



**Comité utilisateur OBLIC**

# Phénomène vague-submersion marine

Yvan Mercier

Sources : Division Prévision Marine de Météo France, Météo NC, Jérôme Aucan (IRD)

Juillet 2016

# Les composantes du niveau marin

**Le niveau marin est la hauteur moyenne de la surface de la mer par rapport à un niveau de référence suffisamment stable (défini par un géoïde ou un référentiel géodésique). Il est constitué de :**

- La marée
- Les surcotes météorologiques : modification du niveau de la mer par la pression atmosphérique et les vents d'afflux
- Les effets hydrodynamiques (vagues)
- Les seiches : oscillations stationnaires générées par des perturbations externes comme les vagues piégées dans des zones plus ou moins confinées. On les observe le plus souvent dans des zones semi-fermées telles que les baies, estuaires, lagons... Elles ont une période propre dépendant de la géographie et de la bathymétrie, souvent comprise entre 10 minutes et quelques heures, et plus faible dans les ports (30 secondes à 10 minutes).

# Le phénomène de surcote

**La surcote** : différence entre le niveau marin observé et le niveau marin qui existerait en présence de la marée astronomique seule (niveau prédit).



Surcote

**Niveau atteint (marégraphe)**

**Niveau prévu (marée)**

Décote

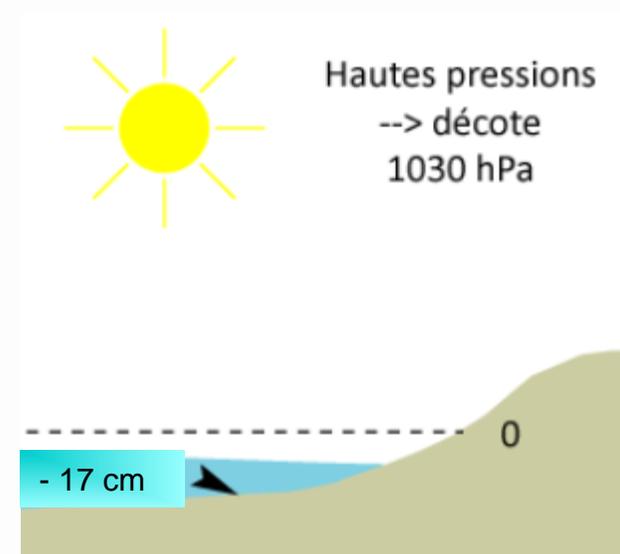
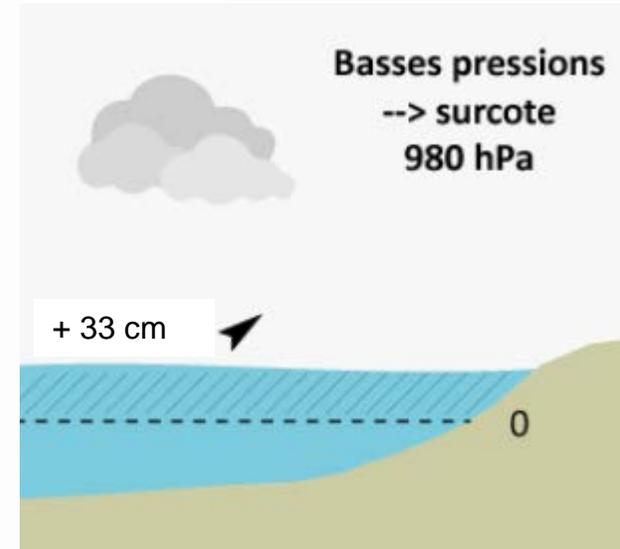
# Le phénomène de surcote

## *Surcote générée par la baisse de pression*

### La règle du baromètre inverse

Une baisse de pression de 1hPa provoque une élévation du niveau marin de 1 cm (pris en compte par les modèles de surcote).

Effet quasi immédiat, communiqué à toute la colonne d'eau et qui ne dépend ni de la profondeur, ni de la distance à la côte.



# Le phénomène de surcote

## *Surcote générée par le vent*

**Vent d'afflux (minimum 30 Kt) :** Lorsque le vent établi pousse les eaux de surface vers la côte, cela provoque une surcote (poussée mécanique naturelle de l'eau de surface, et son accumulation vers les rivages provoque alors une surélévation du niveau de la mer par blocage). Sur les plateaux continentaux (faible profondeur), cette surcote par accumulation des eaux due au vent d'afflux s'aggrave fortement.

Inversement, le vent de reflux pousse les eaux de surface vers le large et provoque une baisse du niveau de la mer près des côtes (décote).

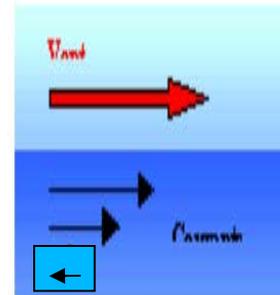
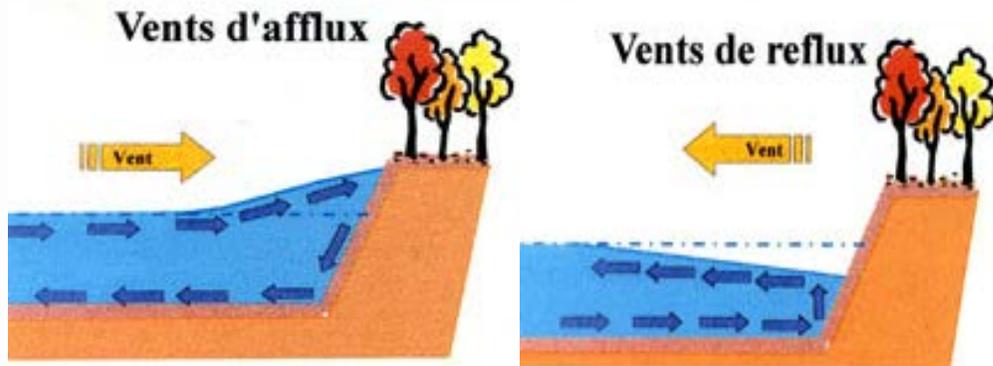


Fig 1 - Eaux profondes  
*pas de surcotes*

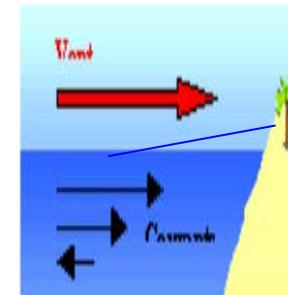


Fig 2 - Côte bordée d'eaux profondes  
*peu de surcotes*

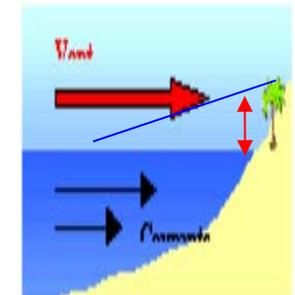
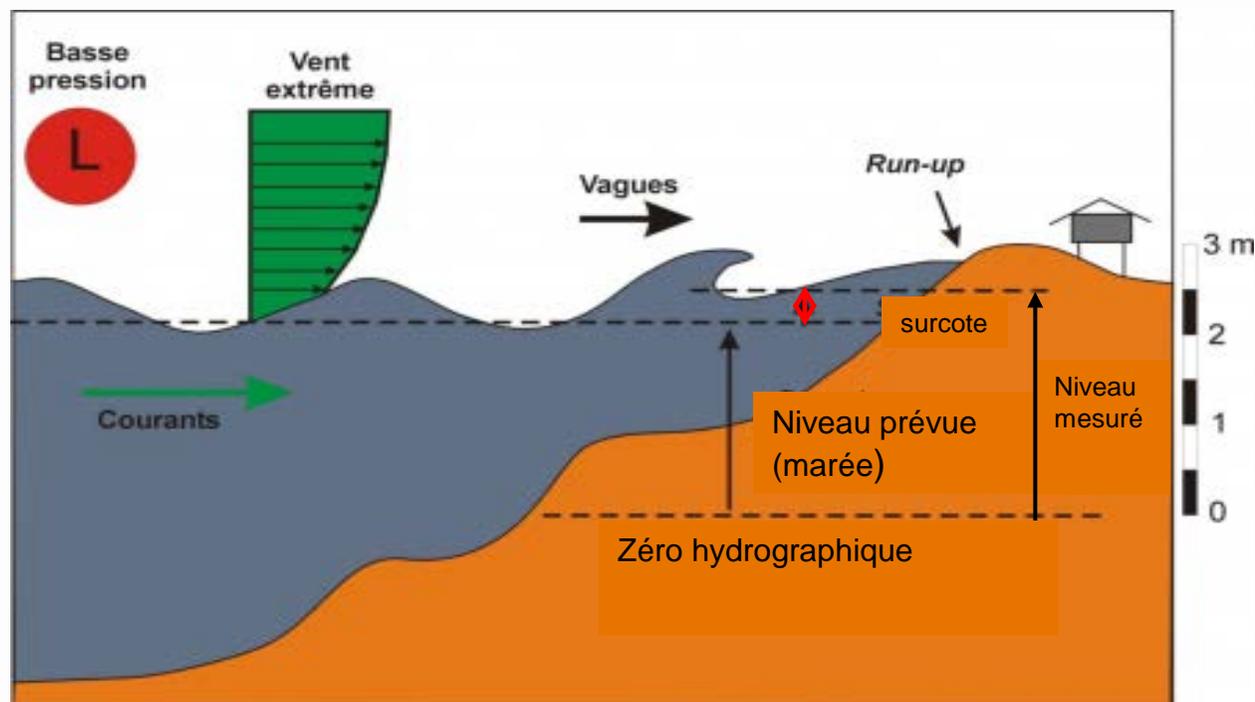


Fig 3 - Côte avec eaux peu profondes  
*fortes surcotes*

# Marée de tempête

**La surcote** est générée par : la baisse de pression (au centre de la dépression), les vents forts d'une dépression (vent d'afflux).

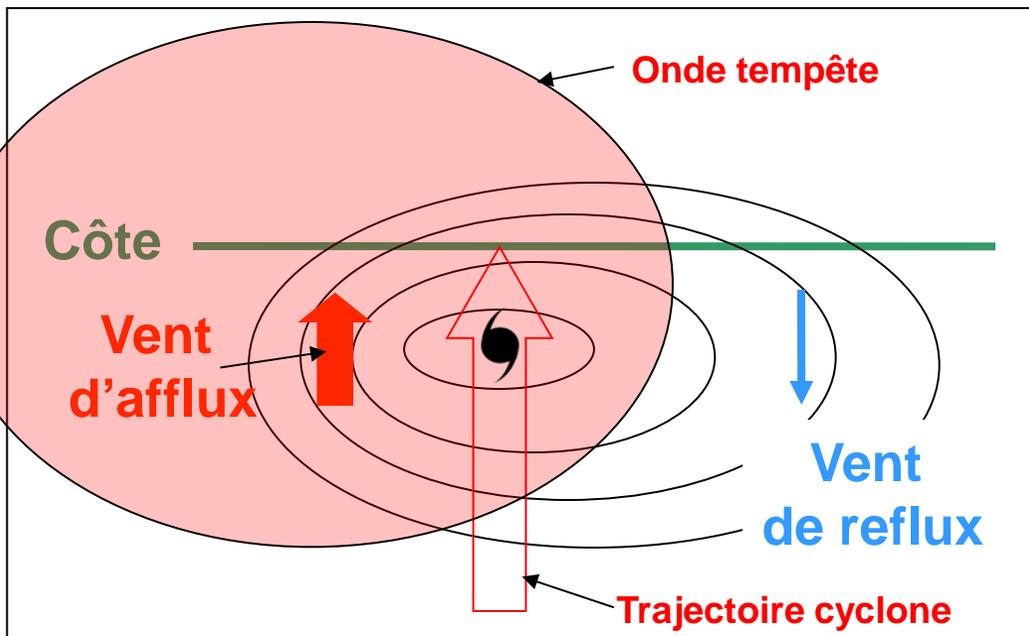
Les surcotes provoquées par une tempête ou cyclone sont appelées communément marée de tempête, et sont particulièrement **dangereuses s'il y a conjonction avec la marée haute** et d'autant plus si la marée est de vive-eau.



# Le phénomène onde de tempête dans le cas d'un cyclone en Hémisphère Sud

Effet baromètre inverse :

La baisse de pression provoque une hausse du niveau de la mer par aspiration.



