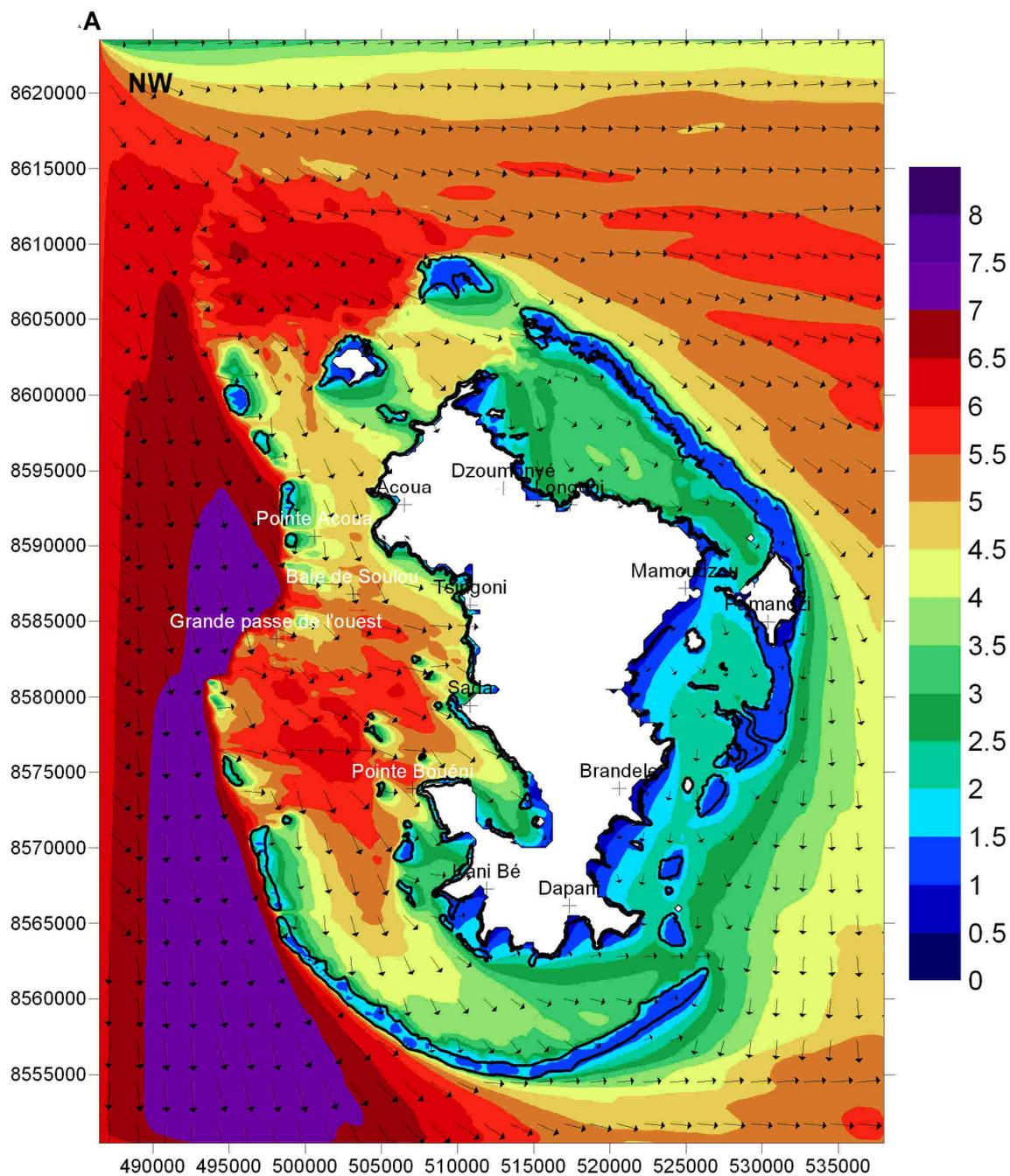
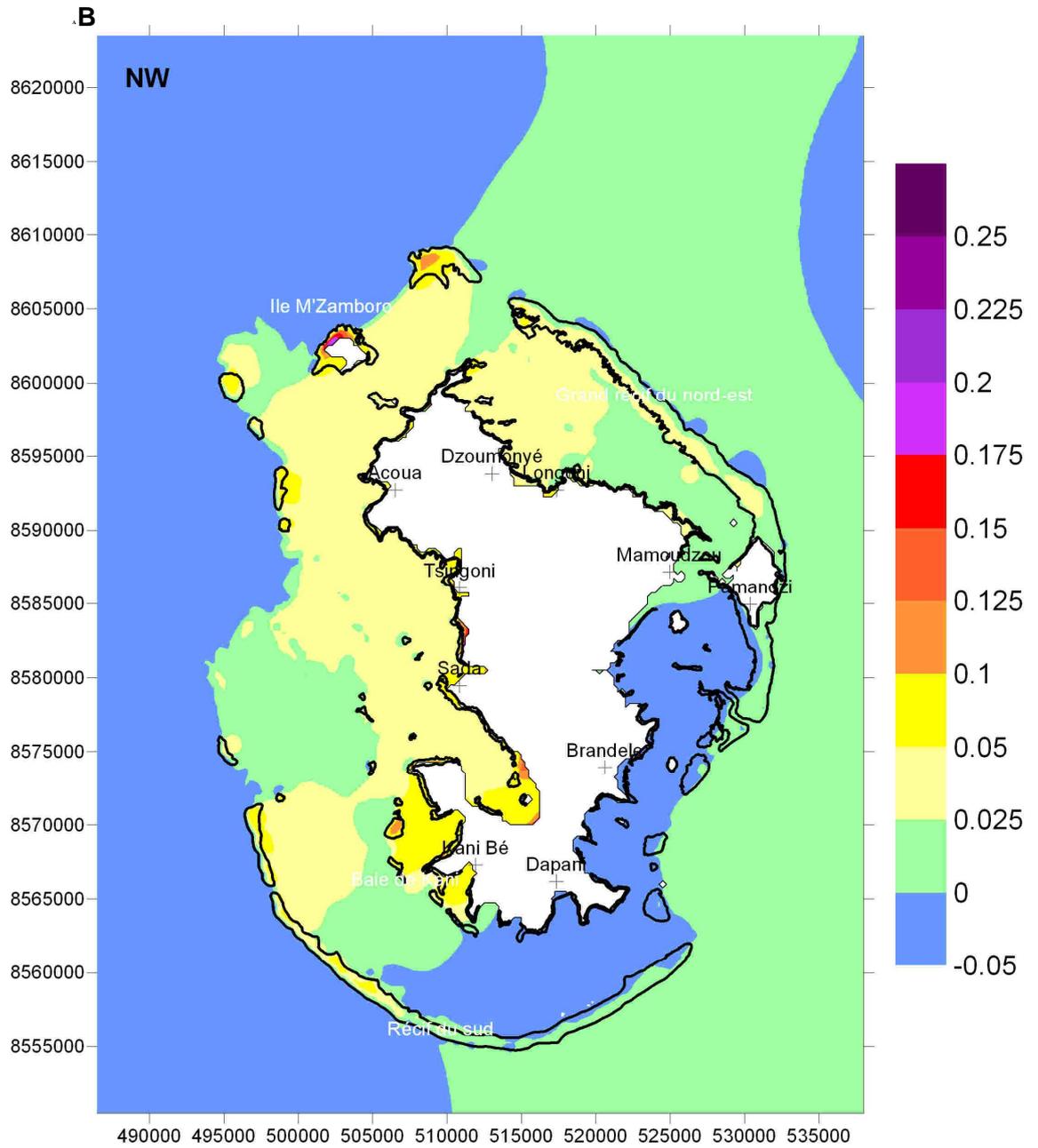


Illustration 37 - Résultats de la simulation de Kamisy pour une houle de nord-ouest. A : les contours colorés indiquent la hauteur des vagues et les flèches leur direction. B : surcote liée aux vagues.



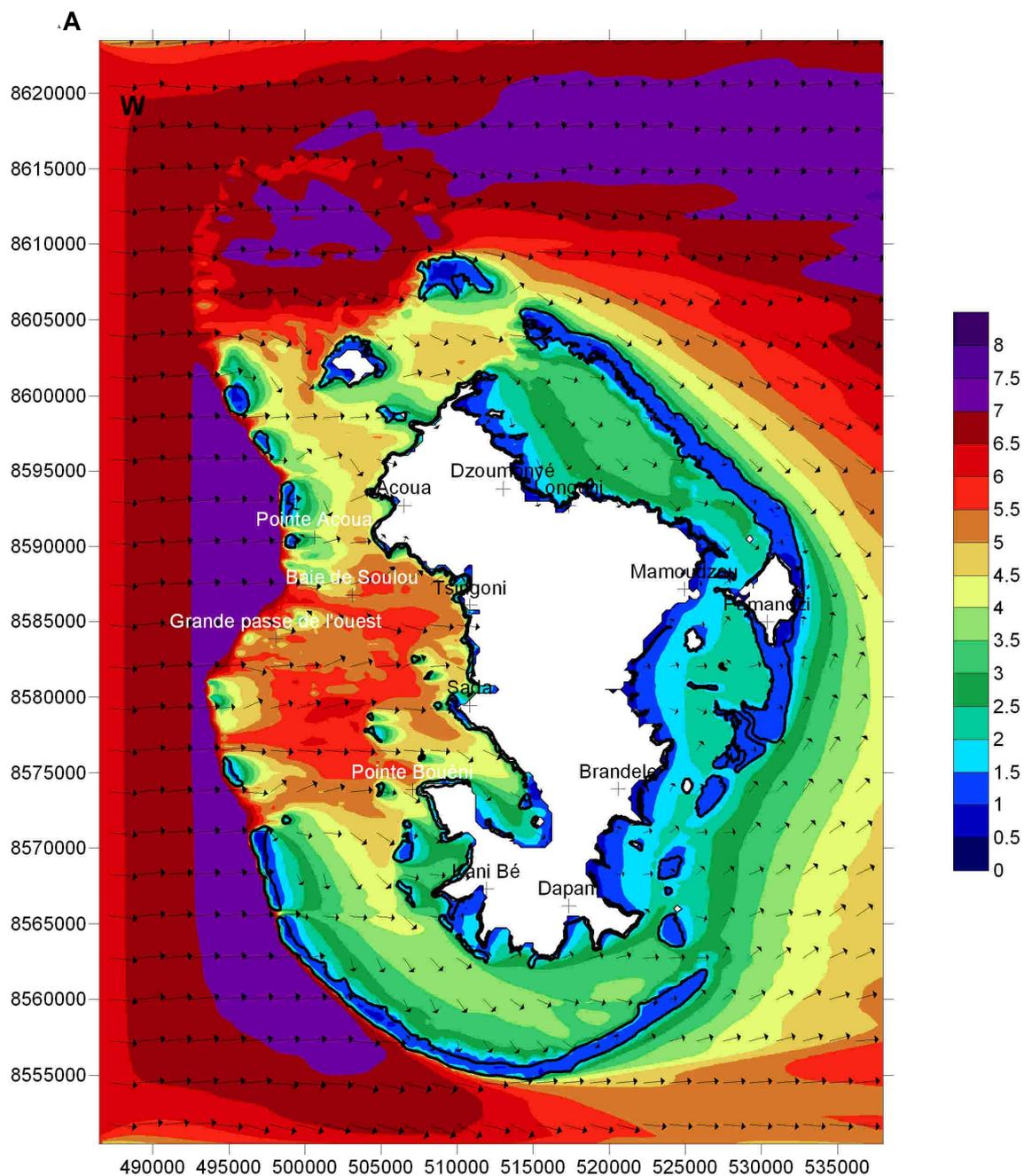
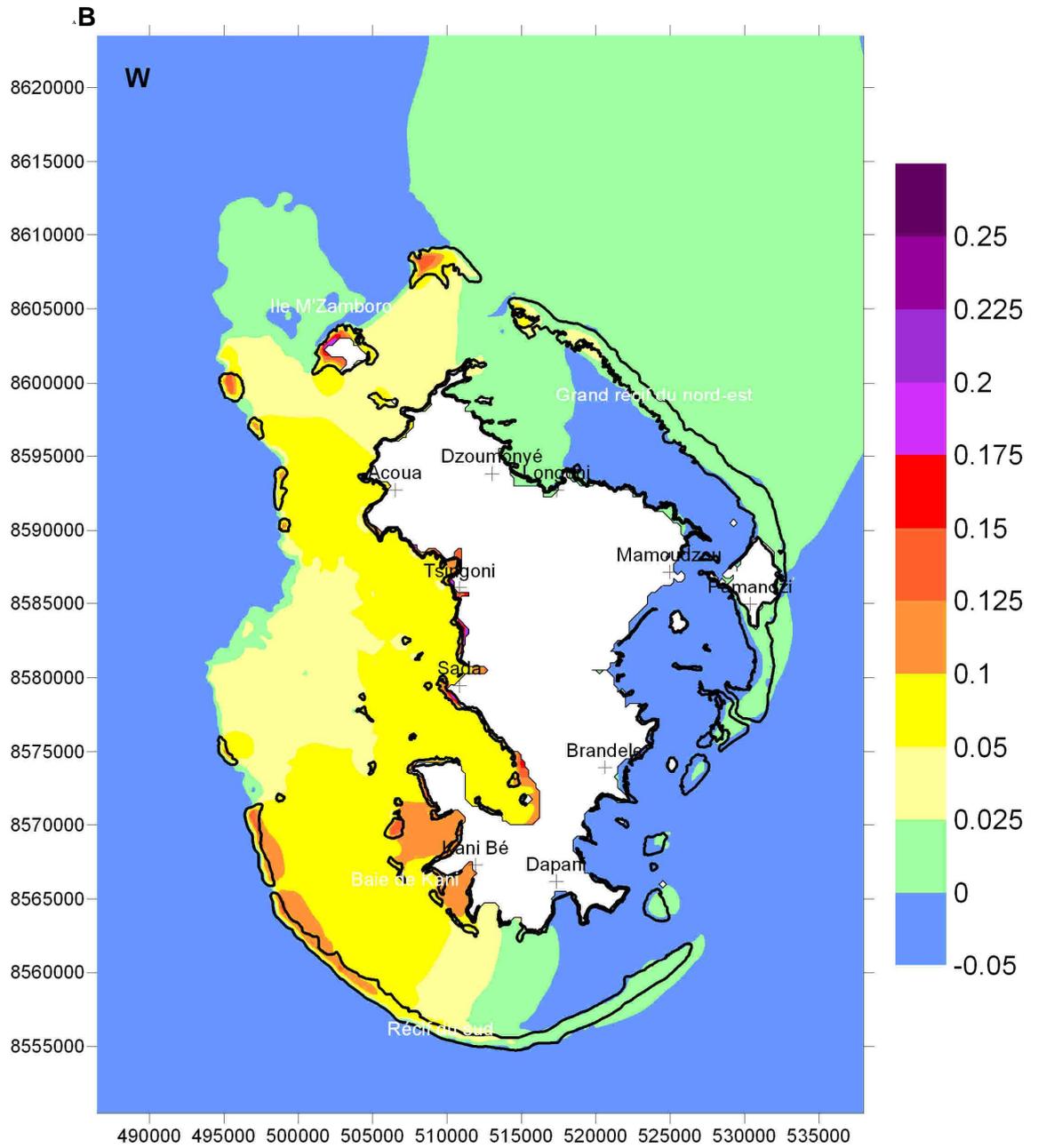


Illustration 38 - Résultats de la simulation de Kamisy pour une houle d'ouest. A : les contours colorés indiquent la hauteur des vagues et les flèches leur direction. B : surcote liée aux vagues.