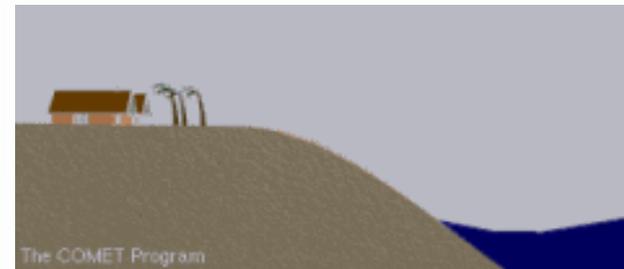
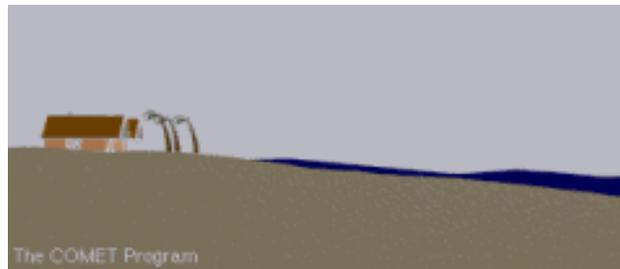
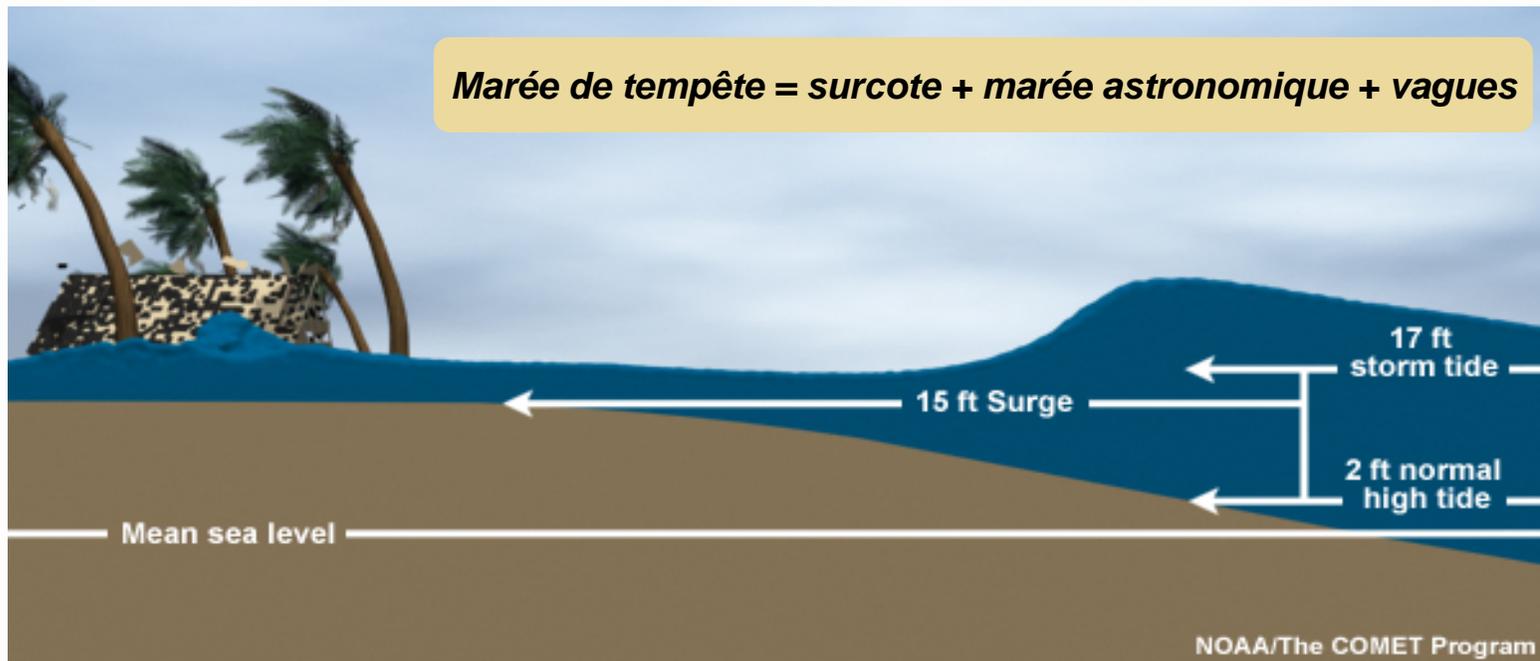
Effet du vent :

- Dans un cyclone tropical, les vents du demi-cercle dangereux créent un courant de surface dit courant de dérive.
- A l'approche d'une côte, ce courant entraîne une accumulation des eaux dans le quadrant avant gauche (H.S.), provoquant alors une surélévation du niveau de la mer.

Lorsqu'un cyclone aborde une côte, ces deux phénomènes, effet du baromètre inverse et forçage du vent, se conjuguent. L'élévation résultante est la SURCOTE ou ONDE de TEMPETE. Cette onde est maximale (et plus dangereuse) dans le quadrant avant gauche en HS.



# Le phénomène d'onde de tempête (provoqué par un cyclone)



La hausse du niveau de la mer est plus ou moins importante suivant :

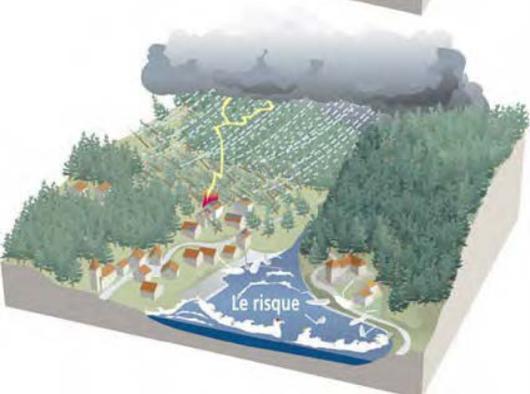
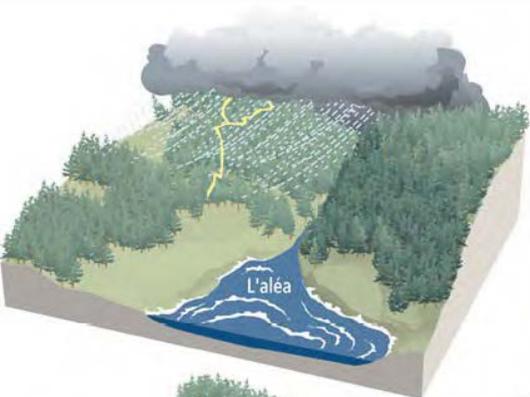
- la force des vents
- la configuration de la côte
- la topographie du fond.
- La hauteur des vagues (run up)

# Phénomène vagues-submersion

---

Qu'est-ce que l'aléa vagues-submersion ?

# Définitions générales



- **Notion de « risque » lié à :**
- Un **aléa** est la possibilité qu'un phénomène naturel physique, relativement brutal, menace ou affecte une zone donnée.
- **L'enjeu** = ensemble des personnes et des biens pouvant être affecté par un aléa
- **La vulnérabilité** mesure le niveau de conséquences prévisibles de l'aléa sur les enjeux

**Risque = Aléa \* Enjeu** selon la vulnérabilité

# L'aléa submersion marine

Qu'est-ce qu'une submersion marine ?

Une inondation par la mer !



# Submersions marines

- Les submersions marines sont l'une des catastrophes naturelles générant les plus importantes pertes humaines et dégâts matériels.
- L'augmentation de la pression démographique sur les littoraux conjointement à l'élévation du niveau de la mer risque d'aggraver cette situation. Les récentes submersions marines associées aux tempêtes Katrina (2005) et Ike (2008) dans le Golfe du Mexique, Sandy (2012) dans l'état de New York, Xynthia en France ou le typhon Haiyan aux Philippines illustrent l'importance de ce phénomène.
- Les submersions marines sont associées à des niveaux marins extrêmes, résultant en général de la superposition d'une forte surcote (pression atmosphérique+vent d'afflux), de marées hautes de forte amplitude et de fortes vagues.

# L'aléa submersion marine

---

Définition : Une submersion marine est une inondation temporaire de la zone côtière par la mer dans des conditions météorologiques défavorables.

On distingue trois types de submersion :

- La submersion par débordement.
- La submersion par franchissements discontinus de « paquets de mer ».
- La submersion par rupture du système de protection (digue ou cordon dunaire).

## Les différents types de submersion

Submersion par débordement : le niveau d'eau est supérieur au niveau des ouvrages de protection.



Leucate

# Les différents types de submersion

Submersion par franchissement de « paquets de mer » : le niveau moyen de la mer est inférieur au sommet de l'ouvrage, mais les vagues viennent se briser sur l'ouvrage de défense et le franchissent par « paquets de mer ».



Villefranche-sur-mer, novembre 2011



Port de Cannes, mai 2010

# Les différents types de submersion

Submersion par rupture d'ouvrage : le niveau d'eau est inférieur au niveau de l'ouvrage, mais une rupture laisse s'engouffrer l'eau dans des terres plus basses que le niveau de la mer.

Rupture de cordon dunaire



Wissant (62)

Rupture de digue



Valras, 2013

# L'aléa fortes vagues

- Choc/Action mécanique des vagues
- Projections d'objets



Nice, 4 mai 2010

# Le phénomène vagues-submersion



Exemple de phénomène vagues-submersion provoquant une inondation du littoral côtier (Nice, novembre 2011).

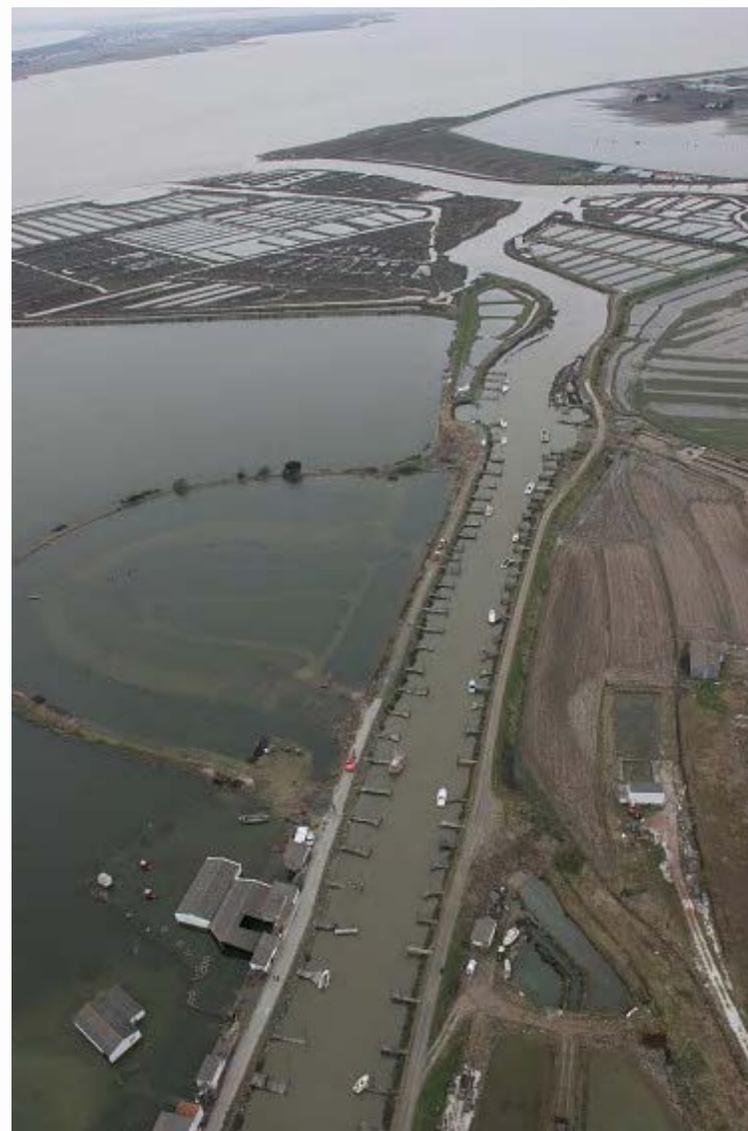


# Les conséquences du phénomène vagues-submersion les plus graves :

## La submersion marine et l'inondation



- Xynthia sur la façade Atlantique :
- 53 morts
- Plus de 50 000 ha inondés
- Plus de 5 000 maisons inondées
- Dégâts matériels estimés à 2,5 milliards d'euros
- Près de 1 000 exploitations agricoles sinistrées



# Les conséquences du phénomène vagues-submersion



← Dégât portuaire

Dégâts en front de mer →



# Les conséquences du phénomène vagues-submersion



L'érosion dunaire  
⇒ recul du trait de côte

L'érosion des falaises



## Phénomène vagues-submersion en NC ?

---

- Pas de vigilance « Vague-submersion » en cours.
- L'aléa marin « Fortes houles » à la côte fait partie de la liste des paramètres météorologiques pour lesquels la carte de vigilance est active. Ce paramètre comporte un pictogramme.

# Vigilance météorologique « fortes houles »

## Vigilance météorologique

La carte est actualisée au moins 2 fois par jour, à 6h et 16h.

-  **Une vigilance absolue s'impose** des phénomènes météorologiques dangereux d'intensité exceptionnelle sont prévus ...
-  **Soyez très vigilant**, des phénomènes météorologiques dangereux sont prévus ...
-  **Soyez attentif** si vous pratiquez des activités sensibles au risque météorologique ...
-  **Pas de vigilance particulière.**



Vent violent



Fortes pluies - Orages



Forte houle

### Conséquences et conseils



La vigilance météorologique en Nouvelle-Calédonie est élaborée en collaboration avec la **Sécurité Civile**

[Vigilance en métropole](#)

[Vigilance en Europe](#)

**Diffusion** : le samedi 16 mai 2015 à 05h20

**Validité** : jusqu'au samedi 16 mai 2015 à 16h00

### Commentaires de Météo-France :

Vigilance orange forte houle de Bourail à l'île des Pins où une houle de sud sud-ouest supérieure à 4m est attendue dès cet après-midi et jusqu'à dimanche matin.

Vigilance jaune forte houle sur le nord de la côte Ouest la houle de sud sud-ouest sera comprise entre 3m et 4m.



 **METEO FRANCE**



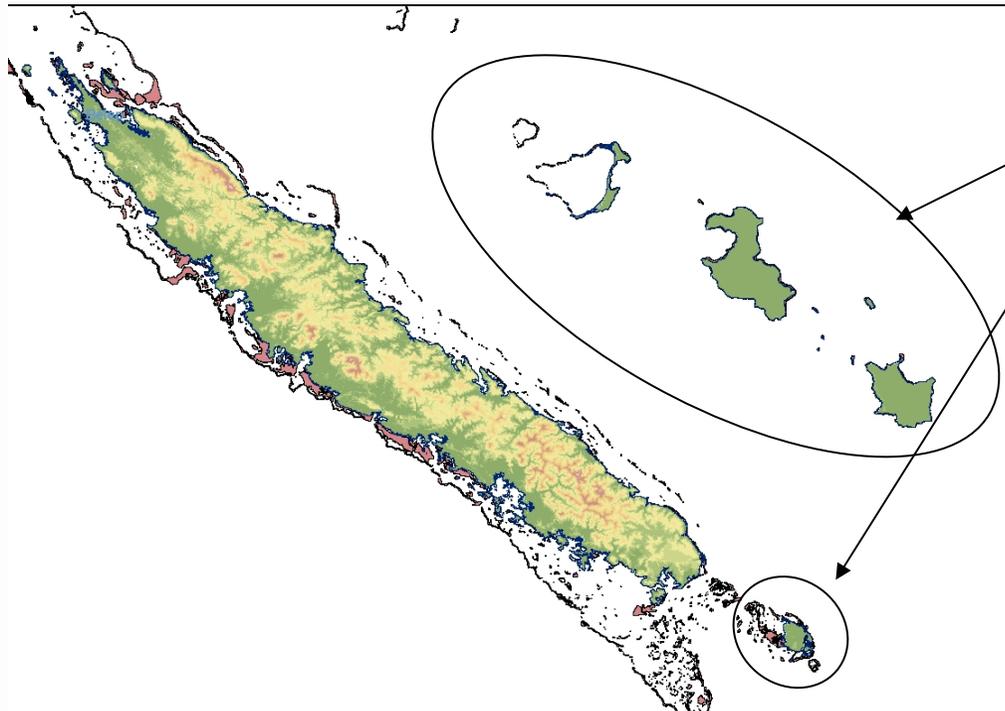
Copyright Météo-France



# Les risques en NC : un littoral moins sensible qu'en métropole ?

## Facteurs limitant les risques de submersion :

- La barrière de corail et le lagon protègent en grande partie la Nouvelle-Calédonie des fortes vagues et du phénomène de surcote (**excepté les Loyauté et l'île des pins**).
- Perte d'énergie très importante sur la barrière de corail. Lagon suffisamment grand et profond pour constituer une zone tampon absorbante. Barrière suffisamment poreuse pour limiter l'ensachage (sauf à Ouvéa).



Pas de barrière, ou bien trop proche du littoral pour limiter significativement l'effet des fortes vagues ou d'une marée de tempête.

# Les risques en NC : facteurs limitant.

- Pas de plateau continental autour de la Nouvelle-Calédonie et les Loyauté. Surcote créée par le vent d'afflux limitée par les eaux profondes autour de l'archipel (favorable à un courant de sub-surface de reflux).

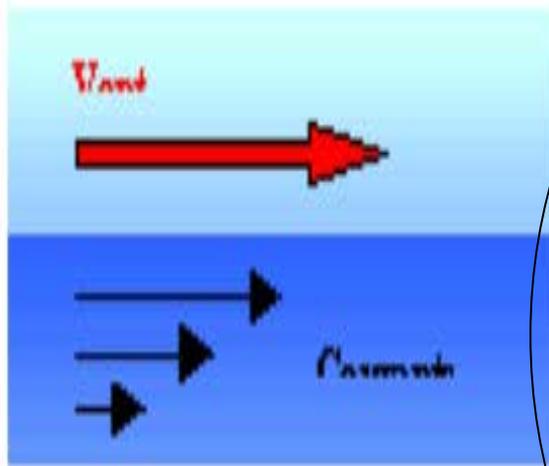


Fig 1 - Eaux profondes  
pas de surcotes

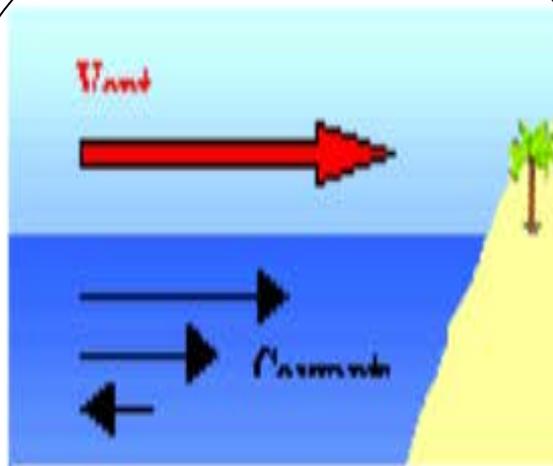


Fig 2 - Côte bordée d'eaux profondes  
peu de surcotes

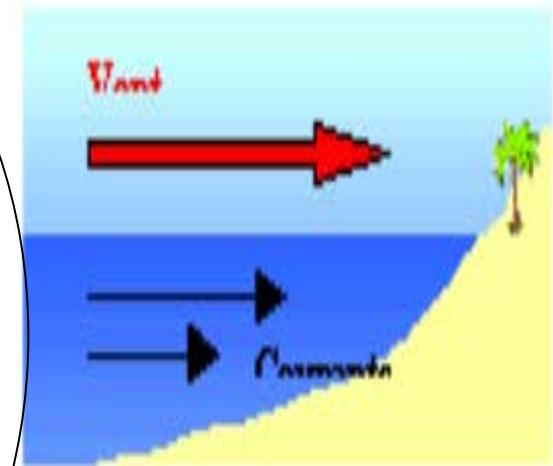


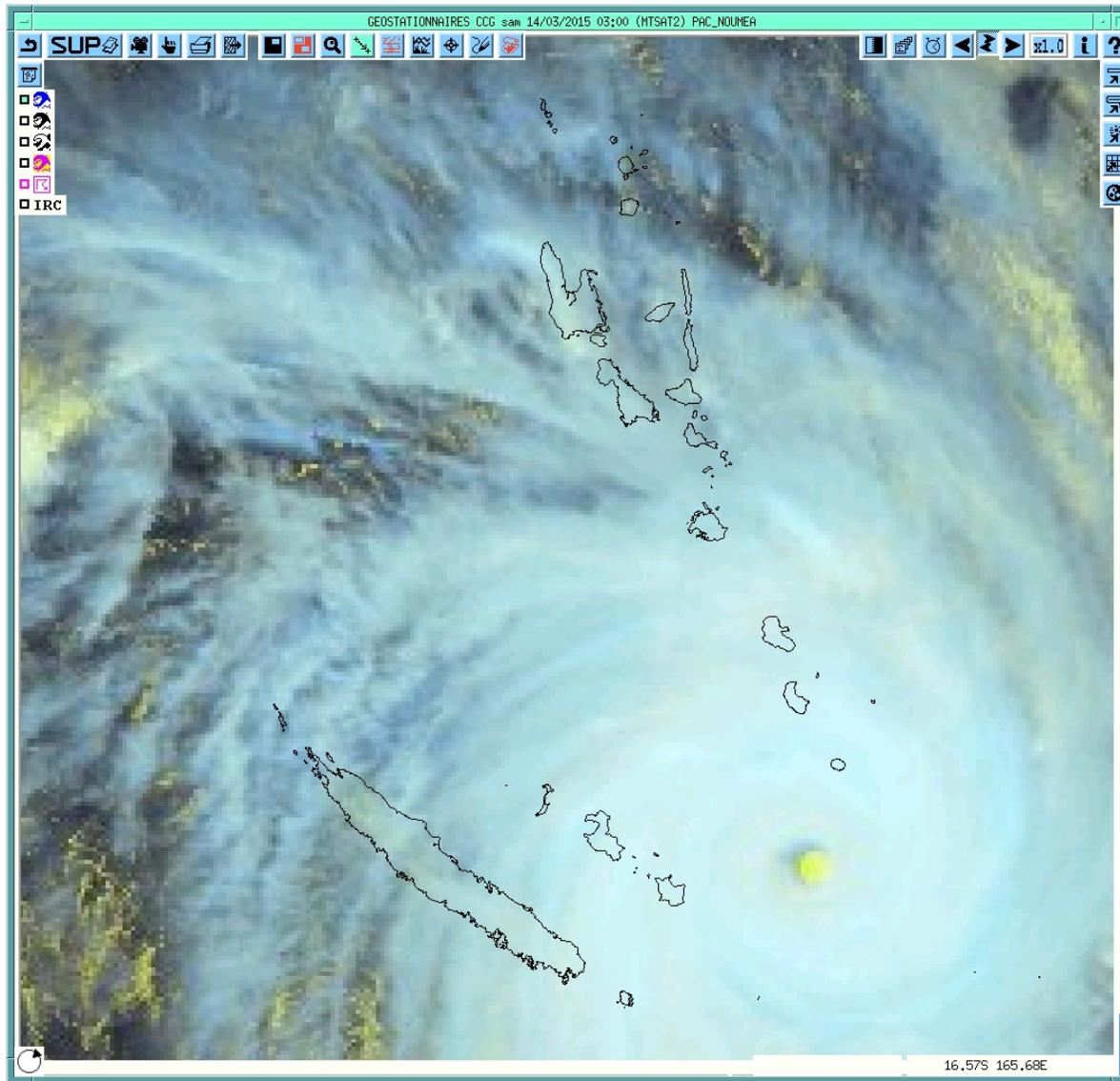
Fig 3 - Côte avec eaux peu profondes  
fortes surcotes

Cas de la Nouvelle-Calédonie

## Les risques en NC : facteurs aggravants

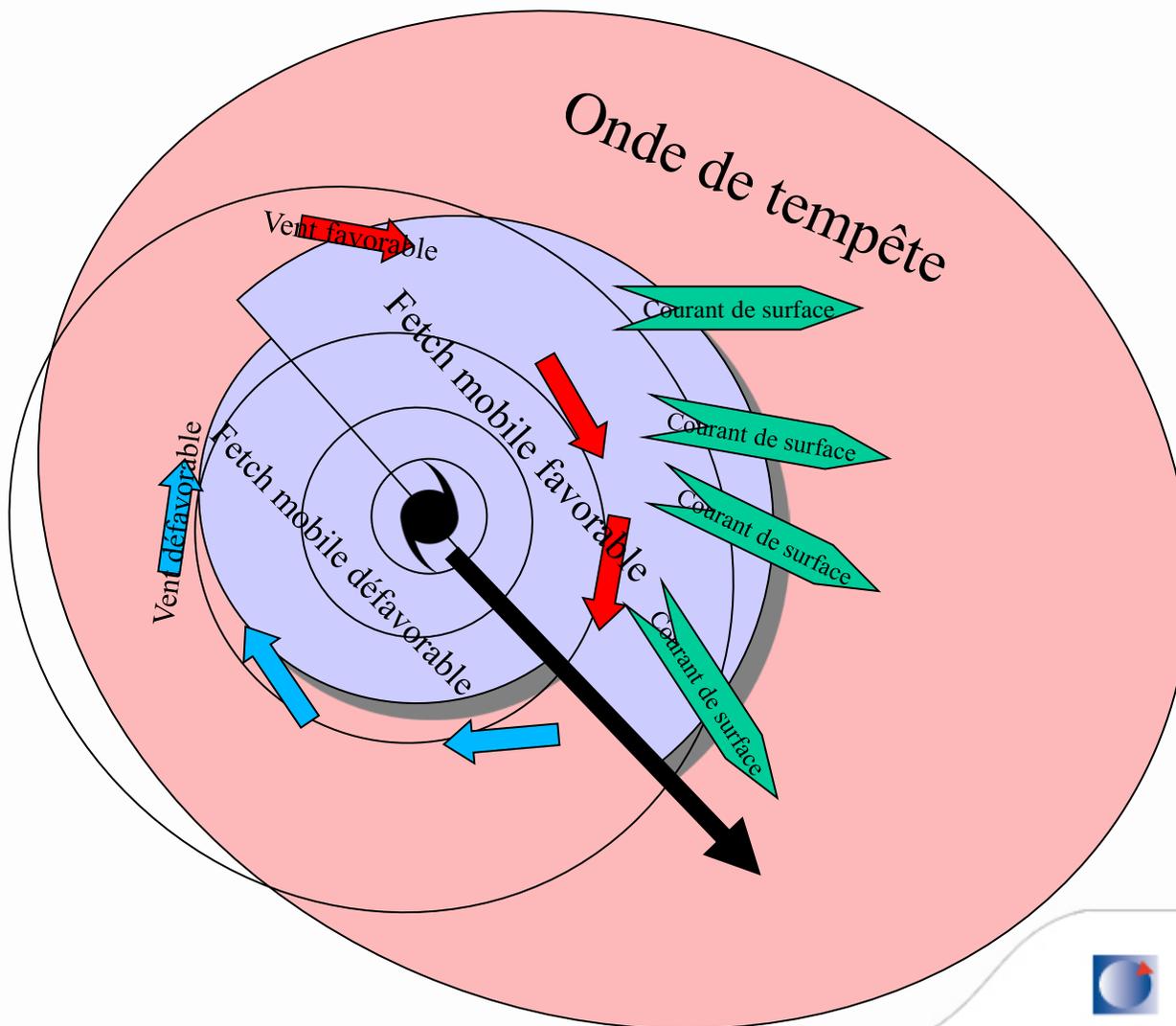
- **Phénomènes cycloniques de forte intensité**, pouvant déclencher des marées de tempête fortes et de violentes vagues (PAM).
- **Latitude de la Nouvelle-Calédonie** : Le pays se trouve aux latitudes où les cyclones tropicaux ont tendance à accélérer leur déplacement vers les latitudes tempérées. L'augmentation de la vitesse de déplacement d'un cyclone aggrave l'état de la mer dans le demi-cercle dangereux du cyclone.
- Les vagues gardent toute leur énergie car il n'y a **pas de plateau continental**. Houles et Mer du vent arrivent aux récifs et aux côtes exposées sans perte d'énergie en raison des eaux profondes autour.