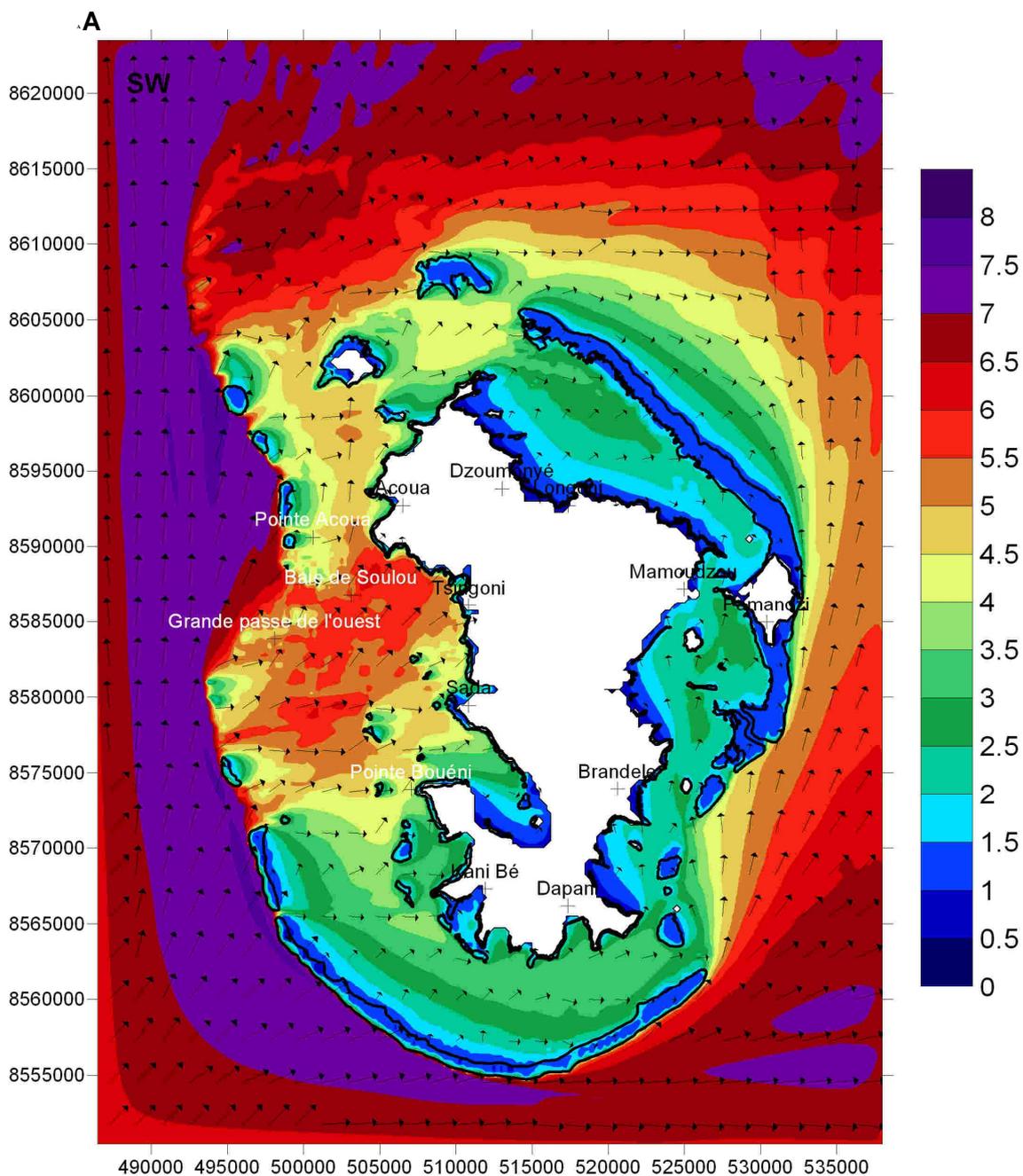
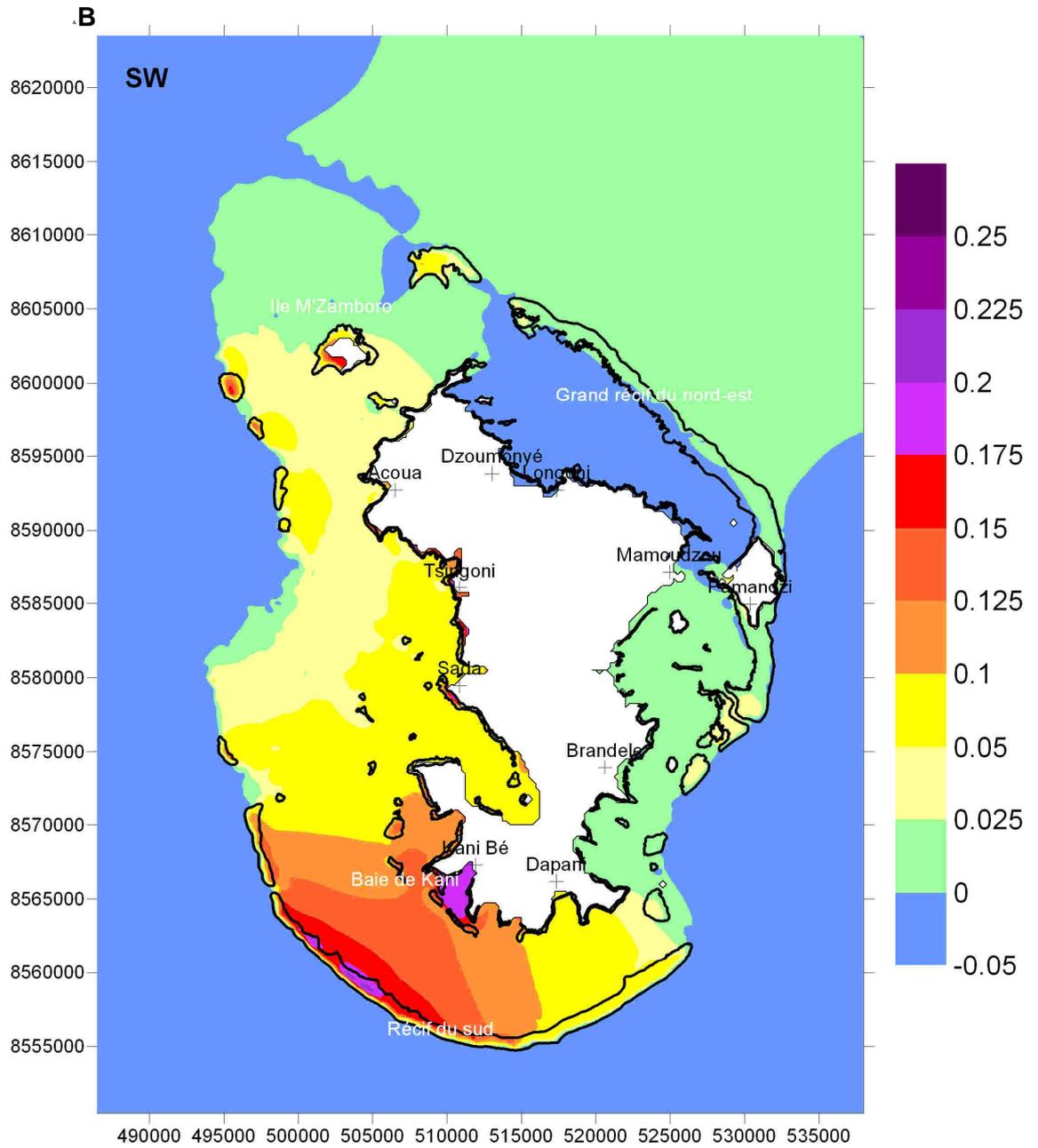


Illustration 39 - Résultats de la simulation de Kamisy pour une houle de sud-ouest. A : les contours colorés indiquent la hauteur des vagues et les flèches leur direction. B : surcote liée aux vagues.



### 8.3.2. Tests de sensibilité au vent dans le lagon

Pour estimer l'influence du vent (son intensité et sa direction) dans le lagon, des simulations sans vent ont également été effectuées pour une houle et un vent d'ouest (cf. Illustration 40).

On constate que le vent dans le lagon joue un rôle important puisqu'il fait croître les vagues suite à leur déferlement au niveau du récif externe. Celles-ci peuvent retrouver leur hauteur initiale si le vent est suffisamment important. Si on ne tient pas compte du vent, on peut sous-estimer la hauteur des vagues jusqu'à une valeur de 2 mètres le long de la côte.

La surcote s'en ressent également, elle est beaucoup plus homogène sans le vent et ne dépasse pas 8 cm alors qu'elle pouvait atteindre 20 cm près de la côte en présence de vent.

Les conditions atmosphériques jouent un rôle tout aussi important que les conditions de houle au large.

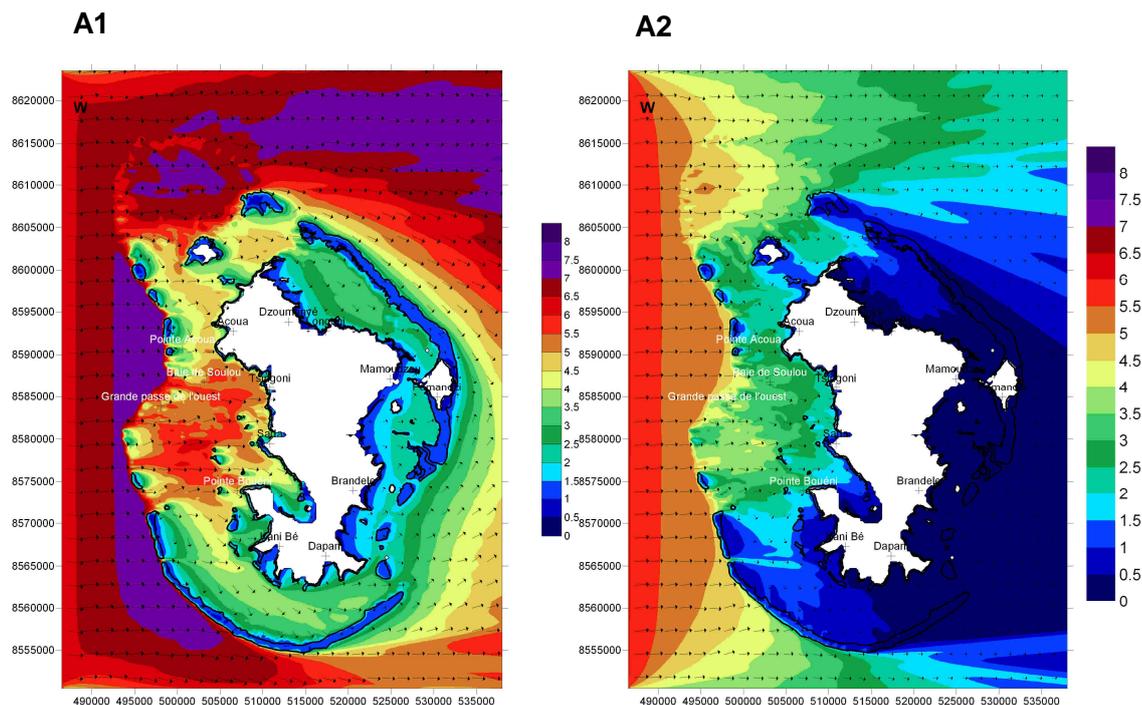
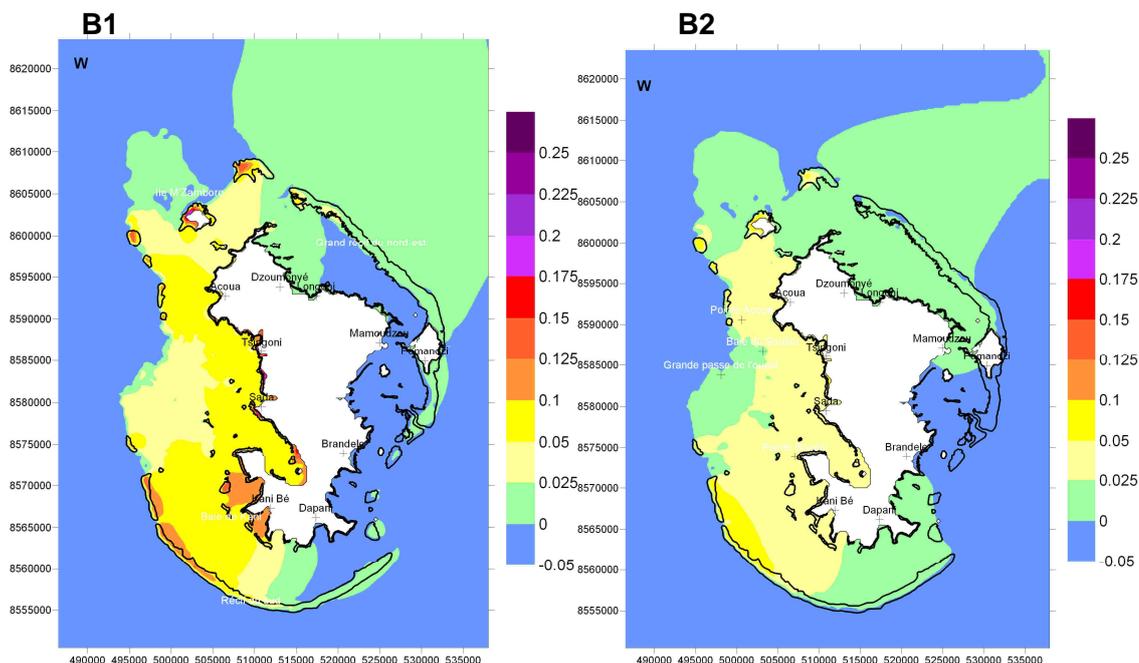


Illustration 40 – Test de sensibilité au vent par houle d'ouest de 6m : Résultats de la simulation pour une houle avec vent (A1) et sans vent (A2) : Hauteur significative et direction des vagues.  
B : Surcote liée aux vagues avec vent (B1) et sans vent (B2).



## 8.4. ETUDE DE ZONES PARTICULIERES

La résolution de la grille de rang 2 (250m) reste assez lâche et ne peut pas prendre en compte les effets très localisés. à l'échelle de la plage ou des petites baies. On peut toutefois donner des indications qui sont valables au large de ces sites.

### 8.4.1. AEROPORT DE PAMANDZI

L'aéroport de Pamandzi est situé sur la pointe sud de Petite-Terre. C'est un des rares sites dont le rivage ne donne pas sur le lagon mais directement sur le récif qui l'entoure et le protège. Les vagues d'est qui viennent du large et déferlent sur le récif n'ont pas le temps de se reformer et arrivent sur la côte est avec des hauteurs de maximum 1 m (cf. Illustration 42-A). La direction de provenance des vagues la plus pénalisante est le sud-ouest. En effet, celles-ci regonflent dans la partie est du lagon mais finissent par déferler sur le récif et n'excèdent pas 1,5 m à la pointe (cf. Illustration 42-B).

En ce qui concerne la surcote liée aux vagues, elle est maximale pour une houle d'est et atteint 18 cm au sud-sud-est de la pointe de Petite-Terre (cf. Illustration 43).



Illustration 41- Aéroport de Pamandzi: Photographie IGN 2003

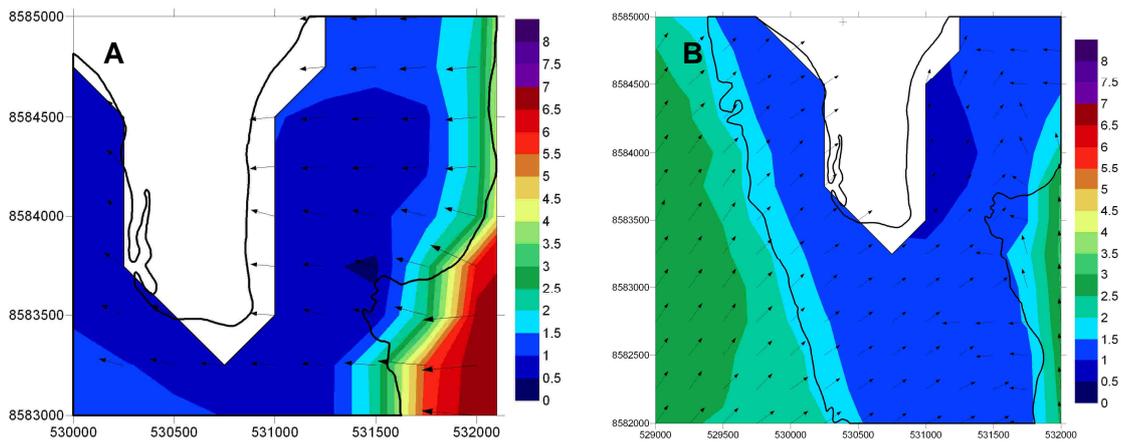


Illustration 42 - Zooms des cartes de vagues sur l'aéroport de Pamandzi. Les contours représentent la hauteur des vagues et les flèches leurs directions. A : Cas Kamisy avec une houle d'est. B : Cas Kamisy avec une houle de sud-ouest.

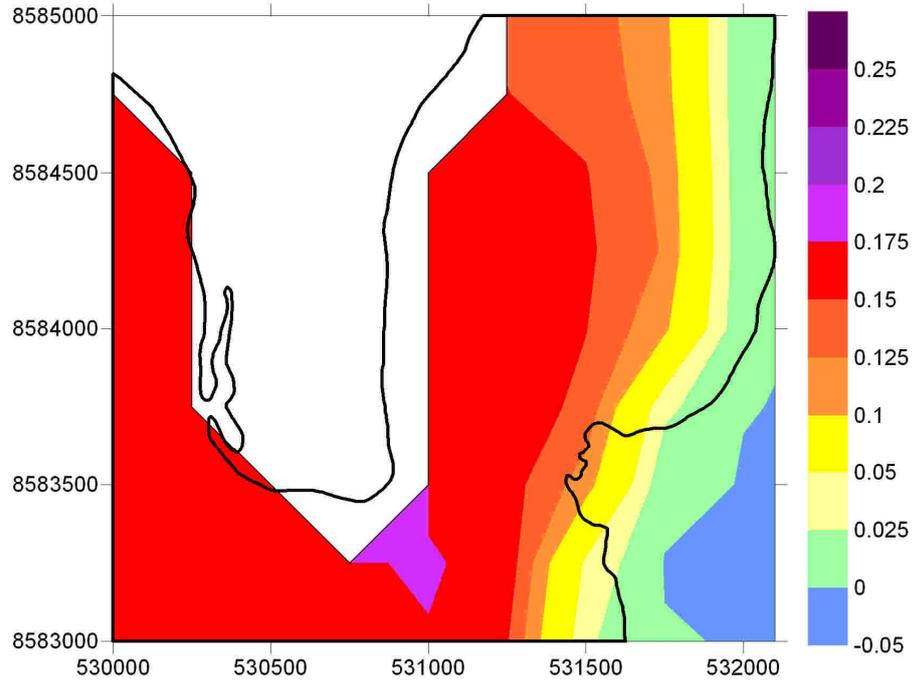


Illustration 43 - Zoom de la carte du setup sur l'aéroport de Pamandzi pour le cas Kamisy avec une houle d'est.

#### 8.4.2. PORT DE LONGONI

Le port de Longoni est entouré d'enrochements, de falaises et de mangroves.



Illustration 44 - Baie de Longoni et son port en 2003. A : photographie aérienne IGN 2003. B : Source BRGM.

D'après l'étude précédente sur toutes les directions pour un cyclone extrême, la direction de provenance de la houle la plus critique pour le port est le Nord-Ouest. En effet, il existe une large passe entre l'île de M'Zamboro et le récif du nord par laquelle la houle pénètre. Faiblement dissipée par le déferlement, la houle se propage dans le lagon avec une hauteur variant faiblement. La hauteur des vagues est d'environ 3 m en arrivant sur le port (Illustration 45).

La surcote augmente légèrement à l'est de la presqu'île du port pouvant atteindre 25 cm.

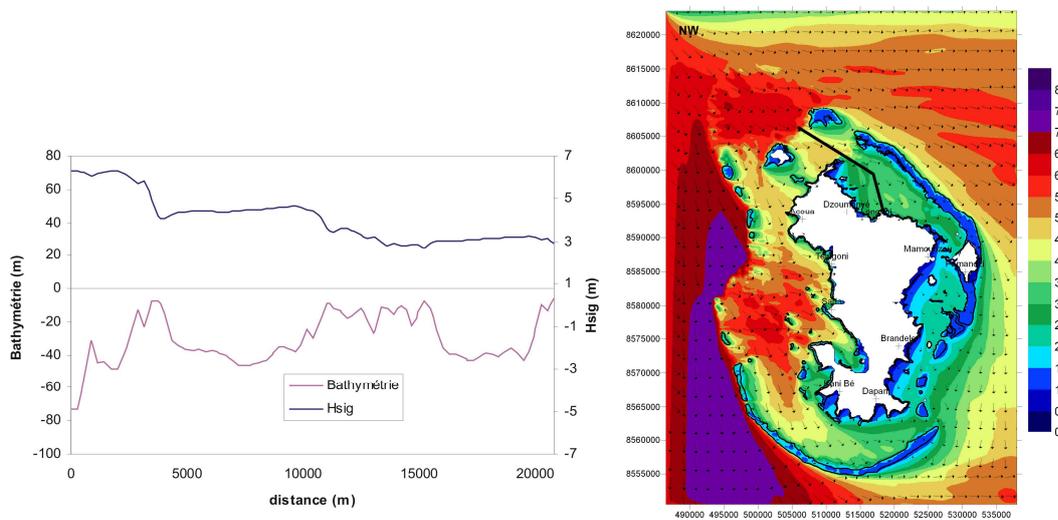


Illustration 45 – Section allant du large de Mayotte au port de Longoni pour un cyclone type Kamisy avec une houle de nord-ouest.

### 8.4.3. VILLE DE MAMOUDZOU

Vers Mamoudzou, la côte est constituée principalement de mangroves et d'enrochements.

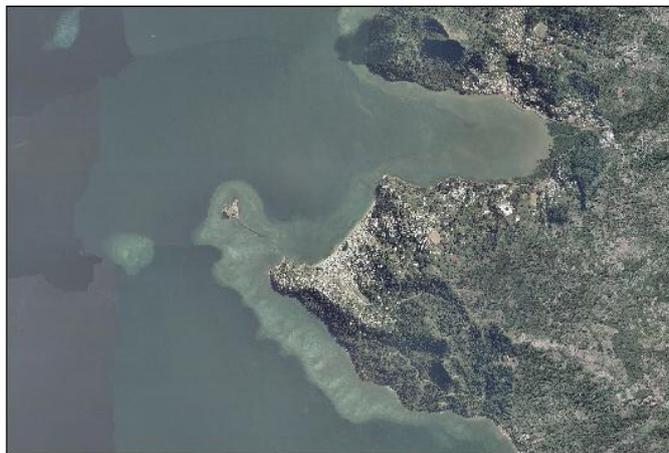


*Illustration 46 - Ville de Mamoudzou (IGN 2003)*

La ville se situe dans la partie est du lagon et bénéficie de la protection du grand récif du nord est et de Petite-Terre. Pour un cyclone de même intensité que Kamisy et pour les 8 directions étudiées, les vagues se situent entre 2 et 3 m dans la partie du lagon face à la ville mais restent inférieures à 1 m sur la côte. La surcote la plus importante survient pour une houle de nord-est et atteint environ 14 cm autour de la ville.

#### **8.4.4. VILLE DE SADA**

La ville de Sada est bordée de plages et d'enrochements utilisés pour la protection des villages.



*Illustration 47 - Image aérienne de Sada (IGN 2003)*

Elle se situe légèrement au sud de la grande passe de l'ouest. Elle est donc très exposée à la houle venant du nord-ouest qui est peu dissipée par le récif et a le temps de se reformer en partie dans le lagon avant d'atteindre la côte (Illustration 48). Non

loin de la côte, des vagues de 5m se reforment et traversent le lagon. La hauteur des vagues avoisine les 4 m à l'approche de la ville.

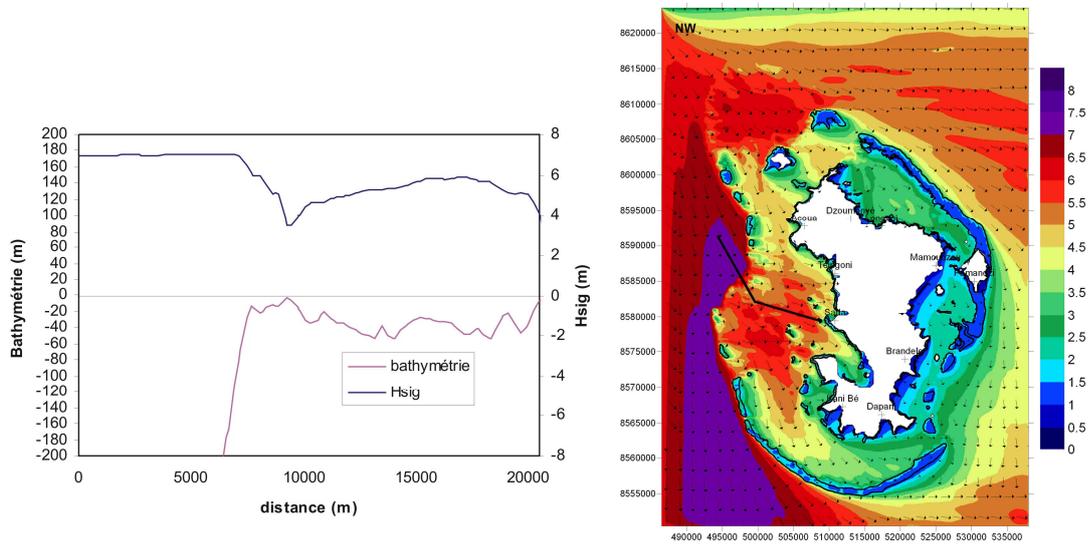
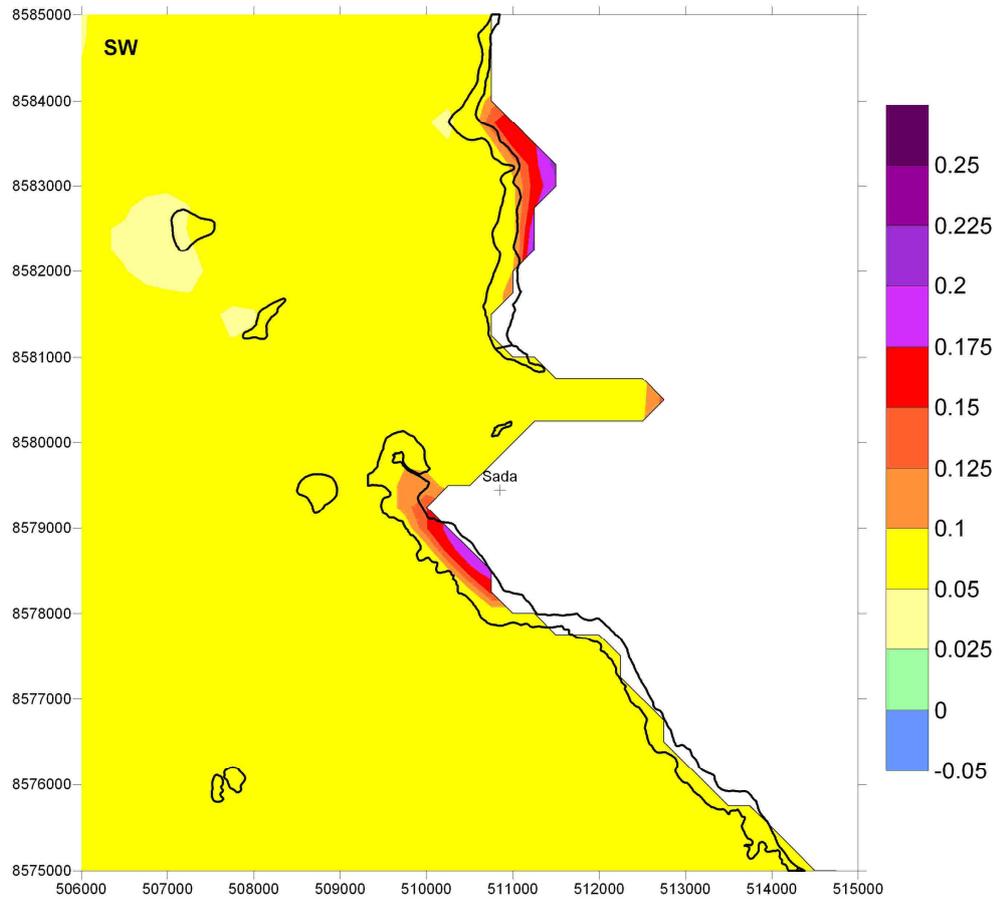


Illustration 48 - Section allant du large de Mayotte (ouest) à la ville de Sada pour un cyclone type Kamisy, la houle provient du nord-ouest.