# Cyclone PAM mars 2015 : étude de cas



## Rappel : Onde de marée de tempête en Hsud

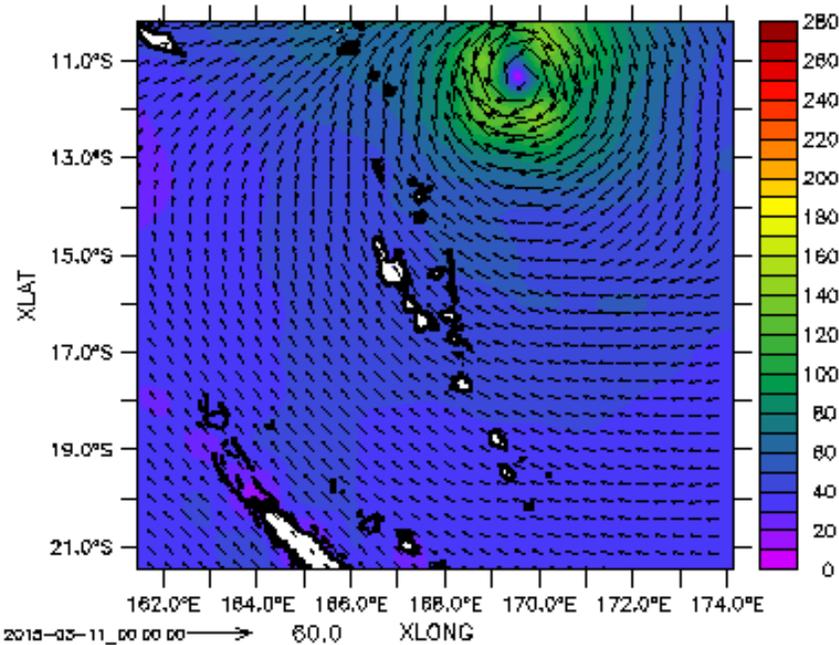
L'onde de marée de tempête n'est pas symétrique et uniforme dans un cyclone tropical.



# Cyclone PAM

REFNET Ver 6.85  
 HWAY/PNEL TMAP  
 23-MAR-2019 13:15:10

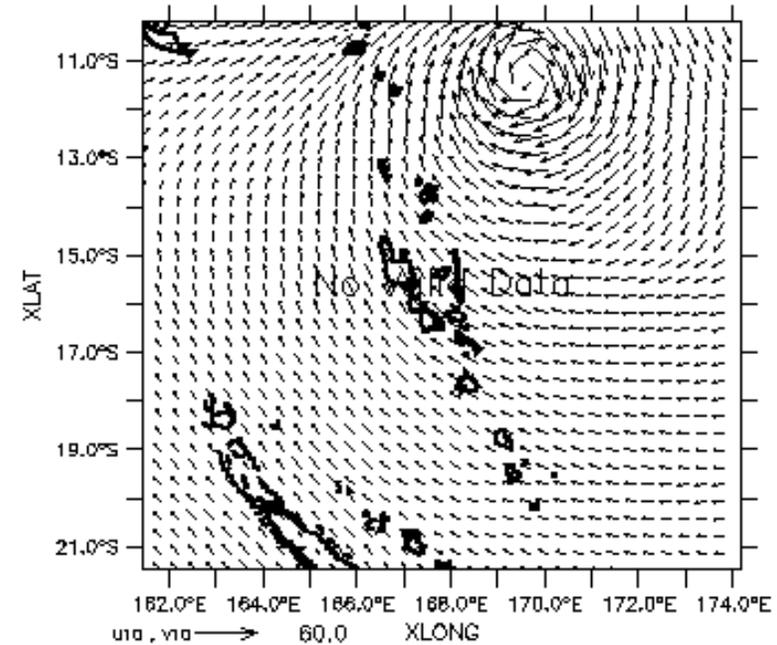
T : 1  
 DATA SET: d02  
 OUTPUT FROM WRF V3.5.1 MODEL



$$(U10 \sim 2 + V10 \sim 2) \sim 0.5 * 3.6 * (1 - \text{LANDMASK})$$

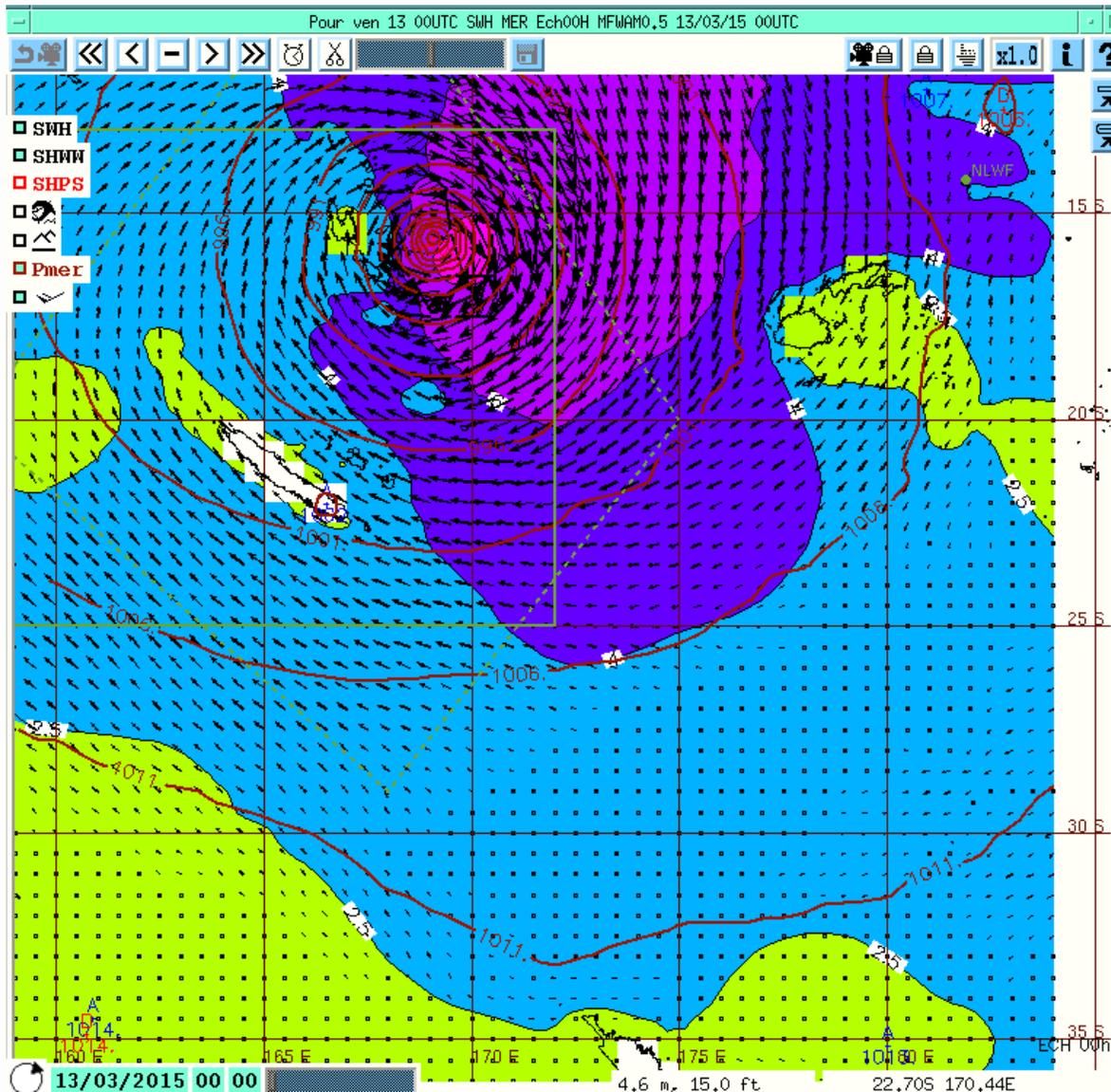
REFNET Ver 6.85  
 HWAY/PNEL TMAP  
 23-MAR-2019 13:15:10

T : 1  
 DATA SET: d02  
 OUTPUT FROM WRF V3.5.1 MODEL



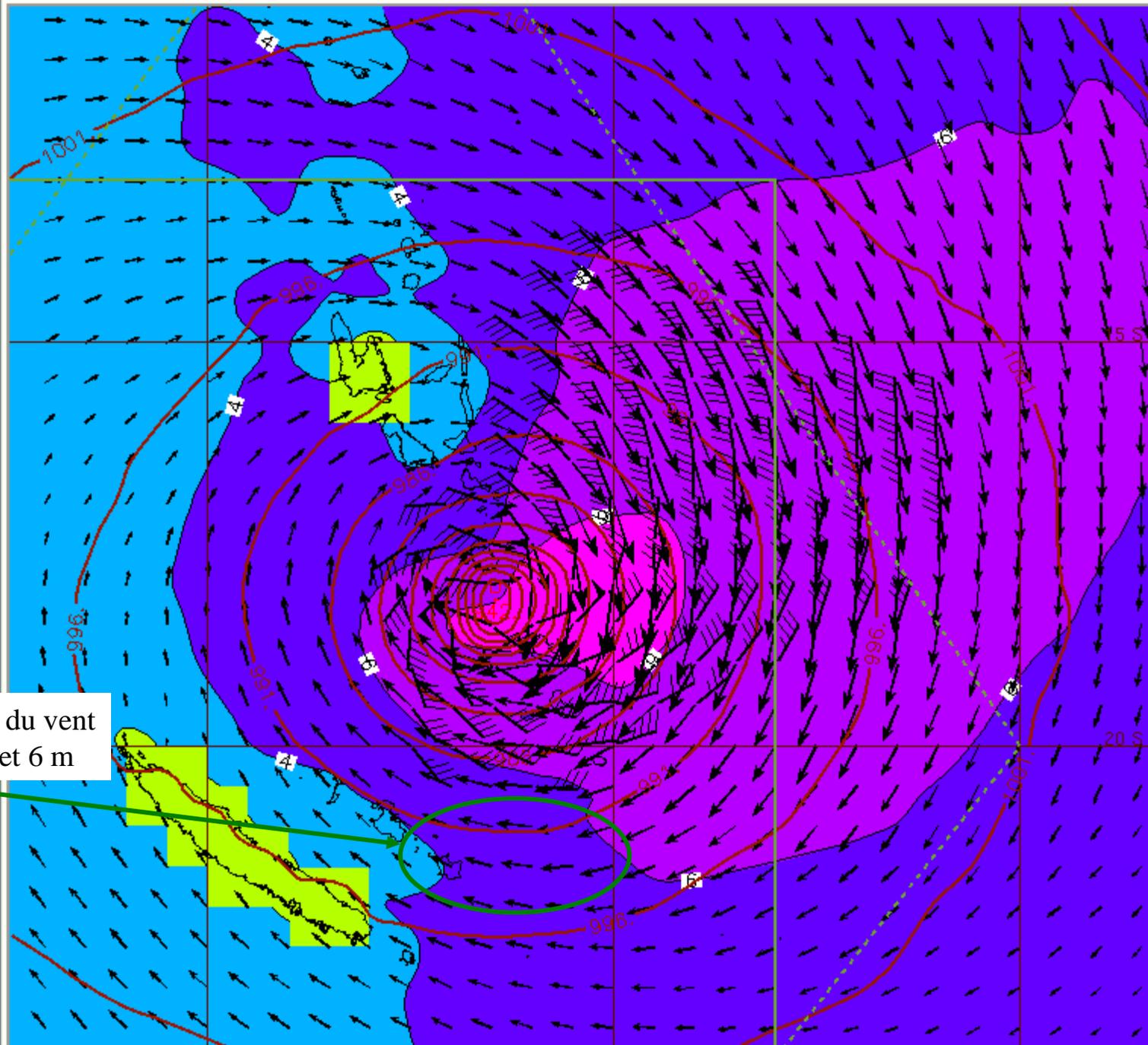
$$\text{RAINNC}[L=@DDC] * 3.6 * (1 - \text{LANDMASK})$$

# Animation PAM - Mars 2015



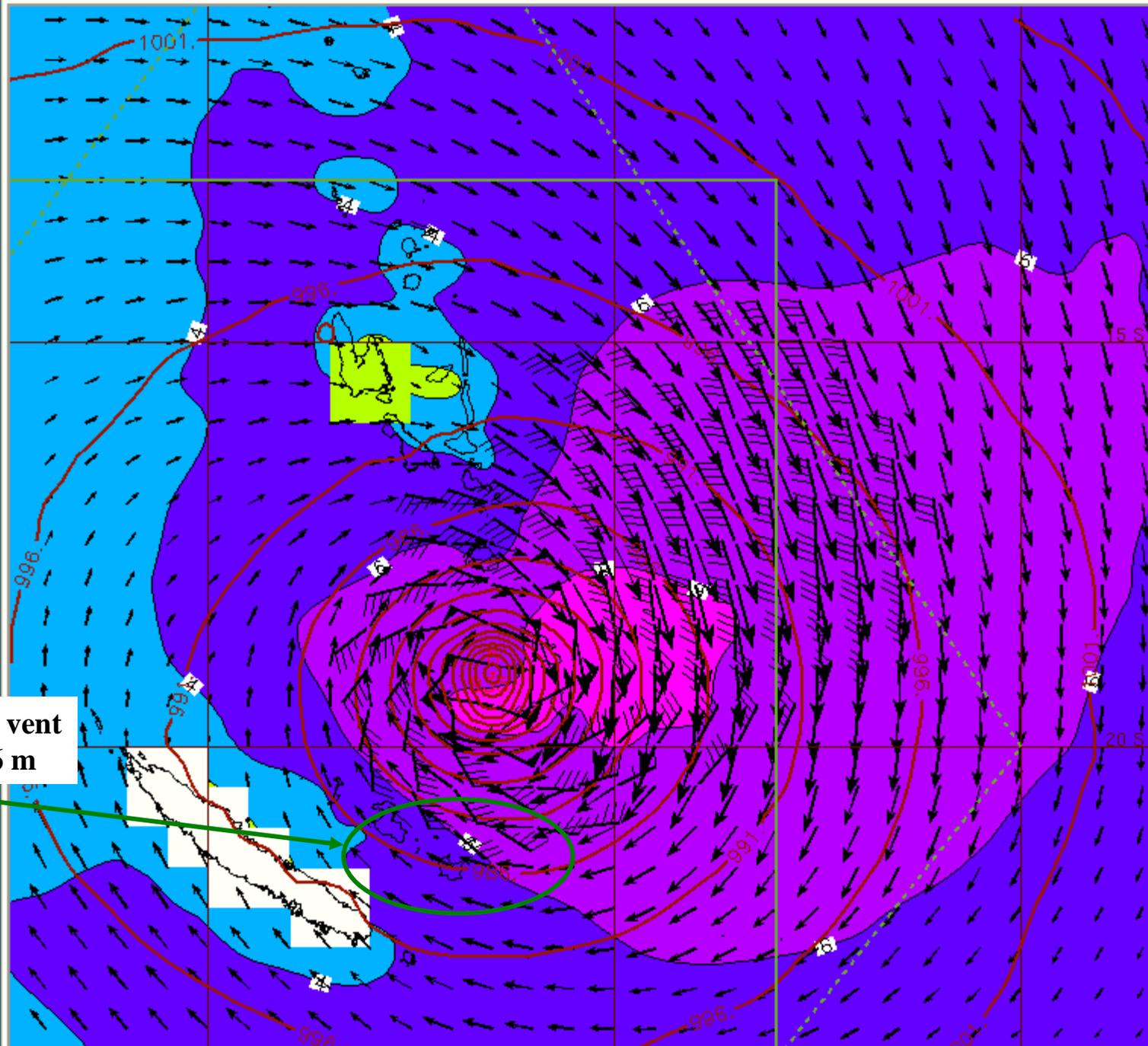
L'étendue de l'onde tempête s'agrandit avec le renforcement du vent mais aussi avec l'accélération du déplacement de PAM vers le sud, et du fetch mobile favorable. Les courants de surface renforcent l'onde à gauche du cyclone. Le risque de surcôte provoquée par la marée de tempête est largement plus important à gauche du cyclone.