Même si Sada se situe dans la partie ouest du lagon, moins exposée à la surcote, on note une augmentation du plan d'eau à proximité de la ville. La surcote frôle les 18 cm alors qu'elle est inférieure à 10 cm tout autour pour des vagues provenant du sud-ouest (Illustration 49).



*Illustration 49 – Zoom de la carte de la surcote liée aux vagues sur Sada pour un cyclone type Kamisy avec une houle de provenance sud-ouest.*

#### 8.4.5. DEVIATION ROUTIERE DE M'TSAPERE

Au sud de Mamoudzou, la route, qui longe la côte, est directement exposée aux vagues.



Illustration 50 - Déviation routière de M'Tsapéré (IGN 2003)

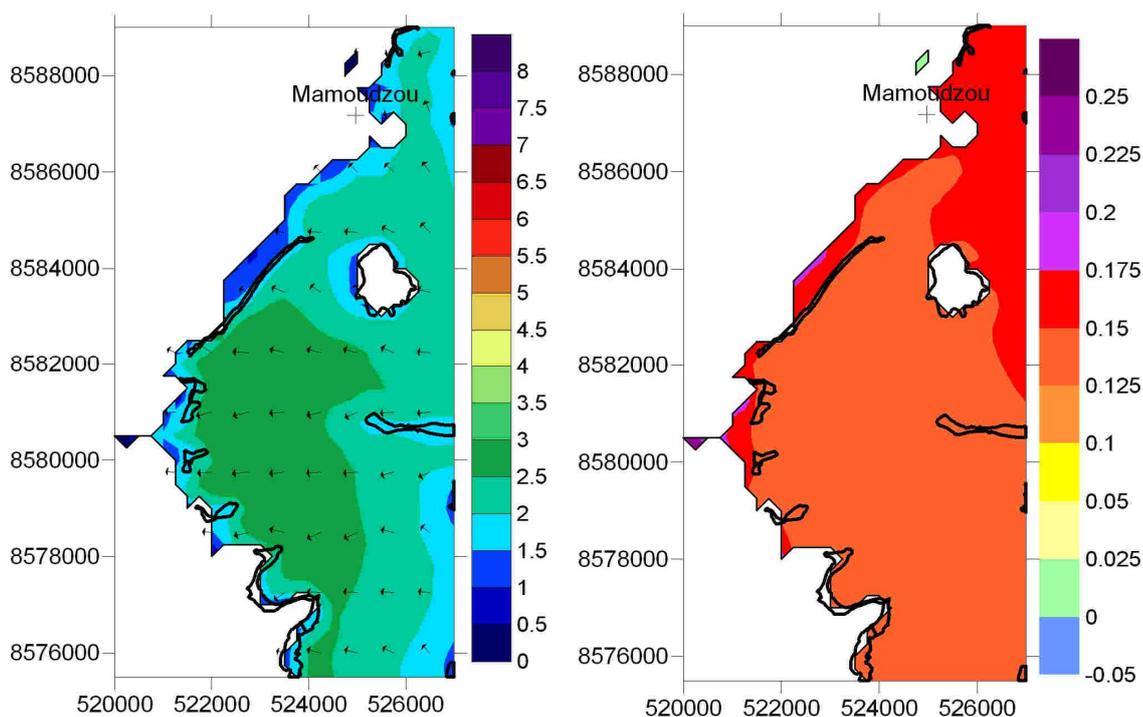


Illustration 51 – Hauteur significative et surcote liée aux vagues le long de la déviation routière pour un cyclone type Kamisy et une houle d'est.

Grâce à la protection du récif et à la forme évasée de la côte, cette portion de l'île est relativement protégée des vagues. Dans le lagon, les vagues n'excèdent pas 3 m (inférieures à 1.5 m près du rivage) et la surcote reflète la moyenne observée dans la partie est, soit 16 à 18 cm.

## 8.5. INCERTITUDES ET VALIDITE DE LA SIMULATION

Ces simulations restent théoriques, puisque le vent est considéré comme constant sur toute la grille, de même que les vagues sur les bords. L'intensité du cyclone extrême Kamisy a été respectée.

Les différents scénarii permettent d'envisager les principales directions de provenance de la houle et ainsi de cibler les zones sensibles dans chaque cas.

## 8.6. CONCLUSIONS

On constate, selon la direction de provenance de la houle, que les impacts sur le lagon diffèrent:

- Une houle qui vient de l'est induit une surcote importante dans la partie est du lagon, à cause de la grande barrière récifale fermée, en particulier au nord est. En effet, la surcote peut atteindre 20 cm dans une large zone au nord de Petite-Terre pour une **houle de nord-est**.
- Une houle qui vient de l'ouest introduit des vagues plus hautes dans la partie ouest du lagon grâce aux larges passes qui jalonnent le récif. En particulier, la **houle de sud-ouest** induit des vagues de près de 6 m dans la baie de Soulou. En effet, la distance importante entre l'ouest du récif sud et la baie de Soulou permet aux vagues de se reformer après le déferlement sur le récif sud.

A la surcote liée aux vagues calculée dans cette étude, on peut rajouter la surcote atmosphérique donnée par Météo-France. La surcote atmosphérique est du même ordre de grandeur que le set-up (entre 15 et 17 cm pour des houles de Nord-Est et Est) et atteint un maximum de 17 cm à Dzaoudzi, selon la simulation de Kamisy de Météo-France, 2003.



## 9. Situation très intense potentielle

### 9.1. SIMULATIONS NUMERIQUES

Dans l'étude sur Kamisy, Mayotte se trouvait entre l'œil du cyclone et le rayon de vent maximum. Or, théoriquement, la position la plus dangereuse pour l'île se situe au niveau du maximum de vent, où les vagues atteignent également leur hauteur maximale. Il est possible d'estimer cette hauteur en connaissant la pression atmosphérique au niveau de l'œil du cyclone grâce à la formule (Hsu 1994) :

$$H_s = 0.2 \times (1013 - P_0) \quad \text{où } P_0 \text{ est la pression au centre du cyclone, } H_s \text{ : hauteur significative des vagues au niveau du rayon de vent maximal}$$

On teste ici le cas d'un cyclone intense de type Kamisy en faisant l'hypothèse que Mayotte se situe au niveau du rayon de vent maximum. Le 10 avril 1984 vers 18h, le vent maximum souffle à 50 m/s, et la pression à l'œil du cyclone est estimée à 954 hPa selon

Météo-France

([http://www.meteo.fr/temps/domtom/La\\_Reunion/base\\_cyclone/base\\_cyclone.html](http://www.meteo.fr/temps/domtom/La_Reunion/base_cyclone/base_cyclone.html)).

On en déduit que  $H_s=11.8$  m avec l'équation précédente.

La configuration de la simulation est la même que pour les cyclones intenses de type Kamisy, seuls l'intensité du vent et la hauteur des vagues varient en entrée. Les directions de provenance de houle testées sont le sud-ouest et le nord-est car elles sont les plus pénalisantes, respectivement en termes de hauteur de vagues et de surcote (cf. 8.6).

Comme on ne se rattache ici à aucun cas réel, des tests de sensibilité sur la marée ont été effectués. En effet, celle-ci joue un rôle important :

- une marée basse implique une plus faible profondeur au niveau des récifs, ce qui favorise le déferlement. Ce phénomène a deux conséquences : la hauteur des vagues est généralement plus faible suite à la dissipation de l'énergie mais la surcote se voit augmentée dans le lagon ;
- au contraire, à marée haute les récifs sont immergés plus profondément ce qui défavorise le déferlement. On observe alors des hauteurs de vague plus importantes dans le lagon. La surcote est plus faible.

Ainsi, les résultats sont présentés pour trois marées différentes : marée basse, mi-marée et marée haute.

## **9.2. RESULTATS**

### **9.2.1. Hauteur des vagues**

#### ***Houle de sud-ouest***

Dans les trois cas, les vagues se propagent dans le lagon par la grande passe de l'ouest. De manière générale, elles atteignent, dans la partie ouest du lagon, 4 à 5 m à marée basse (cf. Illustration 52), 5 à 6 m à mi-marée (cf. Illustration 53) et 6 à 7 m à marée haute (cf. Illustration 54). Les baies de Soulou et Tsingoni sont particulièrement touchées ainsi que toute la côte au nord de Tsingoni.

Dans le reste du lagon, la hauteur des vagues reste entre 1 et 3 m selon la marée. La côte sud est plus vulnérable : les vagues regonflent dans le lagon après le déferlement sur le récif sud et atteignent la côte avec des hauteurs allant jusqu'à 4 m à marée haute.

#### ***Houle de nord-est***

Cette direction de houle est moins pénalisante pour le lagon, protégé par le récif du nord-est sur lequel les vagues déferlent. A marée haute (cf. Illustration 57), où les vagues sont les plus importantes, c'est le secteur qui fait face aux passes Sazilay qui est le plus exposé à des vagues de 4 m ainsi que la partie nord, au nord de Longoni, avec des vagues de 3 m environ.

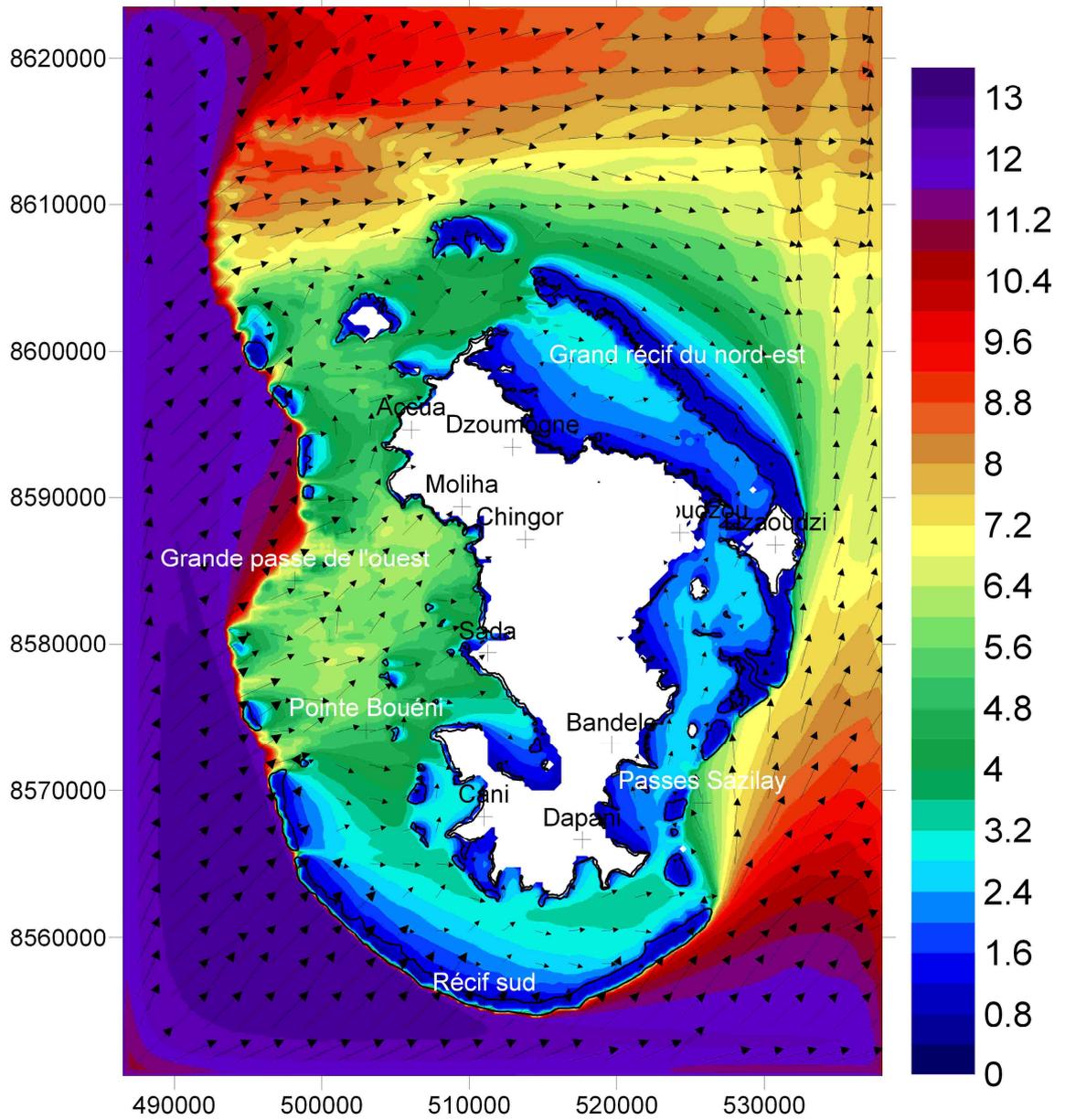


Illustration 52- Hauteur et direction des vagues pour la marée basse et une houle de sud-ouest d'un cyclone très intense potentiel

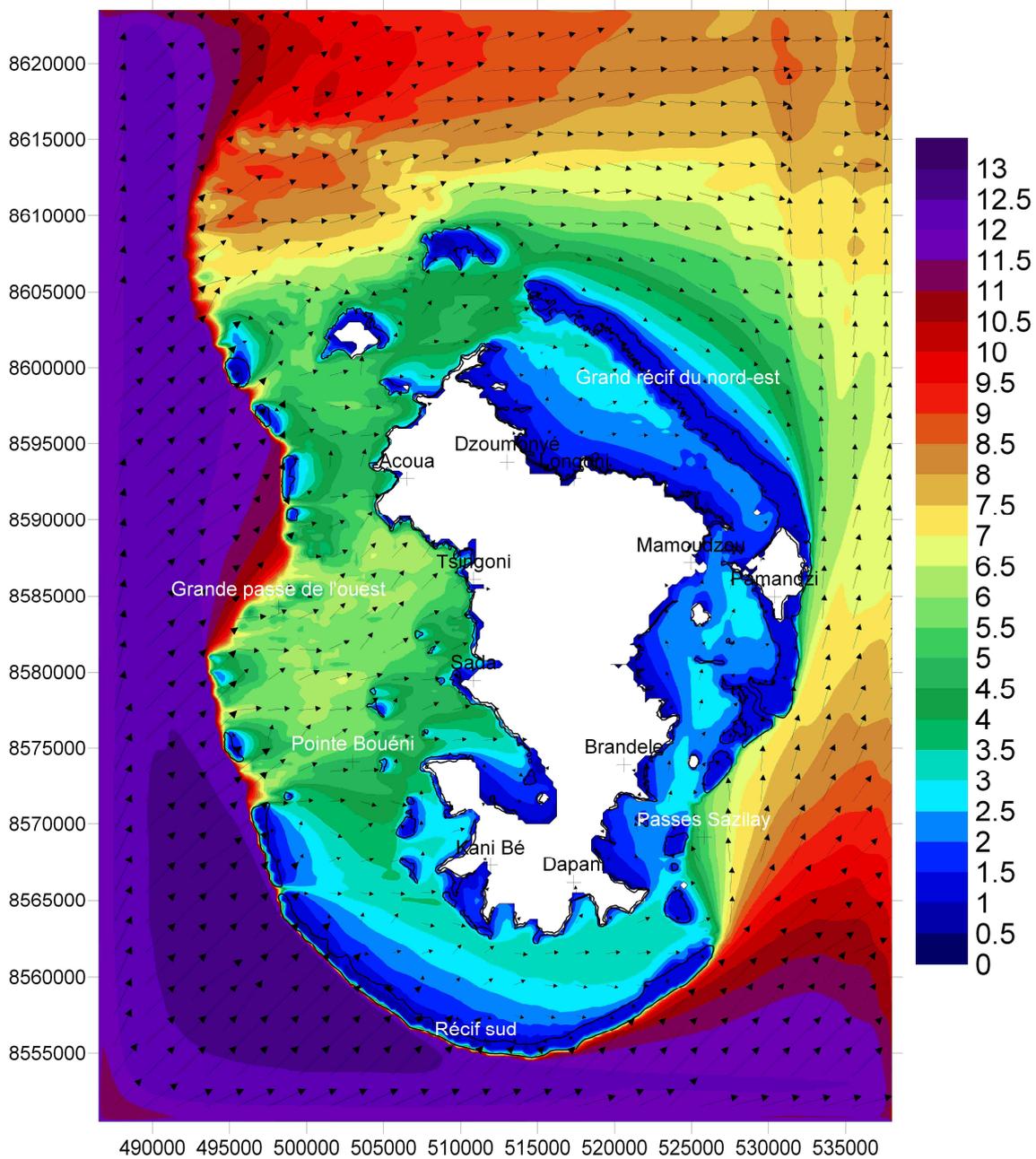


Illustration 53 - Hauteur et direction des vagues pour la mi-marée et une houle de sud-ouest d'un cyclone très intense potentiel.

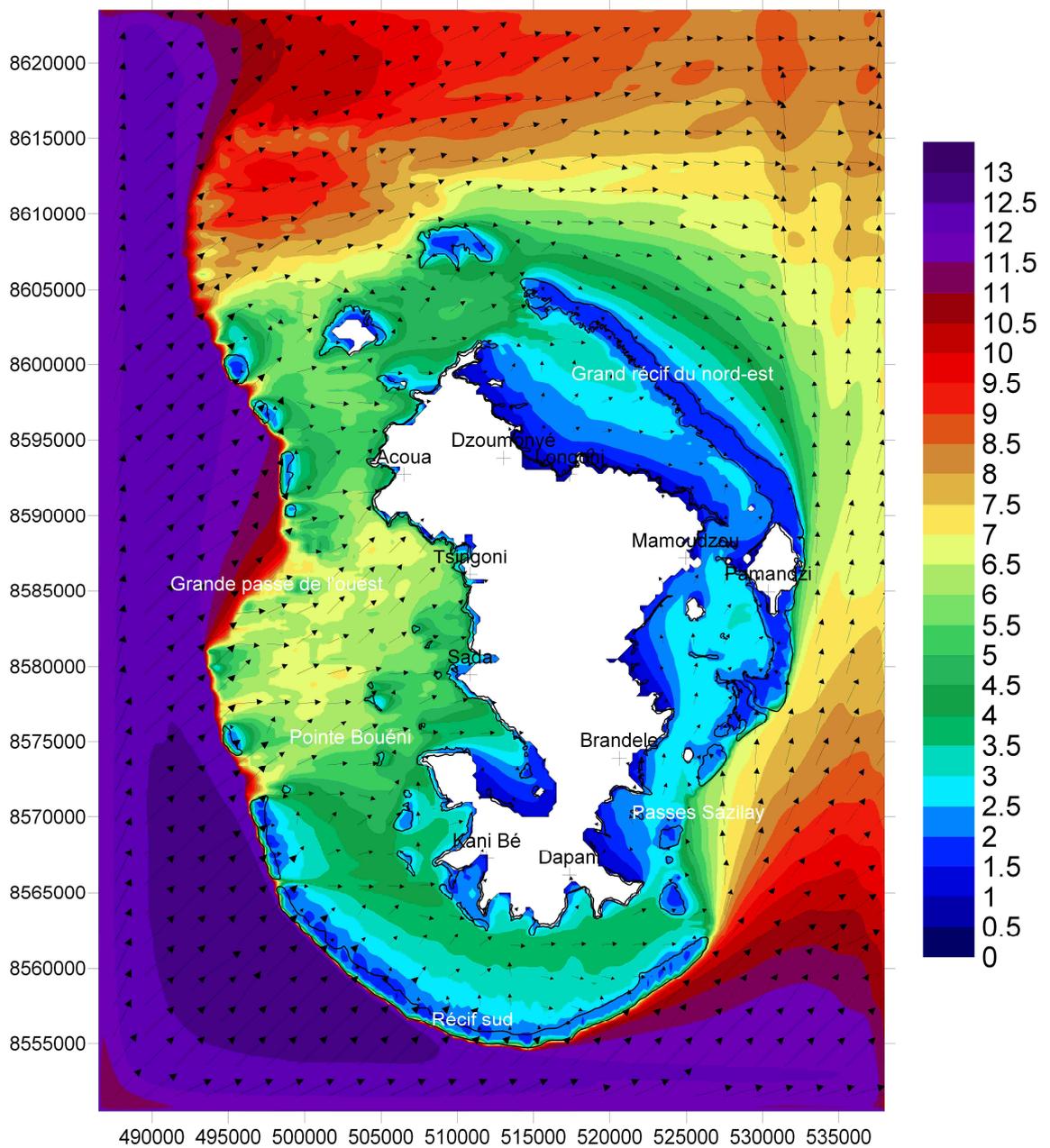


Illustration 54 - Hauteur et direction des vagues pour la marée haute et une houle de sud-ouest d'un cyclone très intense potentiel

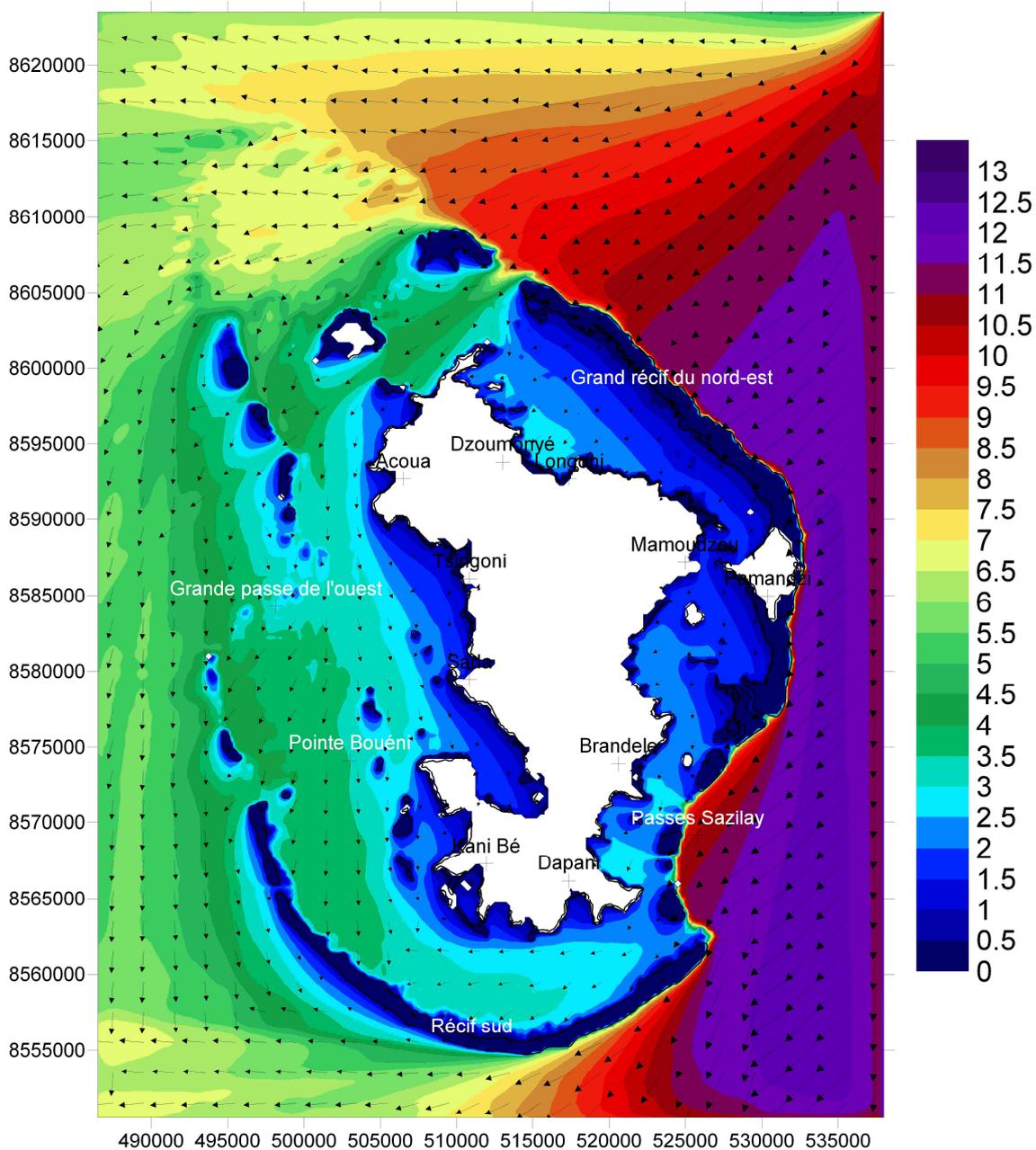


Illustration 55 - Hauteur et direction des vagues pour la marée basse et une houle de nord-est d'un cyclone très intense potentiel