# Cyclone PAM : vendredi 13 à 23h.



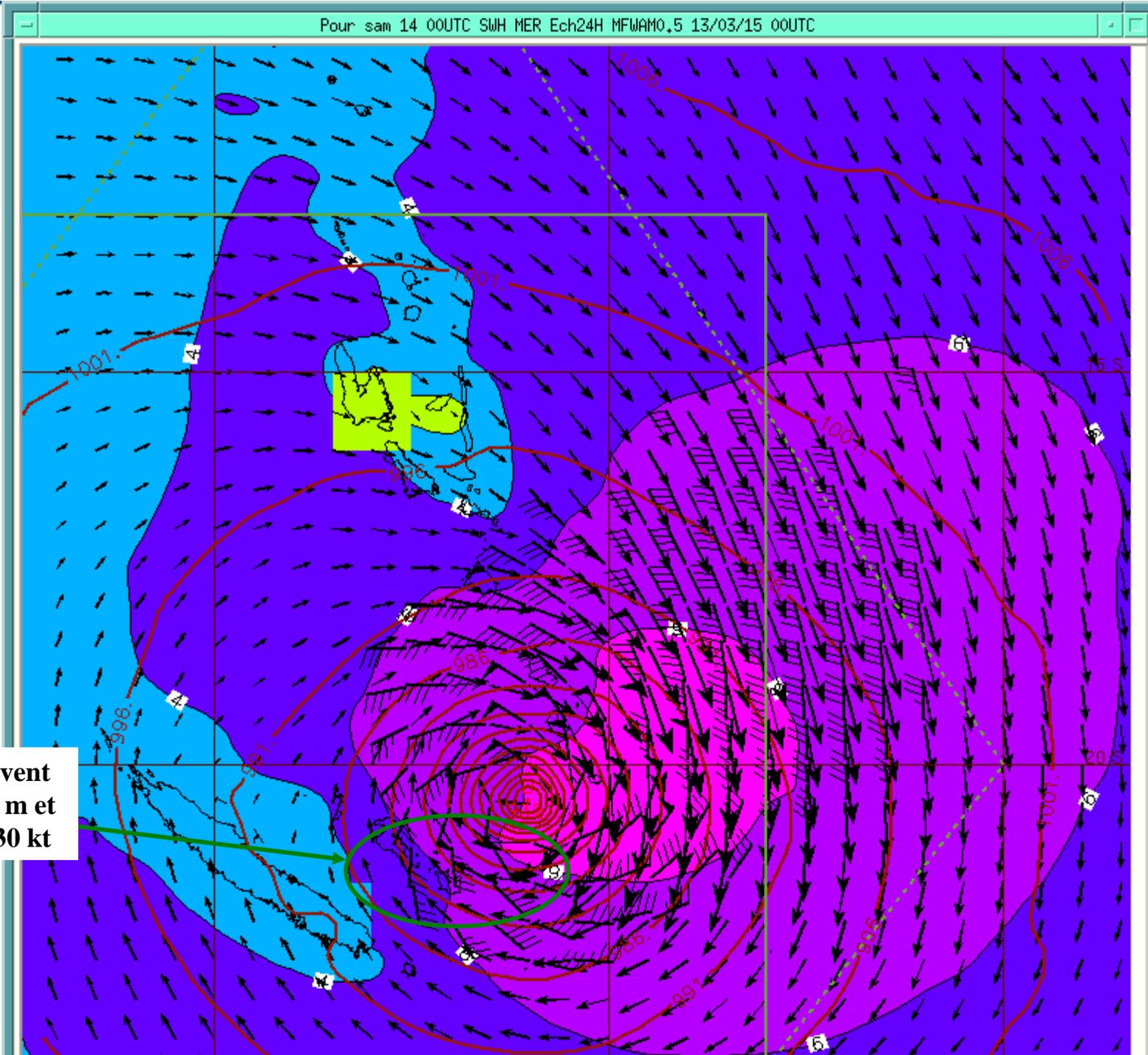
Forte houle et mer du vent  
Mer totale entre 4 et 6 m

Cyclone  
PAM :  
Samedi 14  
à 08h.



**Forte houle et mer du vent**  
**Mer totale entre 4 et 6 m**

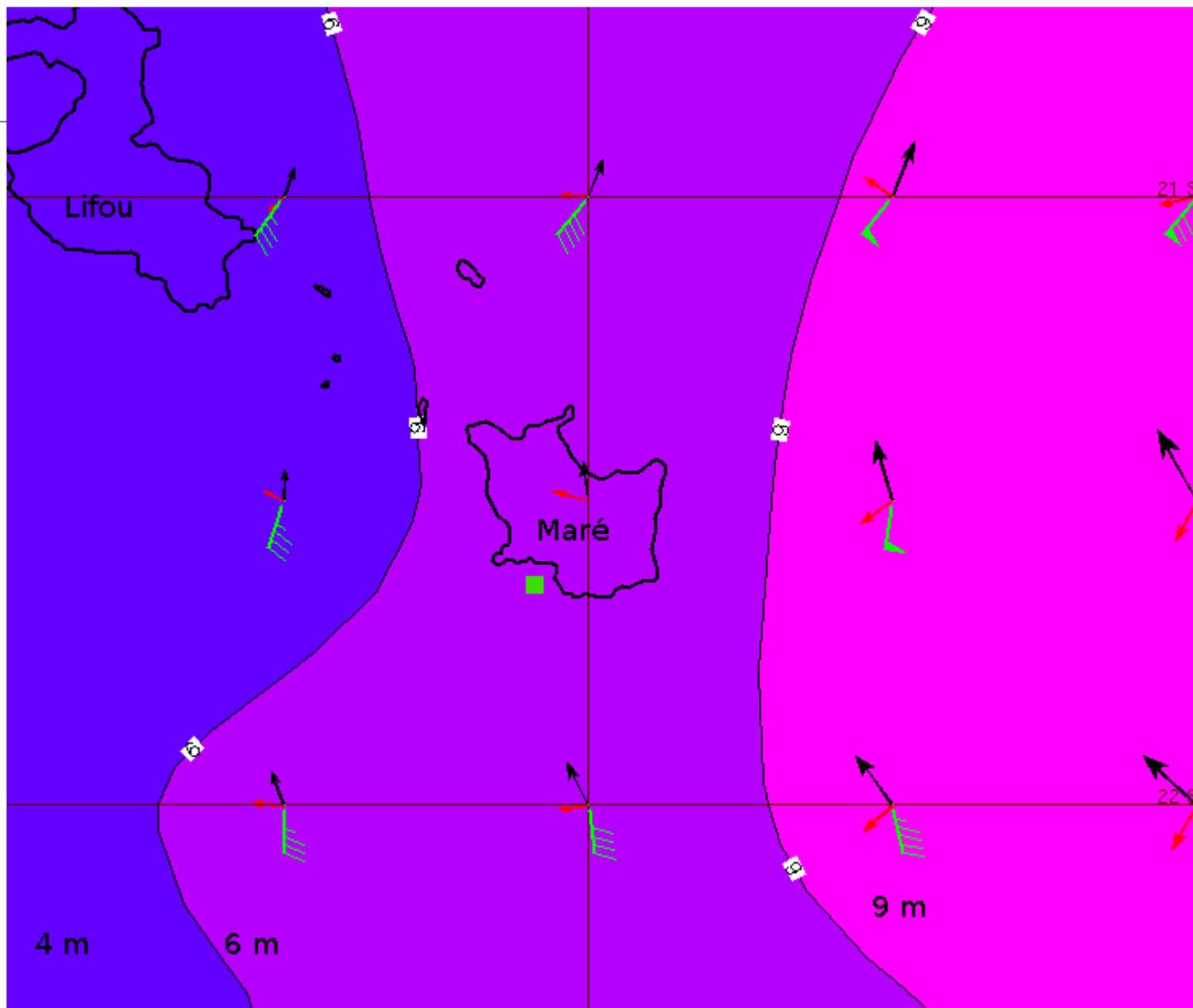
# Cyclone PAM : Samedi 14 à 11h.



**Forte houle et mer du vent  
Mer totale entre 6 et 7 m et  
Vent de secteur Sud >30 kt**

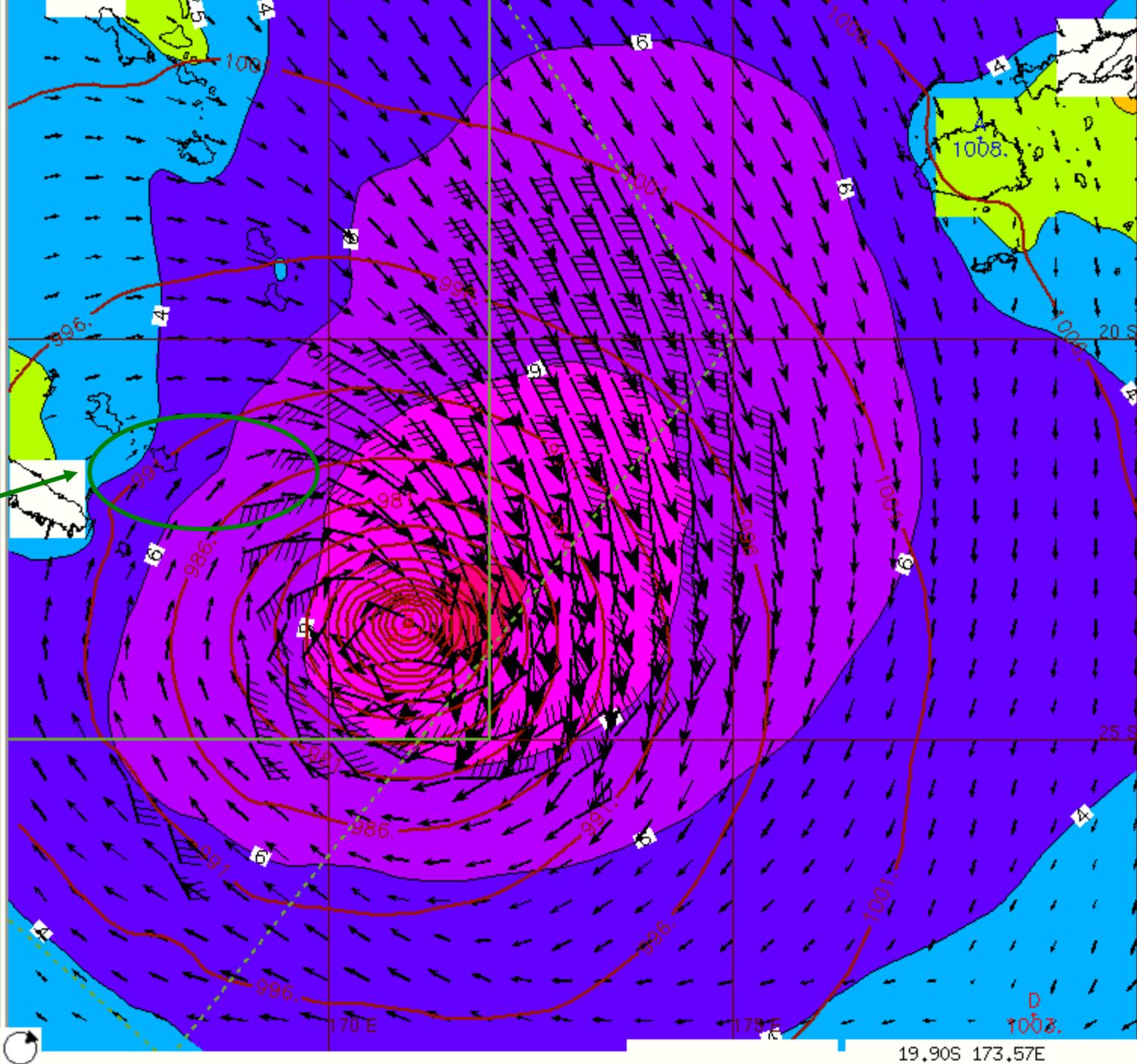
Cyclone  
PAM :  
Samedi 14  
à 17h sur Maré.