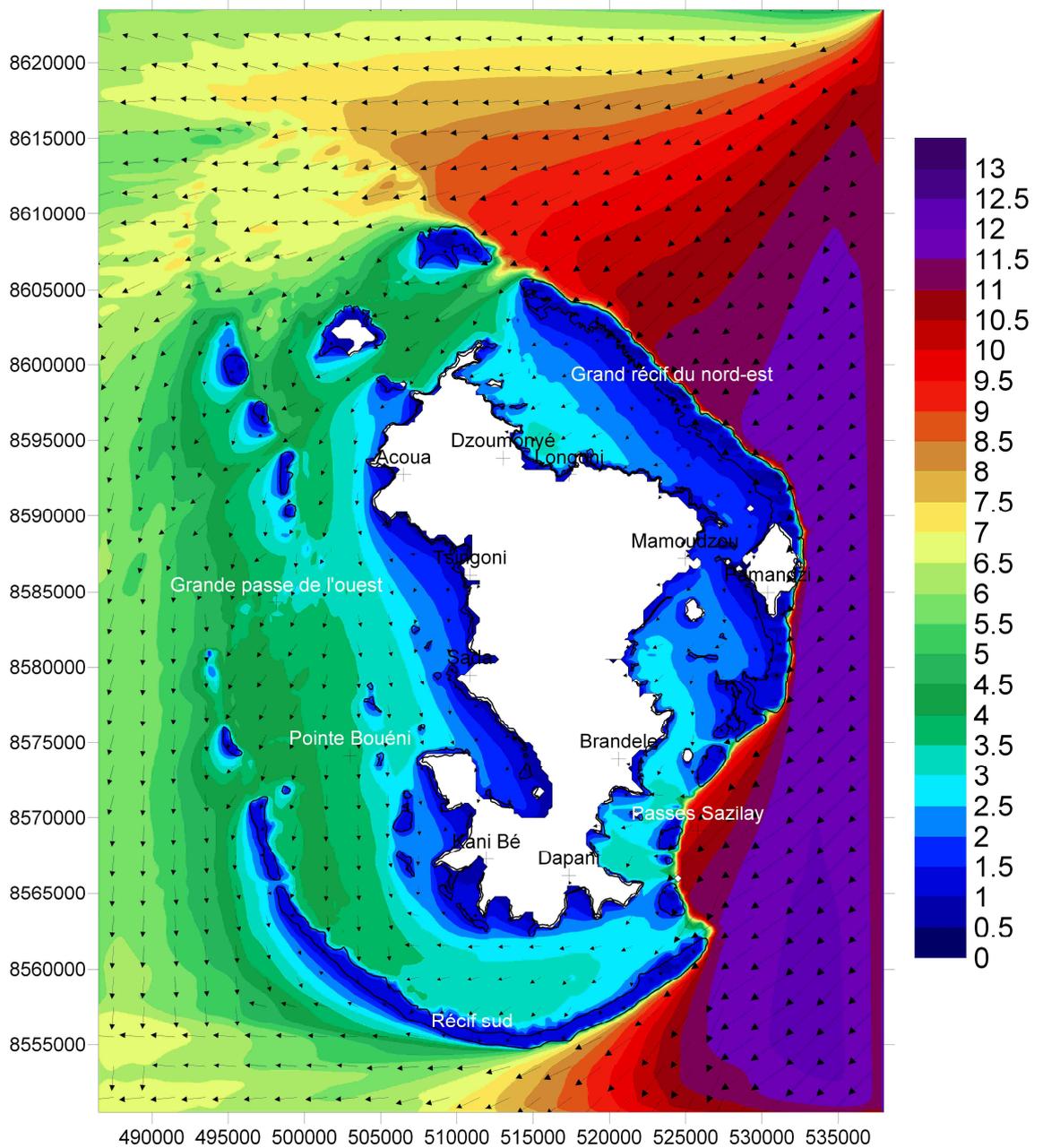


Illustration 56 Hauteur et direction des vagues pour la mi-marée et une houle de nord-est d'un cyclone très intense potentiel

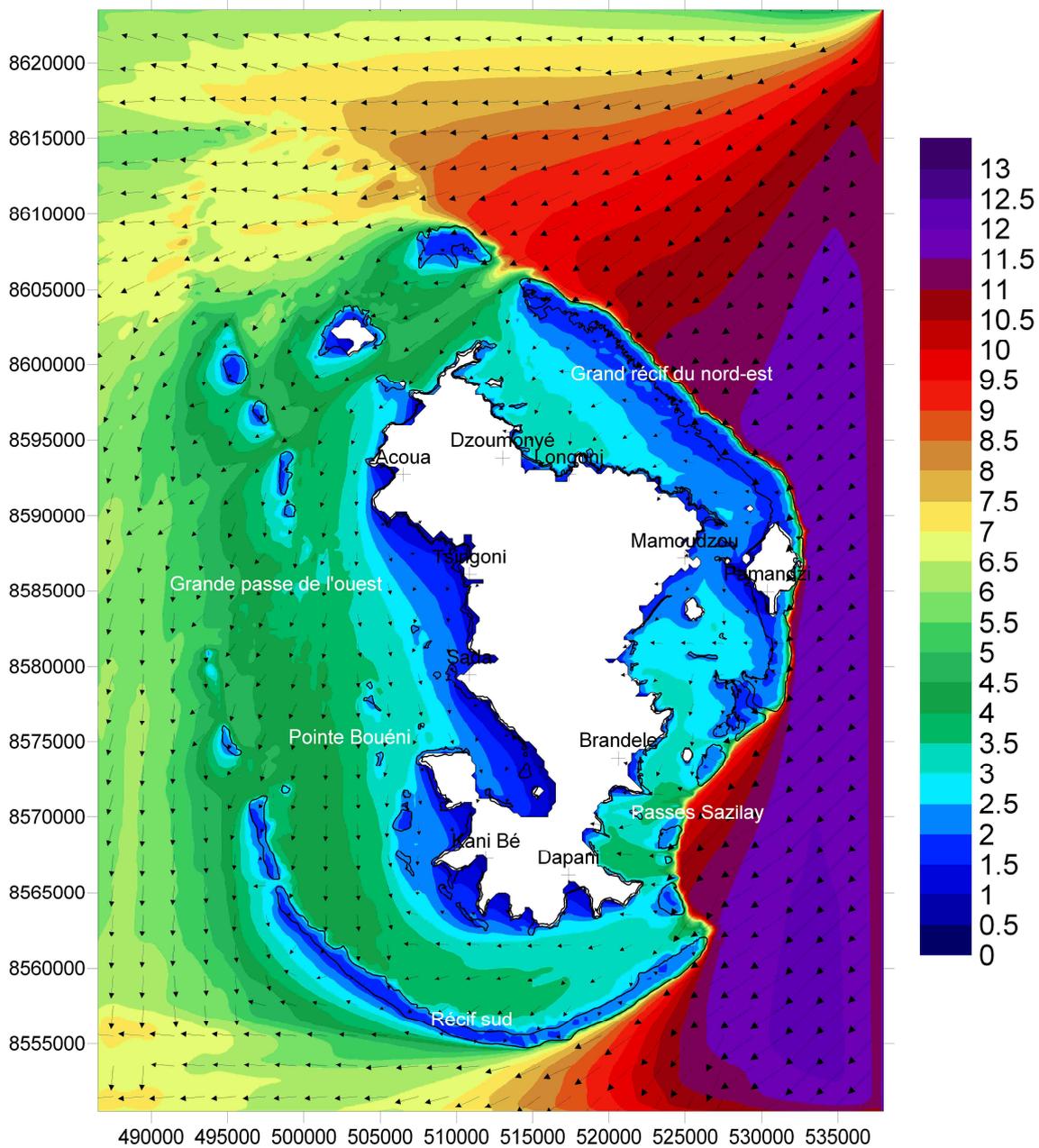


Illustration 57 - Hauteur et direction des vagues pour la marée haute et une houle de nord-est d'un cyclone très intense potentiel

## 9.2.2. Surcote

### *Houle de sud-ouest*

Le maximum de surcote se situe systématiquement au bord du récif sud. Elle atteint 35 cm à marée haute (cf. Illustration 60), 55 cm à mi-marée (cf. Illustration 59) et près de 1 m à marée basse (cf. Illustration 58).

Dans le reste du lagon et au niveau des côtes, la différence de surcote pour les trois marées est moindre :

- A marée basse, la surcote est d'environ 50 cm dans la partie sud du lagon avec un pic à 60 cm dans la baie de Kani. A l'ouest, la moyenne est de 20 cm et à l'est de 5 cm. La surcote est nulle au nord.
- A mi-marée, le maximum est de 30 cm dans la partie sud du lagon. A l'est, la surcote est presque nulle et elle ne dépasse pas 10 cm à l'ouest.
- A marée haute, la surcote est comparable à celle de la mi-marée. Le maximum est toujours atteint dans la baie de Kani ici à 30 cm.

### *Houle de Nord-est*

Cette direction de houle induit systématiquement une surcote plus importante que les autres à cause du récif du nord-est.

- A marée basse toute la partie nord-est du lagon a une surcote supérieure à 50 cm. Le maximum est atteint sur le récif du nord-est et notamment sur la côte de l'aéroport avec une élévation de 80 cm à 1 m. La surcote est nulle sur toute la côte ouest. (cf. Illustration 61).
- A mi-marée, la surcote moyenne est de 30 cm dans la partie est du lagon avec des maximas à 50 cm sur le récif du nord-est. Elle est nulle sur la majeure partie de la côte ouest sauf autour de la pointe Bouéni où l'on note une légère décote. (cf. Illustration 62).
- A marée haute, la moyenne est de 20 cm dans la partie est avec des maximas de 30 cm sur le récif. (cf. Illustration 63).

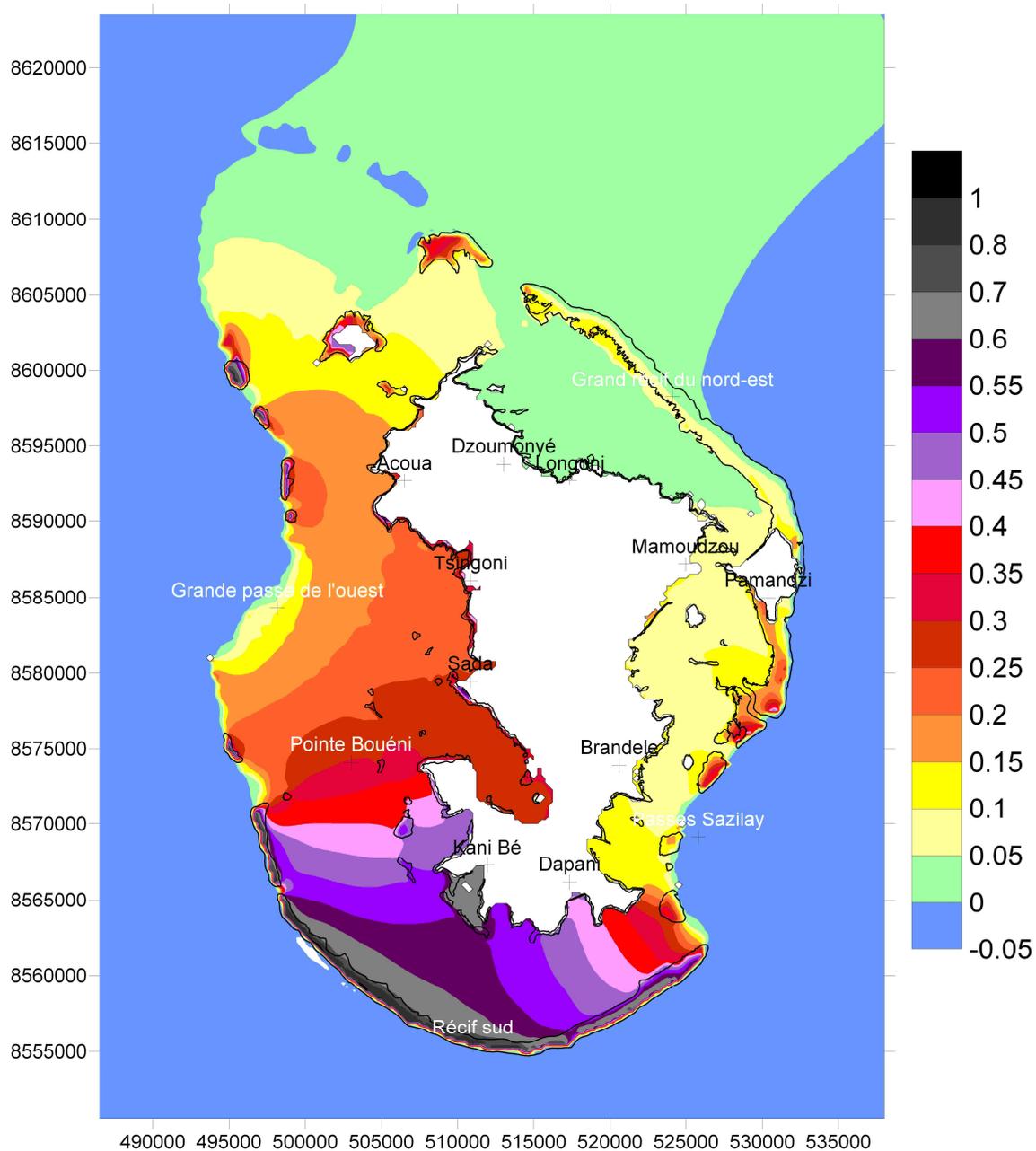


Illustration 58 - Surcote liée aux vagues pour la marée basse et une houle de sud-ouest d'un cyclone très intense potentiel

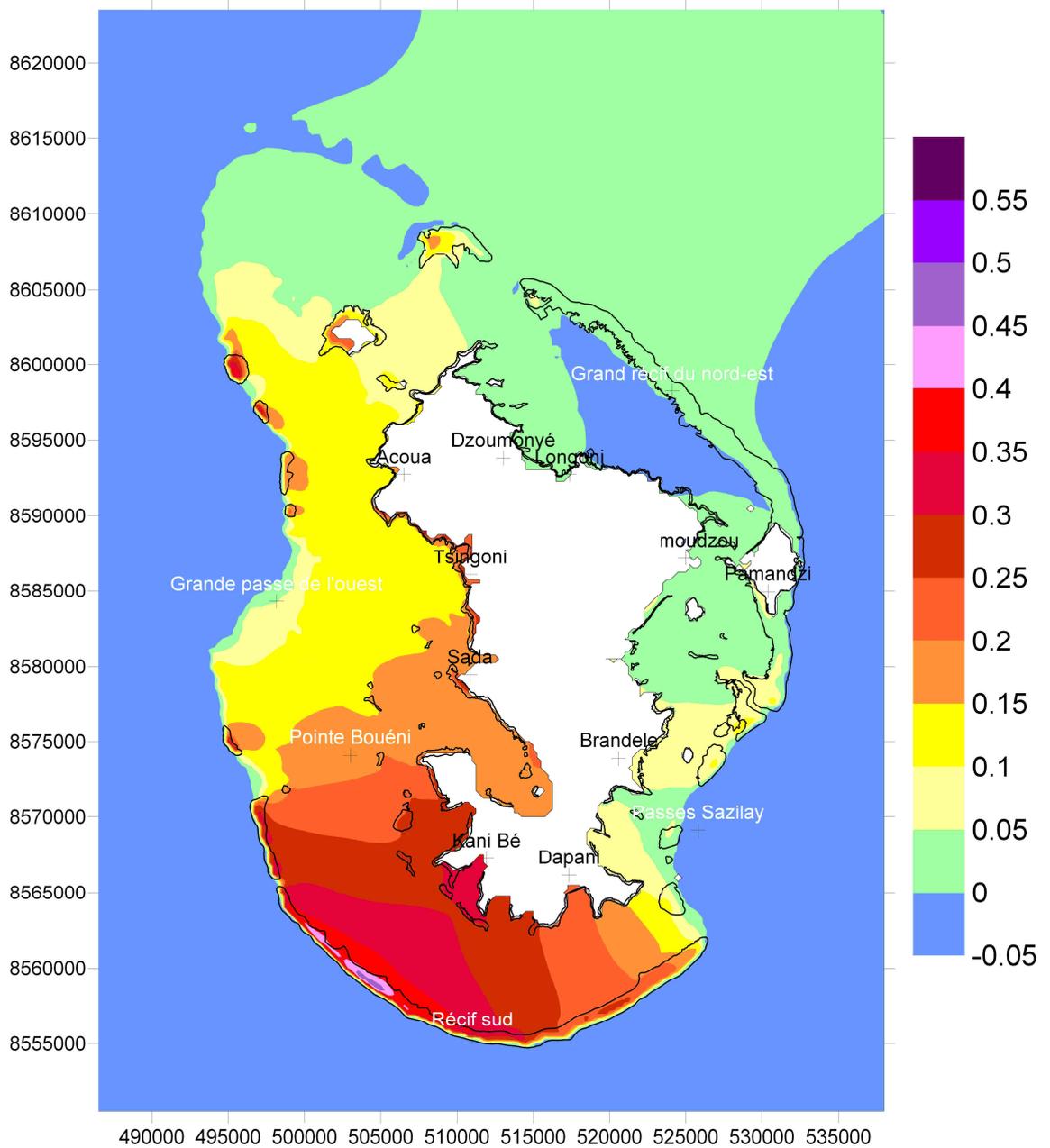


Illustration 59 - Surcote liée aux vagues pour la mi-marée et une houle de sud-ouest d'un cyclone très intense potentiel.

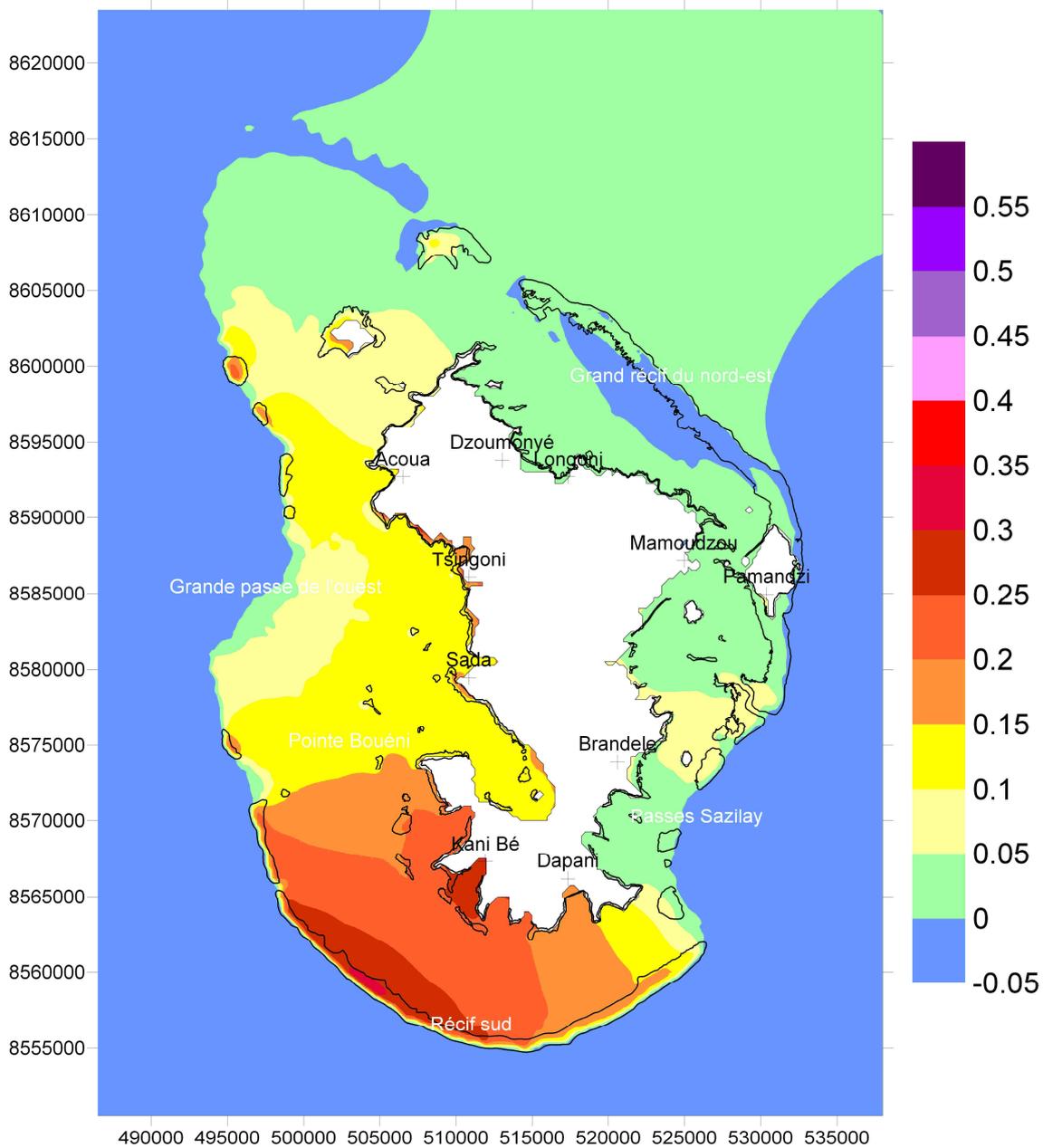


Illustration 60 - Surcote liée aux vagues pour la marée haute avec une houle de sud-ouest d'un cyclone très intense potentiel

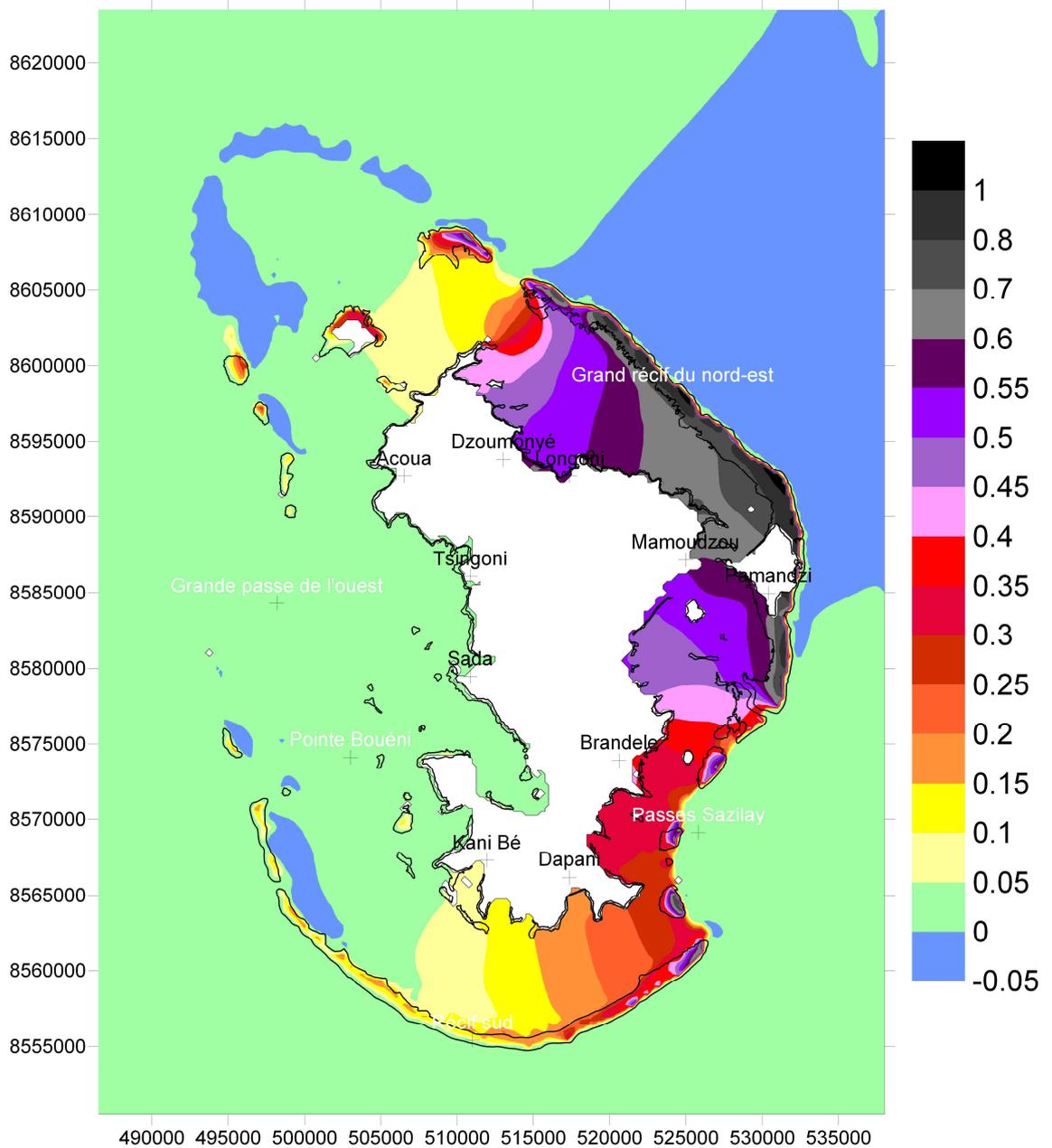


Illustration 61 Surcote liée aux vagues pour la marée basse et une houle de nord-est d'un cyclone très intense potentiel

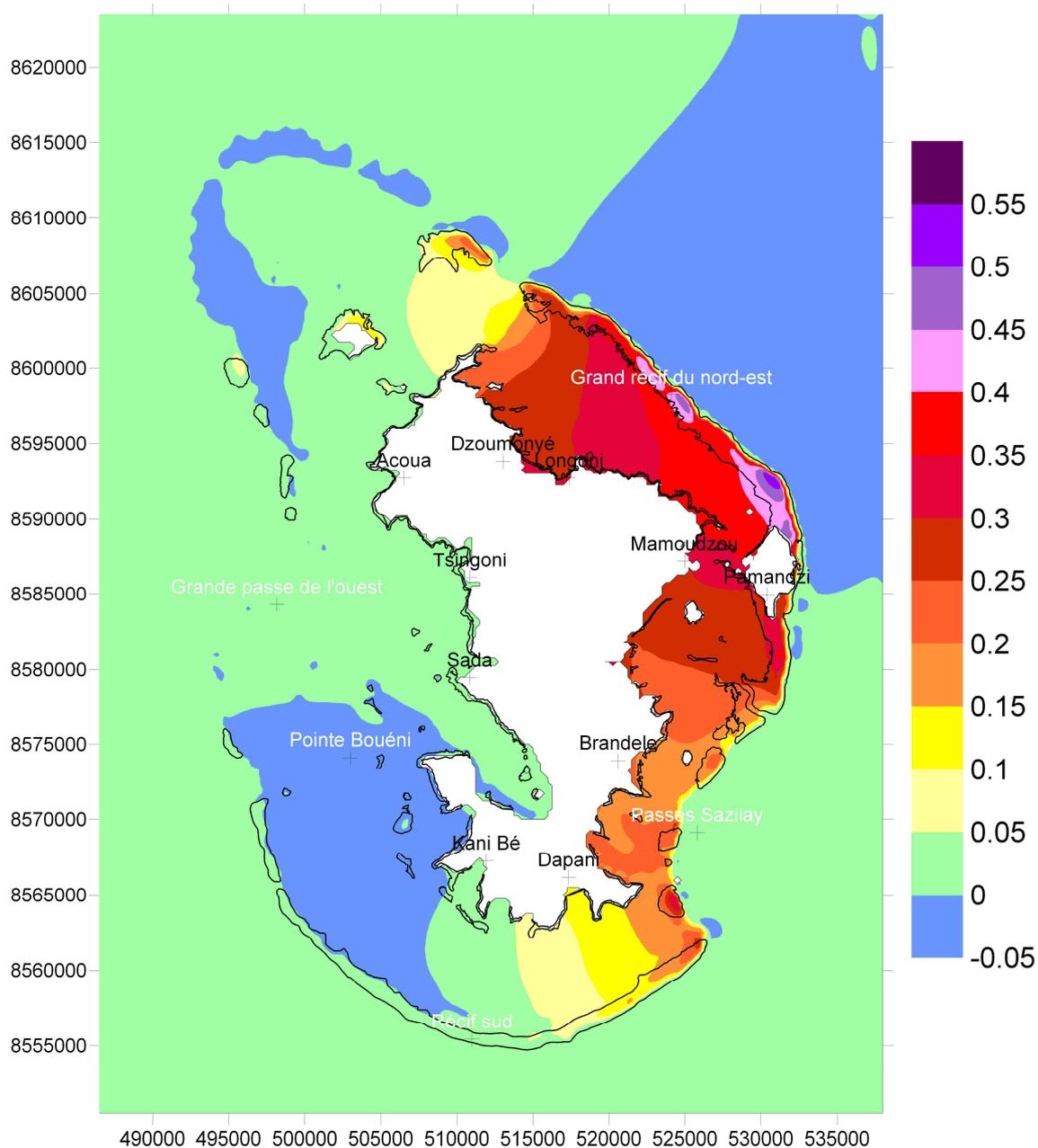


Illustration 62 - Surcote liée aux vagues pour la mi-marée et une houle de nord-est d'un cyclone très intense potentiel.