Passage de l'onde tempête  
Mer totale entre 6 et 9m.  
Houle d'Est entre 4 et 5m.  
Mer du vent de 3 à 4 m.  
Vent SSE 35/40 Kt



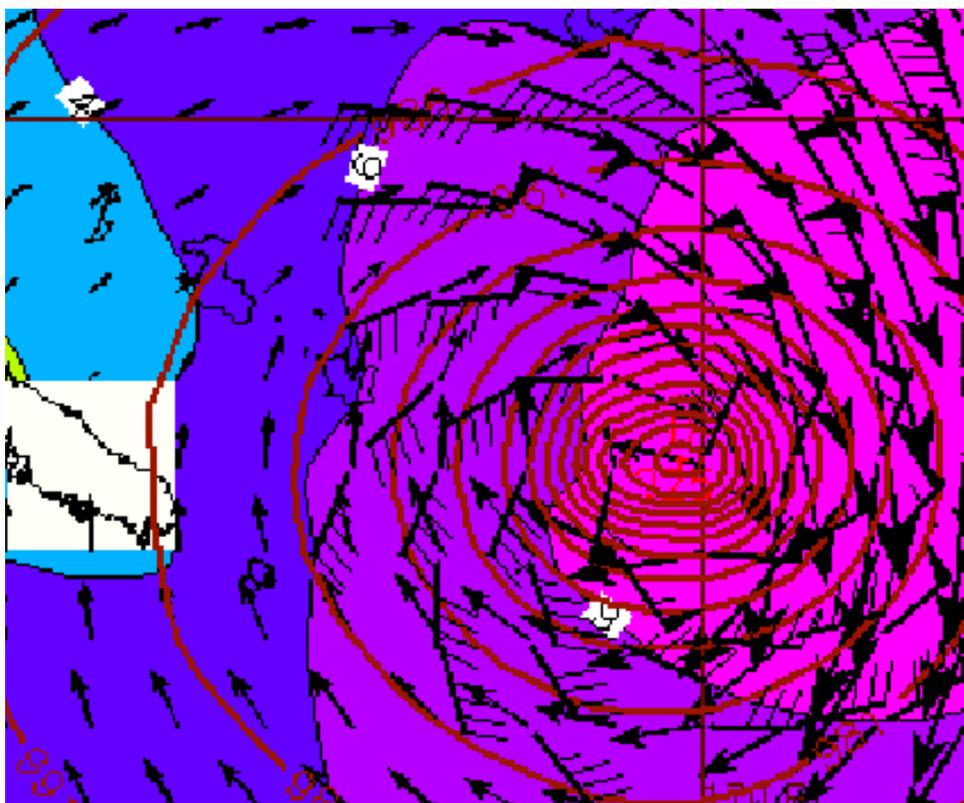
# Cyclone PAM : Samedi 14 à 23h.

Mer totale en baisse entre  
4 et 6 m  
Vent <30 Kt et en reflux.  
L'onde tempête s'éloigne



## Nouvelle Calédonie et Loyauté pendant PAM

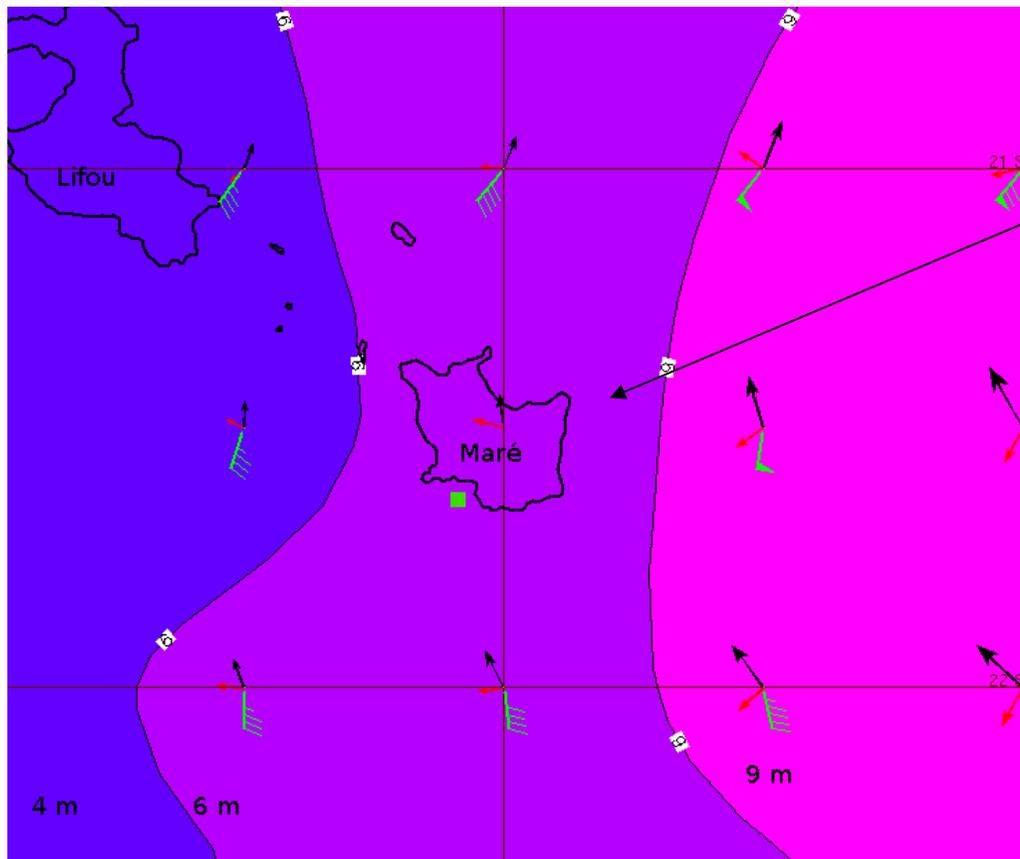
- Le pays se trouvait à droite du système, dans la moitié dite « maniable ».
- Le fetch mobile associé n'est pas le plus favorable à la résonance des vagues et de la houle, ni à l'onde de tempête (vent de Sud à Sud-Ouest, opposé à la propagation de l'onde de tempête).
- Les vents (Sud-Ouest : reflux sous le vent) ne sont pas favorable à la surcôte sur les cotes est. En revanche, les côtes Sud sont exposées à des vents d'afflux (Sud-Ouest).



- Cela signifie que les côtes est ne pouvaient être exposées qu'à une surcôte due à la baisse de pression.

## Cas des côtes orientées est, exemple de Maré. Samedi 14 mars à 17h, au maximum de l'onde de tempête

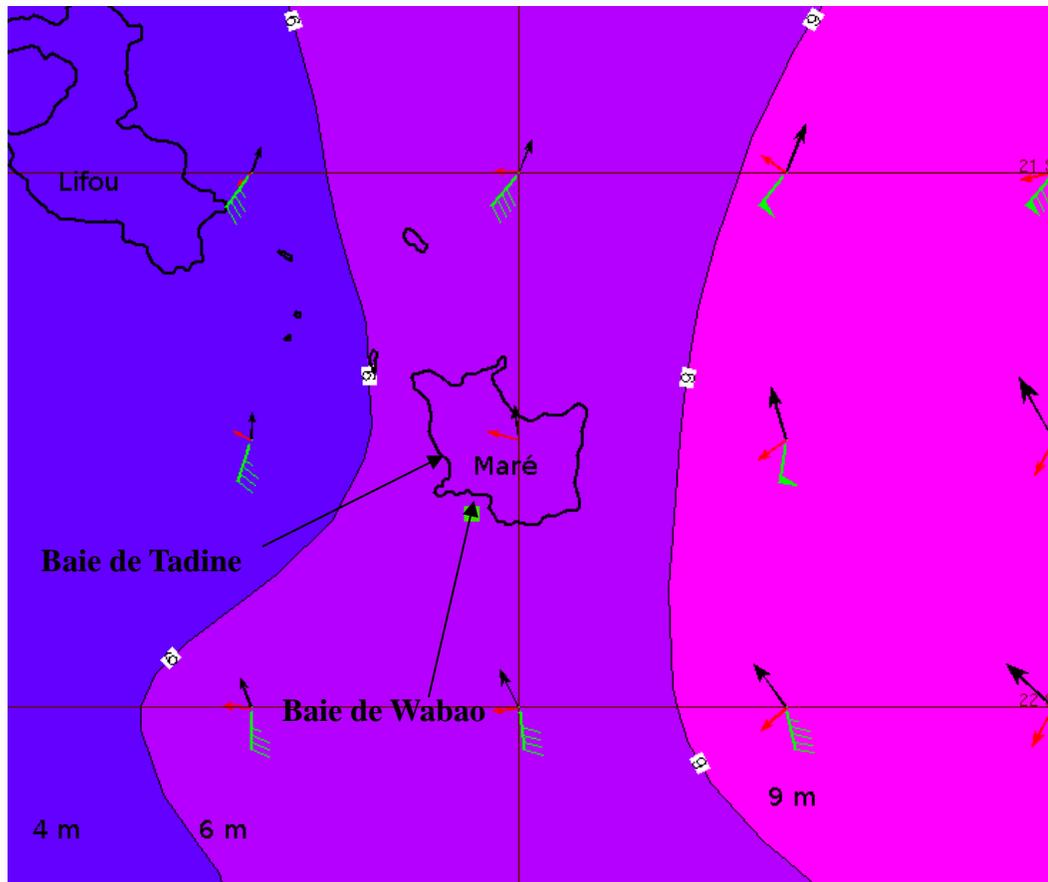
- Maré est l'île la plus proche, à l'ouest de la trajectoire du cyclone (côté droit, demi-cercle maniable, fetch non favorable).
- Même avec une onde de tempête limitée, l'état de la mer totale est très important, et les côtes est sont exposées à une forte houle d'Est de 4 à 5 m à 13s de période.



- L'effet des vagues (run up) a été significatif particulièrement sur les zones où le récif est près du littoral.
- L'élévation du niveau de la mer due à la baisse de pression et surtout aux vagues (houles) a provoqué quelques inondations sur la route de Kurine sur le sud-est de Maré (7m au dessus du niveau moyen de la mer).

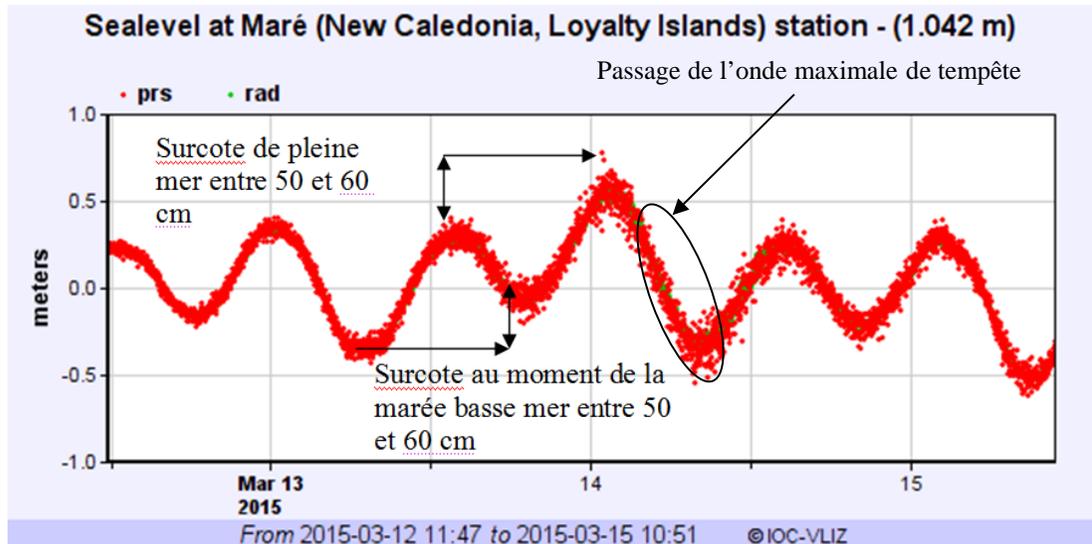
## Cas des côtes orientées Sud, exemple de Maré. Samedi 14 mars à 17h, au maximum de l'onde de tempête

- La côte sud et sud-est était exposé à une mer du vent de 4 m environ avec un vent d'afflux de Sud-Ouest de 35/40 Kt (>30 Kt) en moyen avec fortes rafales.
- La houle d'Est est diffractée et affaiblie mais restent importante dans la baie de Wabao.



- L'effet des vagues (run up) a été significatif particulièrement dans la baie de Wabao.
- Il faut probablement rajouter un peu d'accumulation et de piégeage avec les vents d'afflux au fond de la baie de Wabao.
- L'élévation du niveau de la mer dû à la pression, au vent d'afflux de Sud à Sud-Ouest et de l'effet des vagues a provoqué l'inondation de la route de baie de Wabao dans le sud de Maré (4 m au dessus du niveau moyen de la mer et à 32 m de distance du niveau de marée haute). Les plus grosses vagues ont pu franchir également les digues du port de Tadine.

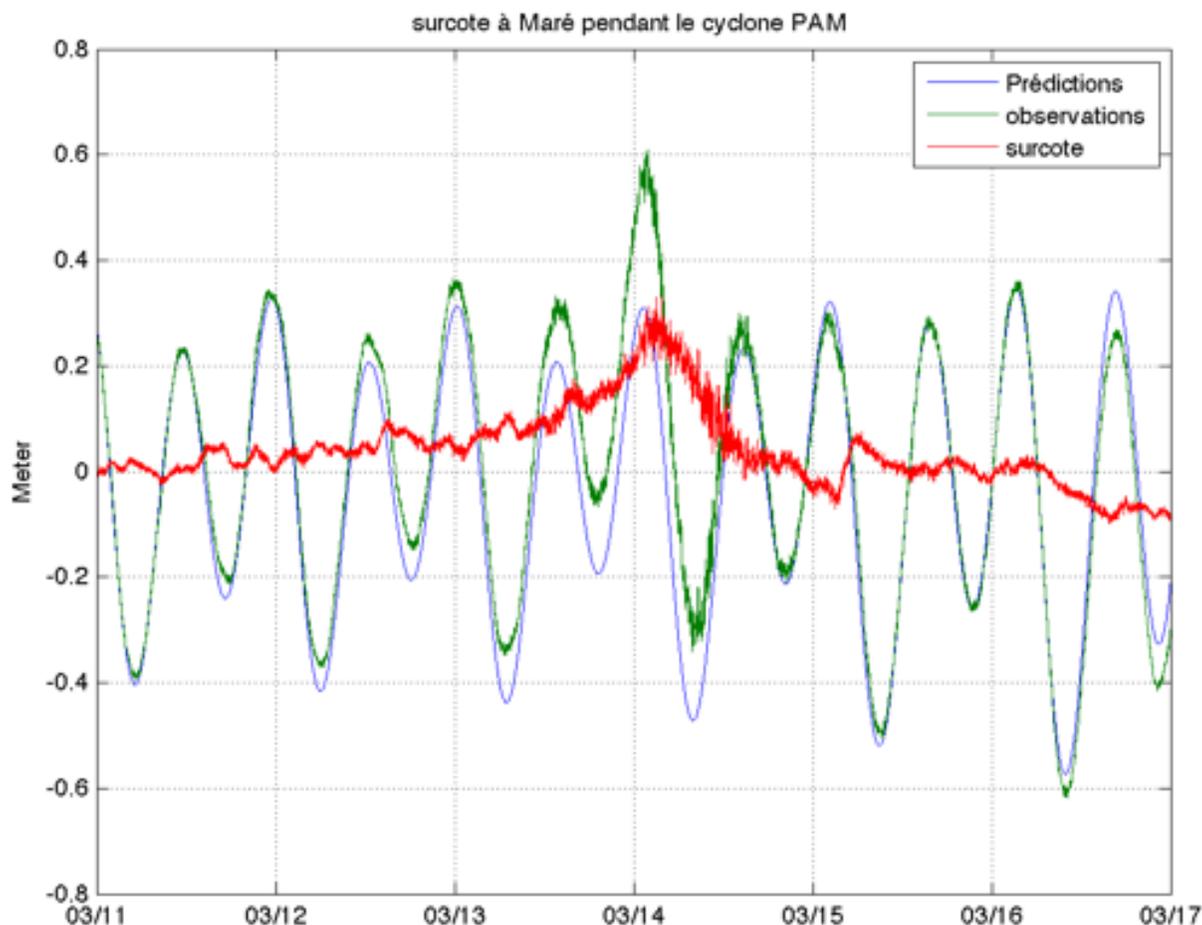
# Et la marée ? Marégraphe à Tadine du SHOM. Graphe du Sea Level Monitoring en H UTC



Niveau de la mer mesuré par le marégraphe de Maré entre le 13 et le 15 mars. Source : SHOM – IOC/UNESCO. Source : <http://www.ioc-sealevelmonitoring.org>

- Confirmation d'une surcôte au moment de la marée haute vers 12h le 14 avant le passage du plus fort de l'onde de tempête (vers 17h). Hauteur maximale instantanée probable de 50 à 60 cm par endroit avec les fortes vagues.
- Passage de l'onde maximale (pression+vagues les plus fortes+vent d'afflux) l'après-midi et soirée du 14, au moment de la marée astronomique descendante.
- Fort bruit dans les données brutes, significatif de fortes vagues.

## Surcôte Pam calculée par l'IRD à Maré



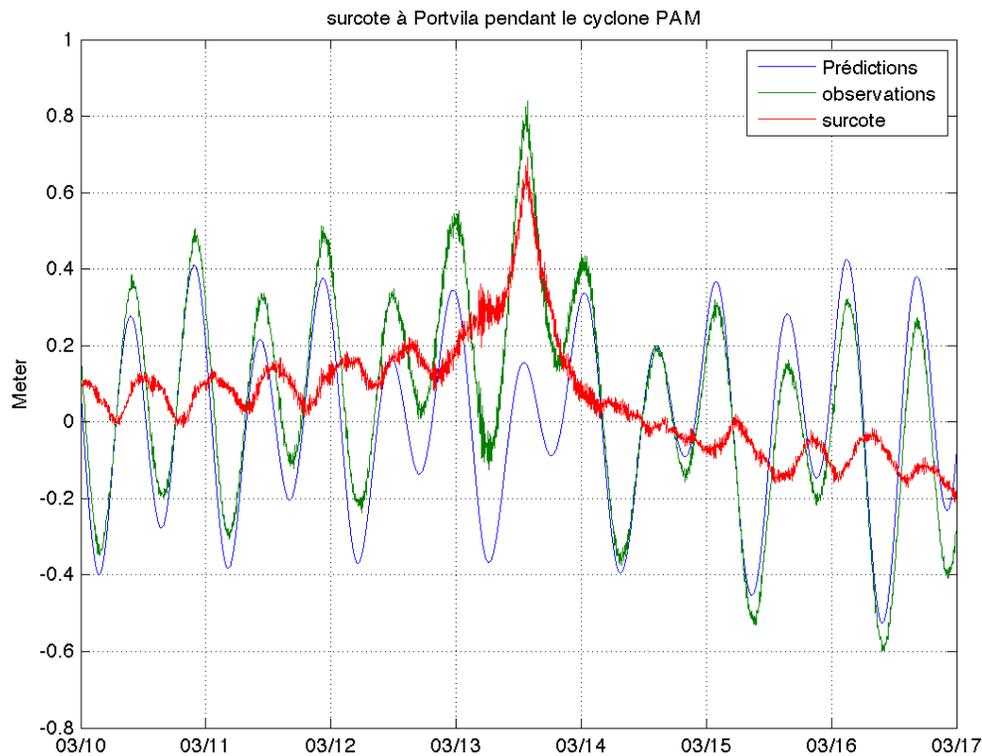
- Surcôte moyenne de 30 cm à l'heure de pleine mer vers 12h.
- Forte variabilité de la surcôte instantanée l'après midi au passage du max de l'onde de tempête due aux vagues.

## Conclusion pour PAM

- Il y a bien eu une surcôte significative à Maré au moment de la pleine mer (vers 12h), en moyenne de 30 cm selon le marégraphe de Tadine et les études menées ensuite par l'IRD.
- Cette surcôte a eu lieu avant l'arrivée du plus fort de l'onde de tempête.
- L'onde de tempête (pression, mer du vent+houle) et les vents d'afflux les plus forts pour la côte sud (SSW>30 Kt) ont atteint la zone géographique de l'île au cours de l'après-midi du samedi 14, au moment où la marée redescendait. La marée a donc limité les submersions marines, malgré un fort effet des vagues.
- Les vagues de la mer du vent et de la houle sont certainement la cause des inondations dans la baie de Wabao et dans la zone de Kurine.
- Il n'y a pas eu de conjonction Marée Pleine Mer+Onde de tempête. Cela signifie que les submersions auraient pu être plus graves en cas de conjonction parfaite.

# Surcôte à Port Vila

- Port Vila a été touché par une surcôte de 80 cm. La conjonction parfaite marée astronomique+onde de tempête n'a pas eu lieu. L'onde est passée avant la pleine mer (en marée montante). Malgré tout, les submersions ont été importantes et les dégâts considérables.



Dans les 2 cas (Maré et Port Vila), de quel genre de submersion s'agit-il ?

- **Submersion par franchissement (effet des vagues très fort)**



## Modèle de prévision ? Outil ? Observations ?

---

- Pas de modèle de surcôte opérationnel à Météo France NC actuellement.
- Modèle de surcôte de la Réunion sur demande en secours, lancé en application web depuis la DIRNC.
- Pas de bouée météorologique pour mesurer la hauteur des vagues ou le niveau marin.
- 6 marégraphes (Nouméa, Thio, Hienghene, Ouinné, Wé, Tadine).

## Zones à risque de submersion marine en Nlle Calédonie

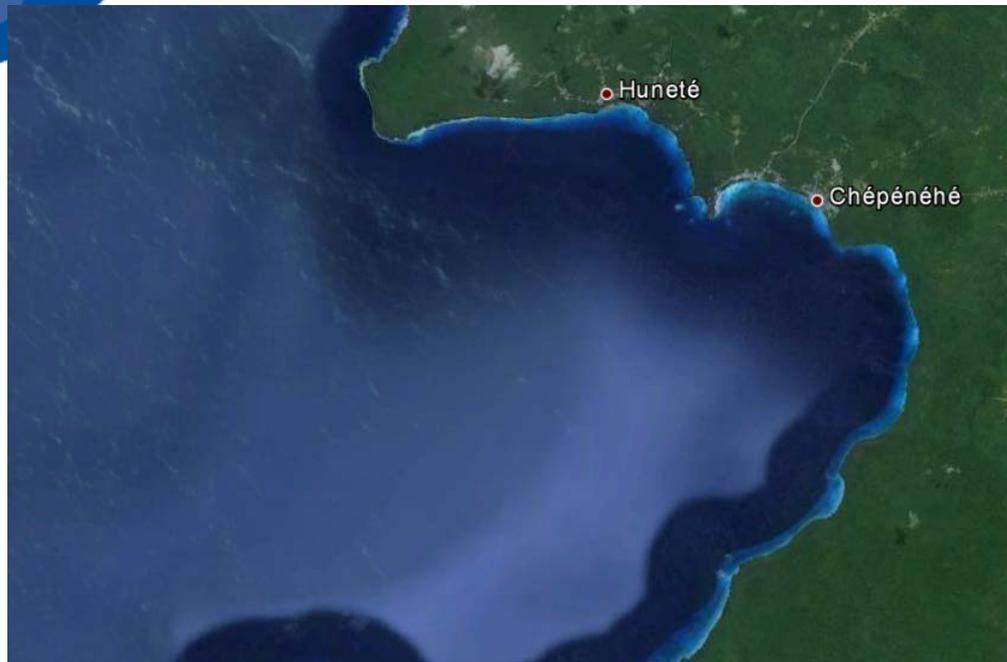


- **Ouvéa**

Terre basse, lagon peu profond : risque d'ensachage important. Enjeux (route et habitation près de l'eau).

Exposition aux marées de tempête.

Pas d'exposition aux houles du Sud (protégé par la Grande-Terre, signal diffracté).