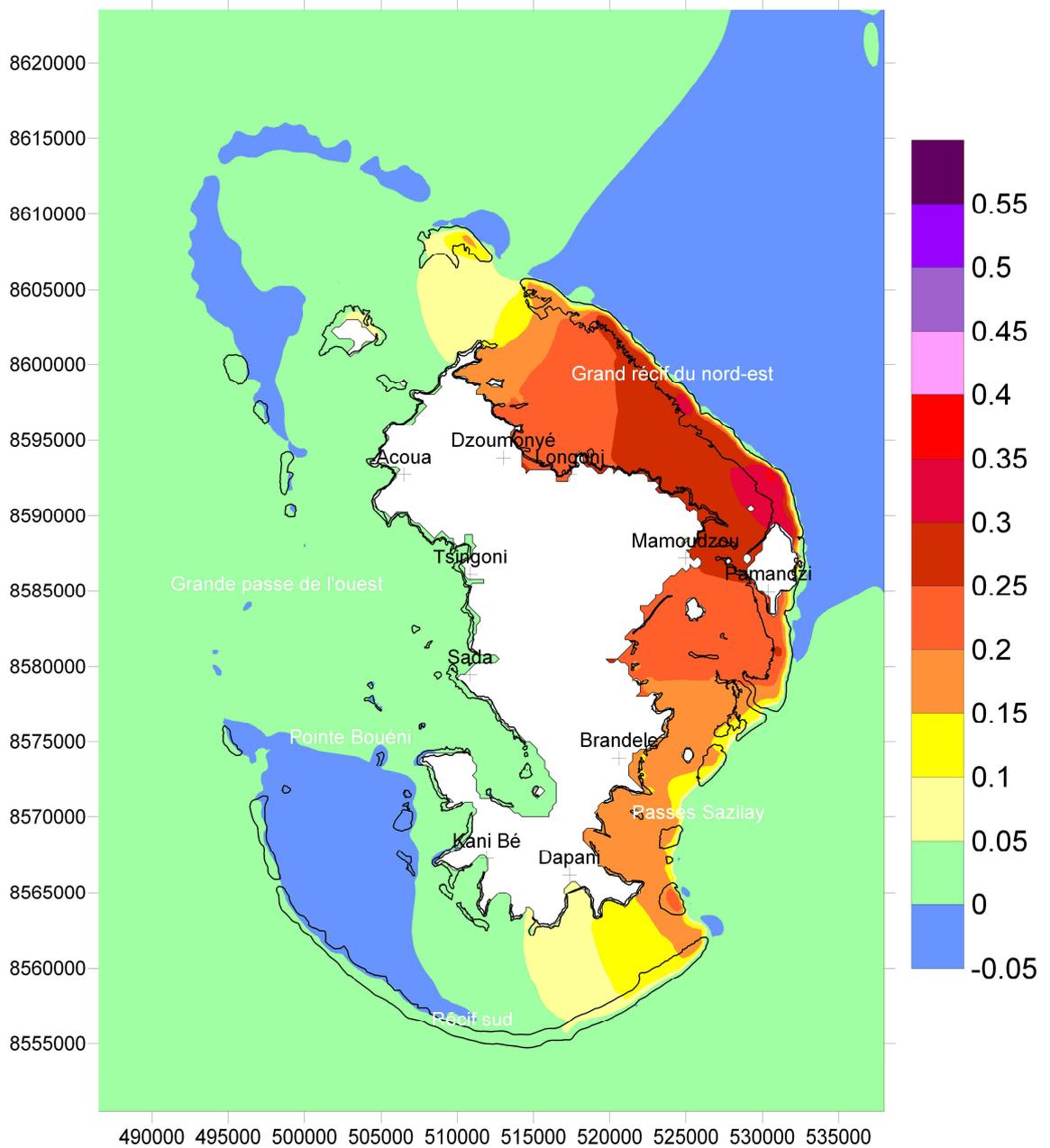


Illustration 63 Surcote liée aux vagues pour la marée haute avec une houle de nord-est d'un cyclone très intense potentiel

### **9.3. CONCLUSIONS**

Les résultats des simulations sont en accord avec la théorie sur l'influence de la marée sur la surcote et les vagues. En terme de vulnérabilité, il faut tenir compte de trois paramètres pour estimer l'impact sur la côte : la hauteur des vagues, la surcote et la marée. En effet, même si la surcote peut gagner jusqu'à 50 cm entre la mi-marée et la marée basse, la différence de niveau de la mer due à la marée elle-même est bien plus importante (on perd 2,5 m entre la mi-marée et la marée basse).

Pour la situation la plus dangereuse, à marée haute, la surcote ne dépasse pas 35 cm dans le lagon mais les vagues sont bien plus importantes : pour une houle de sud-ouest, il arrive des vagues de 7 m dans la baie de Soulou, un maximum pour cette étude.

## 10. Exploitation des résultats de l'étude dans le cadre des risques littoraux

### 10.1. NOTIONS DE BASE

Les deux principaux risques littoraux sont l'**érosion** et les **submersions marines**.

Les submersions marines, à la compréhension desquelles participe cette étude, peuvent être provoquées par l'action combinée de la surcote atmosphérique, du set-up et des vagues très hautes arrivant sur la plage. Le **run-up** est défini comme l'altitude extrême atteinte par les vagues sur la plage ou le littoral en général (limite entre les zones sèche et humide). Il est déterminé par deux composantes :

- la surcote totale (set-up et surcote atmosphérique) ;
- le **swash ou jet de rive** : flux et reflux des vagues sur la plage à la suite de leur déferlement

### 10.2. EXPLOITATION DES RESULTATS

Jusqu'à présent, les submersions marines au passage d'un cyclone ont été estimées et cartographiées selon la méthode telle que définie dans le premier atlas des aléas naturels de Mayotte (Audru *et al.*, 2004). Selon cette méthode la limite de submersion est obtenue en additionnant les valeurs de surcote atmosphérique de Météo-France (Météo-France, 2003) au droit du littoral considéré, une marée haute de 4,20m (cote marine) et une hauteur de houle cyclonique de 0,6m ou 0,9m pour une mangrove ou une plage sableuse (valeurs issues d'estimations dans Haugomat, 2000). Un aléa moyen a été cartographié avec les valeurs de surcote atmosphérique d'un pseudo-Harry et un aléa fort avec les valeurs de surcote atmosphérique de Feliksa.

Cette méthode qui avait l'intérêt de faire au mieux avec les données disponibles, pose toutefois 2 problèmes principaux :

- la « hauteur de la houle » seule n'est pas un paramètre représentatif du rôle de la houle. Pour ce paramètre ce sont le set-up et le swash (dépendant de la hauteur de la houle et de la topographie du littoral) qui sont déterminants pour estimer la submersion totale (run-up) ;
- en termes de houle, les cyclones utilisés dans les atlas (Feliksa, Harry) ne sont pas spécifiquement des événements de référence. Les houles seraient plus importantes pour Kamisy, par exemple.

Compte-tenu de ces éléments, il n'est pas souhaitable de mettre à jour les atlas en remplaçant les valeurs de hauteur de houle de l'atlas par celles issues des simulations. Utiliser les valeurs de surcote ne serait pas mieux car cela occulterait l'effet de swash.

La méthode adéquate reviendrait à revoir la cartographie de l'aléa submersion sur la base d'une modélisation du run-up, c'est-à-dire de la surcote totale (set-up et surcote atmosphérique) et du swash. En effet, les récents développements en modélisation permettent aujourd'hui d'envisager un couplage des simulations numériques afin d'estimer le run-up pour différents cas représentatifs du littoral de Mayotte (sites de plage sableuse, mangrove, ouvrage de protection,...).

Les valeurs issues de ces simulations pourraient ensuite être extrapolées sur les autres sites en affectant des coefficients de pondération suivant les caractéristiques locales.

## 11. CONCLUSIONS

Cette étude permet de mettre en évidence les surcotes liées à la houle suivant différents cas de cyclones :

- pour le cyclone Gloria (cyclone connu) et un cyclone théorique de type Nadia, l'impact reste modéré grâce aux protections que représentent Madagascar d'une part et le récif barrière d'autre part avec des houles ne dépassant pas 2 m au large et une surcote n'excédant pas 8 cm dans le lagon ;
- dans les cas de cyclones théoriques intenses de type Kamisy (plusieurs directions ont été simulées), la houle peut atteindre entre 4 et 6 m dans le lagon avec des surcotes allant jusqu'à 25 cm en certains points ;
- enfin, pour des cyclones plus intenses encore (en faisant l'hypothèse que Mayotte est située au niveau du rayon de vent maximum), les vagues peuvent atteindre 7 m dans le lagon et la surcote 1 m sur les récifs.

Ainsi, il semble que le lagon de Mayotte soit suffisamment « vaste » pour contredire le principe selon lequel, en milieu récifal, les surcotes liées à la houle sont supérieures que les surcotes atmosphériques. En effet, le set-up à la côte n'excède pas 55 cm pour un cyclone extrême potentiel tandis que la surcote atmosphérique modélisée par Météo-France dépasse fréquemment 60 cm pour un cyclone « standard » de type Feliksa.

La direction Ouest apparaît en outre comme la plus sensible en terme de hauteur de la houle (Hs) du fait de l'ouverture des côtes sur le large. En revanche, les zones de lagon fermées par le récif (Nord et Sud) sont plus propices à des surcotes significatives.

La marée haute permet le passage de vagues plus hautes dans le lagon mais c'est à marée basse que la surcote est la plus sensible (35 cm à marée haute pour 1 m à marée basse).

Dans le cas le plus extrême la côte ouest est la plus touchée par les vagues tandis que la surcote concerne davantage les secteurs sud et nord-est.

Sur quelques zones stratégiques de l'île (Longoni, Mamoudzou, Sada, M'Tsapéré) les résultats font apparaître une surcote modérée (entre 14 et 25 cm) pour une exposition à la houle toutefois relativement importante (5 m pour Sada et 3 m pour les autres sites cités) pour Mayotte. Quant à l'aéroport de Pamandzi, il est bien protégé des vagues (maximum 1 m) et la surcote est maximale pour une houle d'est (18 cm).

L'absence de mesures de vagues sur Mayotte en conditions cycloniques ne nous a pas permis de valider les différentes simulations effectuées. Néanmoins des études

comparables où des observations étaient disponibles ont révélé des erreurs maximales de près de 18% sur la hauteur des vagues modélisées (Phadke et al. 2003).

En termes de cartographie de l'aléa submersion, il ne s'avère pas souhaitable d'utiliser ces valeurs pour reproduire la méthode des « Atlas des aléas naturels de Mayotte ». Il serait plus judicieux de mettre en œuvre une méthode basée sur le calcul de l'altitude extrême atteinte par les vagues sur le rivage suite au déferlement (modélisation numérique du run-up) en certains secteurs représentatifs de Mayotte.

## 12. BIBLIOGRAPHIE

- Audru JC, Bitri A., Desprats JF, Mathon C., Maurillon N., Nédellec JL, Jossot O., Rançon JP, Sabourault P., Sedan O., Terrier-Sedan M. et Zornette N., avec la collaboration de Stollsteiner P. (Antéa), de Guillobez S. (Cirad), de Daniel P. et de Haie B. (Météo-France) : 2004. Atlas des aléas naturels à Mayotte, Communes de Mamoudzou, Koungou, Dzaoudzi et Pamandzi. Rapport BRGM/RP-53037-FR, 135 p., 65 figures ou photos, 4 tableaux, 72 cartes et 8 annexes.
- Battjes, J.A. and J.P.F.M. Janssen, 1978. Energy loss and set-up due to breaking of random waves, Proc. 16th Int. Conf. Coastal Engineering, ASCE, 569-587.
- Booij, N., Haagsma IJ.G.; Holthuijsen L.H.; Kieftenburg, A.T.M.M.; Ris, R.C.; Van der Westhuysen A.J. and Zijlema M., 2004. Swan Cycle III version 40.41. User's Manual, 115p.
- Caires, S. and Sterl, A. 100-year return value estimates for wind speed and significant wave height from the ERA-40 data. KNMI Preprint 2004-01
- Collins, J.I., 1972: Prediction of shallow water spectra, J. Geophys. Res., 77, No. 15, 2693-2707.
- Eldeberky, Y. and J.A. Battjes, 1995: Parameterization of triad interactions in wave energy models, Proc. Coastal Dynamics Conf. '95, Gdansk, Poland, 140-148.
- Haugomat C., 2000 : Protection du littoral de Mayotte, approche du phénomène cyclonique et propositions d'investissements, Travail de fin d'étude de l'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, Direction de l'Equipement de Mayotte, 54 p, 2 vol., 7 ann.
- Hasselmann, K., T.P. Barnett, E. Bouws, H. Carlson, D.E. Cartwright, K. Enke, J.A. Ewing, H. Gienapp, D.E. Hasselmann, P. Kruseman, A. Meerburg, P. Müller, D.J. Olbers, K. Richter, W. Sell and H. Walden, 1973: Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP), Deutsch. Hydrogr. Z. Suppl., 12, A8.
- HSU, S.A., 1994. Estimating hurricane waves. Mariners Weather Log, 35, (1) 68.
- Longuet-Higgins, M. S., and R. W. Steward, 1964. Radiation stress in water waves; a physical discussion, with applications, Deep Sea Res., 11, 529-562.

Luetlich, R. A., Westerink, J. J. & Sheffner, N. W., 1992. ADCIRC: An Advanced Three-Dimensional Circulation Model for Shelves, Coasts and Estuaries. Report 1: Theory and Methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL with Applications. Tech. Rep. DRP-92-6. Department of the Army, Washington, DC.

Madsen, O.S., Y.-K. Poon and H.C. Graber, 1988. Spectral wave attenuation by bottom friction: Theory, Proc. 21th Int. Conf. Coastal Engineering, ASCE, 492-504.

Massel S.R., Gourlay M.R., 2000. On the modelling of wave breaking and set-up on coral reefs, *Coast. Eng.*, 39, 1–27.

Météo-France, 2003. Surcotes liées au passage d'un cyclone à Mayotte (Rapport préliminaire destiné au BRGM). P. Daniel, Division Prévision Marine et Océanographie.

Moon, I-J., Ginis I., Hara, T., 2003. Numerical Simulation of Sea Surface Directional Wave Spectra under Hurricane Wind Forcing. *Journal of Physical Oceanography*, vol 33, 1680-1706.

Phadke, A.C., C.D. Martino, K.F. Cheung, S.H. Houston, Modeling of tropical cyclone winds and waves for emergency management. *Ocean Engineering* 30 (2003) 553-578.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2001. EM 1110-2-1100, Part II. Meteorology and Wave Climate.

Weaver R.J. 2004. Effect of wave forces on storm surge. Master of Science thesis, Univ. of Florida, 65 p.





Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

**Centre scientifique et technique**

3, avenue Claude-Guillemin  
BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France  
Tél. : 02 38 64 34 34

**Service géologique régional de La Réunion**

5, rue Ste Anne  
BP 906

97478 – St Denis Cedex - France  
Tél. : 02 62 21 22 14