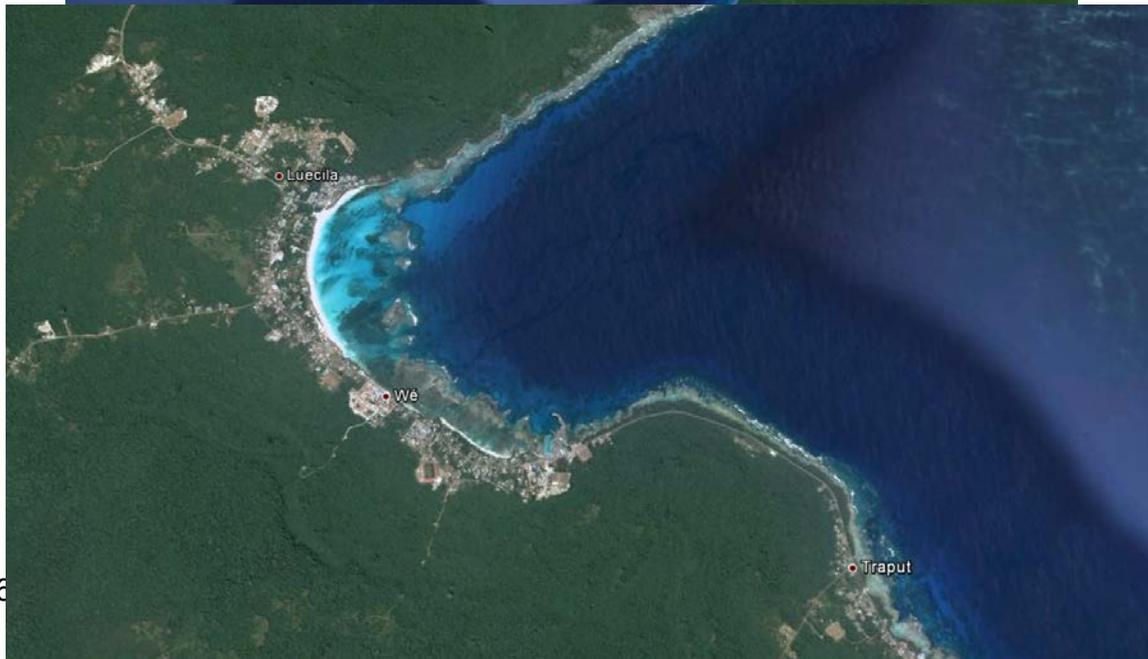


- **Lifou**

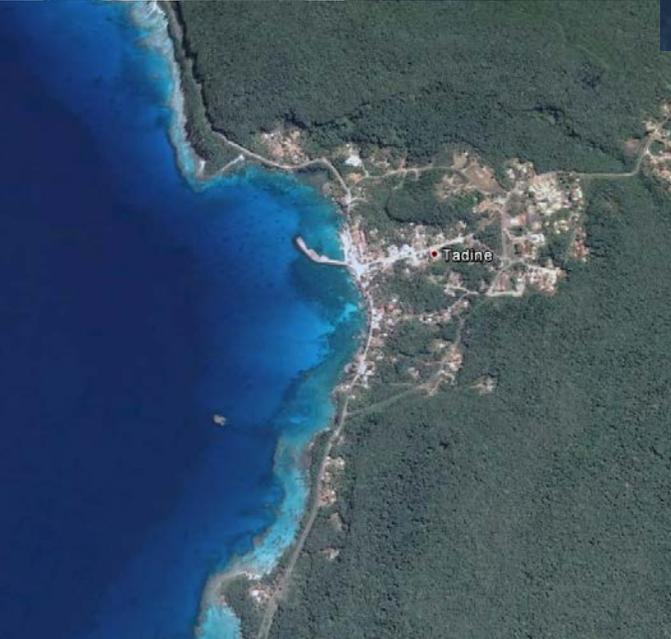
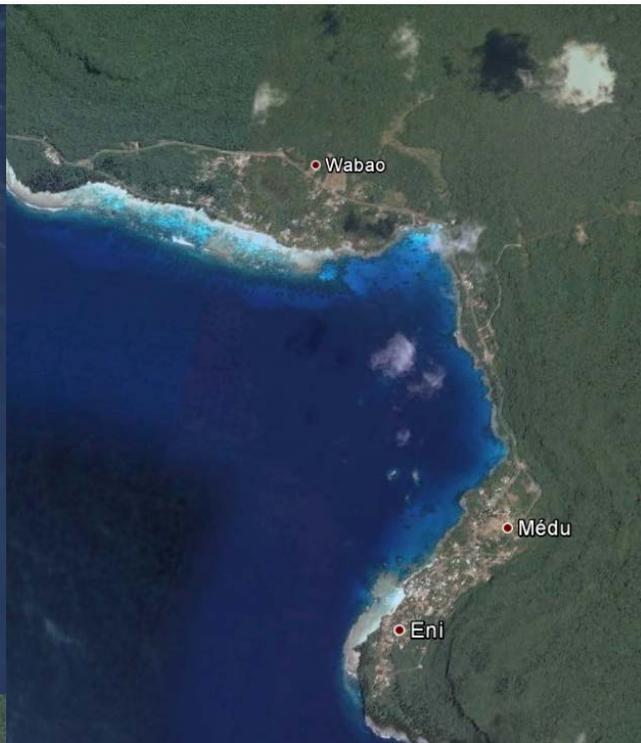
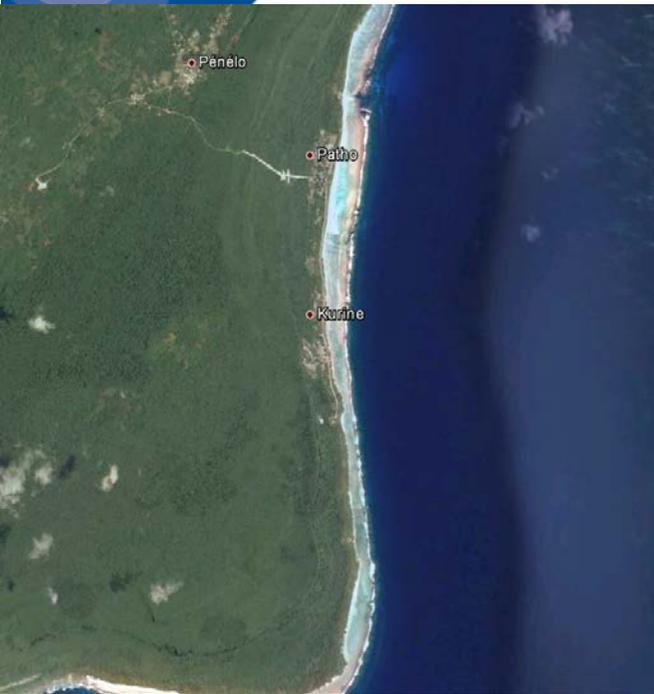
Baies de Chépénéhé et Wé.  
Pas ou peu de récifs. Enjeux bas et très proches de la mer (habitations, routes).

Exposition aux marées de tempête.

Pas d'exposition aux houles du Sud (protégé par la Grande-Terre, signal diffracté).



# Zones à risques de submersion marine en Nlle Calédonie



- **Maré**

Baies de Wabao et Tadine.  
Pas ou peu de récifs. Enjeux bas et très proches de la mer (habitations, routes).

Zones Kurine et Patho. Récifs très proches. Enjeux bas et très proches de la mer (route, habitations sous le niveau de la route de l'autre côté).

Exposition aux marées de tempête.

Exposition aux houles du Sud au sud de l'île ( 1 cas de submersion observé à Wabao le 21 juin 2013)

## Zones à risque de submersion marine en Nlle Calédonie



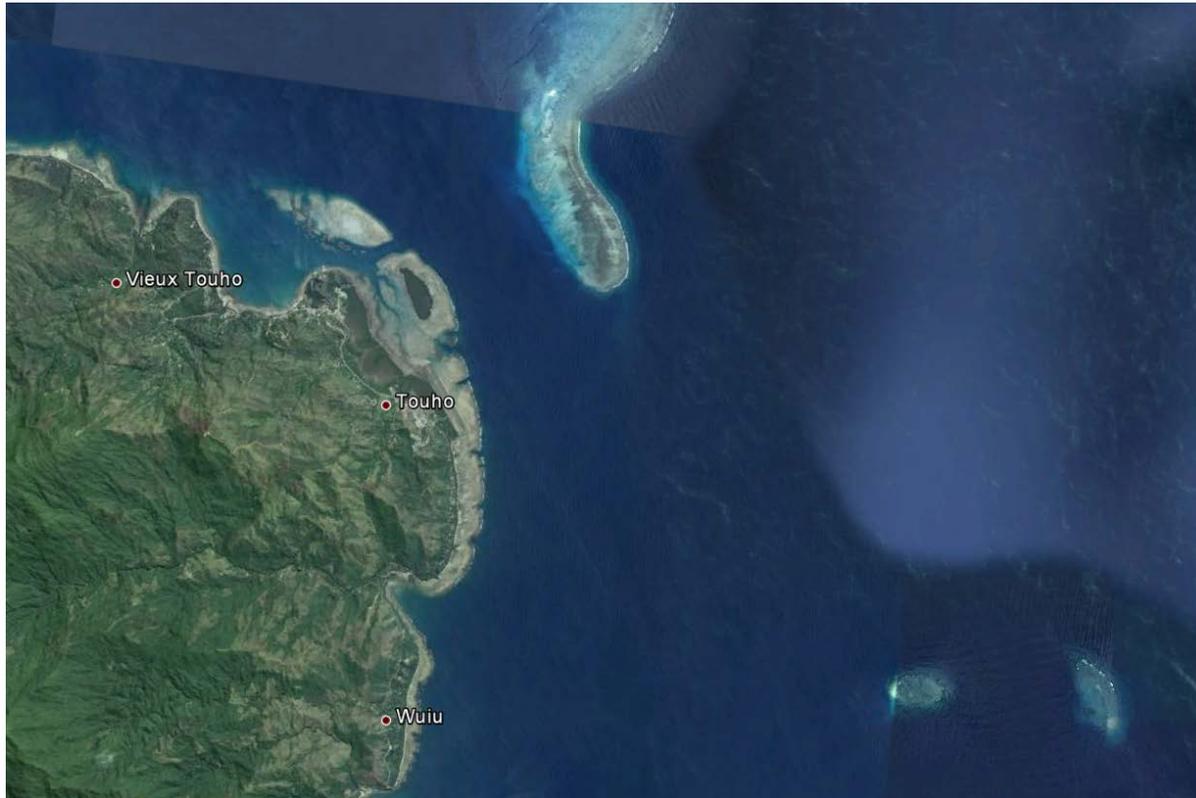
- Ile des Pins

Baies de Kuto et Vao :  
Enjeux bas et très proches  
de la mer (habitations,  
routes). Risque de piégeage  
et d'ensachage .

Exposition aux marées de  
tempête.

Exposition aux houles du Sud  
au sud de l'île

## Zones à risque de submersion marine en Nlle Calédonie

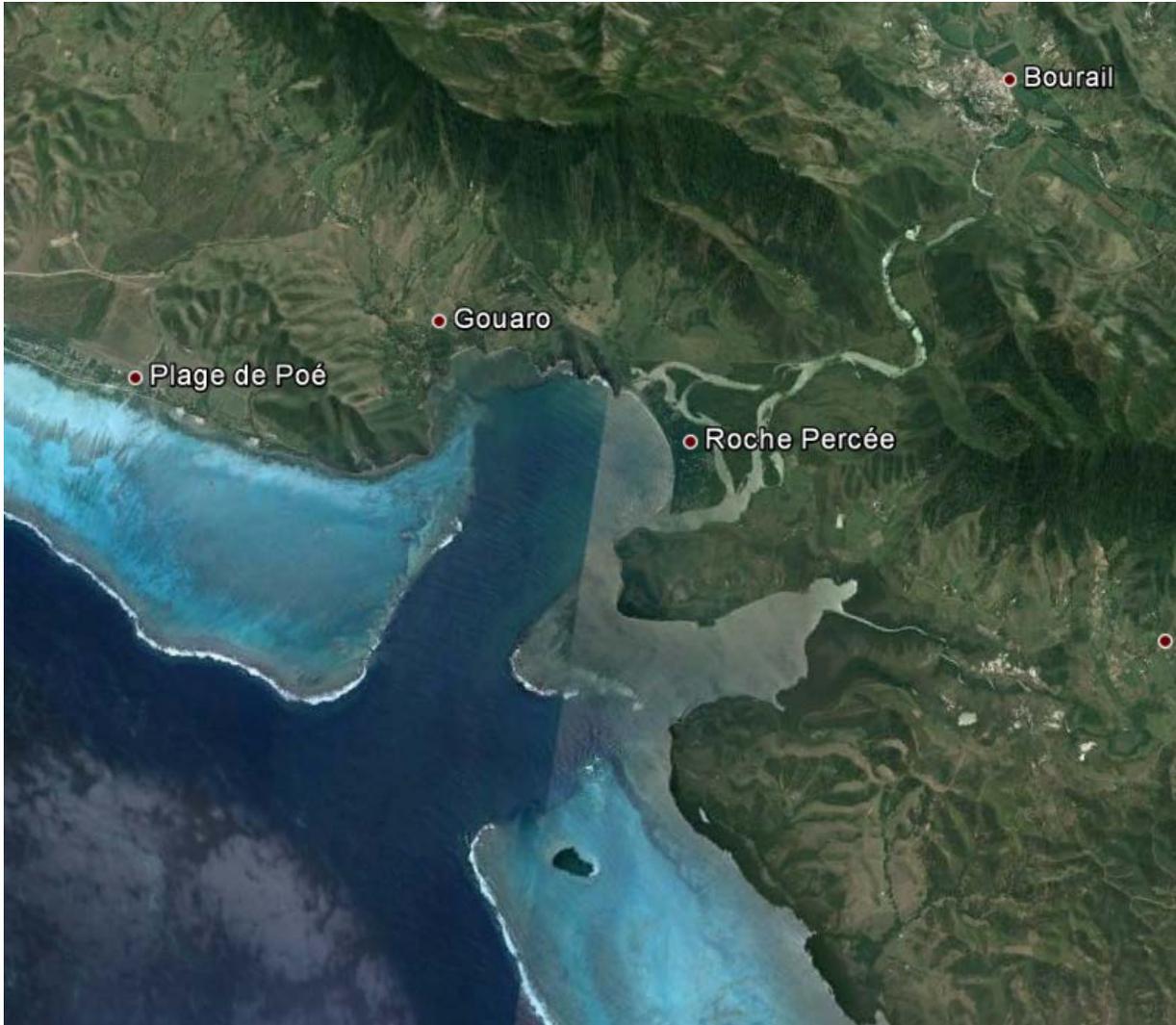


- Côte Est

Touho :

Pas ou peu de récifs. Enjeux bas et très proches de la mer (habitations, routes, aéroports).

Exposition aux marées de tempête.



- **Côte Ouest**

Roche percée :

Pas de récif. Risque de piégeage, et de débordement par la Nera en cas de concomitance de fortes pluies. Enjeux bas et très proches de la mer (routes, habitations sous le niveau de la route).

Exposition aux marées de tempête et houles de Sud.

## Submersion en Nouvelle-Calédonie

---

La nécessité d'avoir un modèle opérationnel de surcôte, des observations et des outils de calculs par zone (calculs croisés de surcôte et marée par zone ) en NC semble de plus en plus évidente. Au moins pour déterminer les zones à risque (grâce aux simulations).

## Perspectives en NC ?

---

- Modèle de vague WW3 côtier et de surcôte lagunaire de l'IRD, projet IRD/MF NC/DSCGR :

L'objectif est le développement d'une maquette de modélisation de très haute résolution à couplage bidirectionnel entre vagues et circulation côtière pour l'étude et la prévision des vagues en milieu lagunaire, les courants générés par la houle, les surcotes océaniques en Nouvelle Calédonie.

- Modèle de surcôte MF Hycom-OM. Maille de 1 km. Horizon 2018.  
Faiblesse : pas de maille assez fine pour modéliser la surcôte dans les lagons.
- Projet de houlographe dans la passe de Boulari. Projet IRD/MF.  
Pas d'horizon pour le moment par manque de financement.

An aerial photograph of a town, likely in a mountainous region, is shown from a high angle. The town is surrounded by green hills and is partially obscured by a thick layer of white clouds. Overlaid on the bottom half of the image is a white weather map with contour lines and arrows. The contour lines are labeled with values such as 1015, 1020, 1025, 1030, 1035, 1040, and 1045. The arrows indicate wind direction and speed. The background of the entire image is a dark blue gradient.

Merci de votre attention



**METEO FRANCE**  
Toujours un temps d'avance