

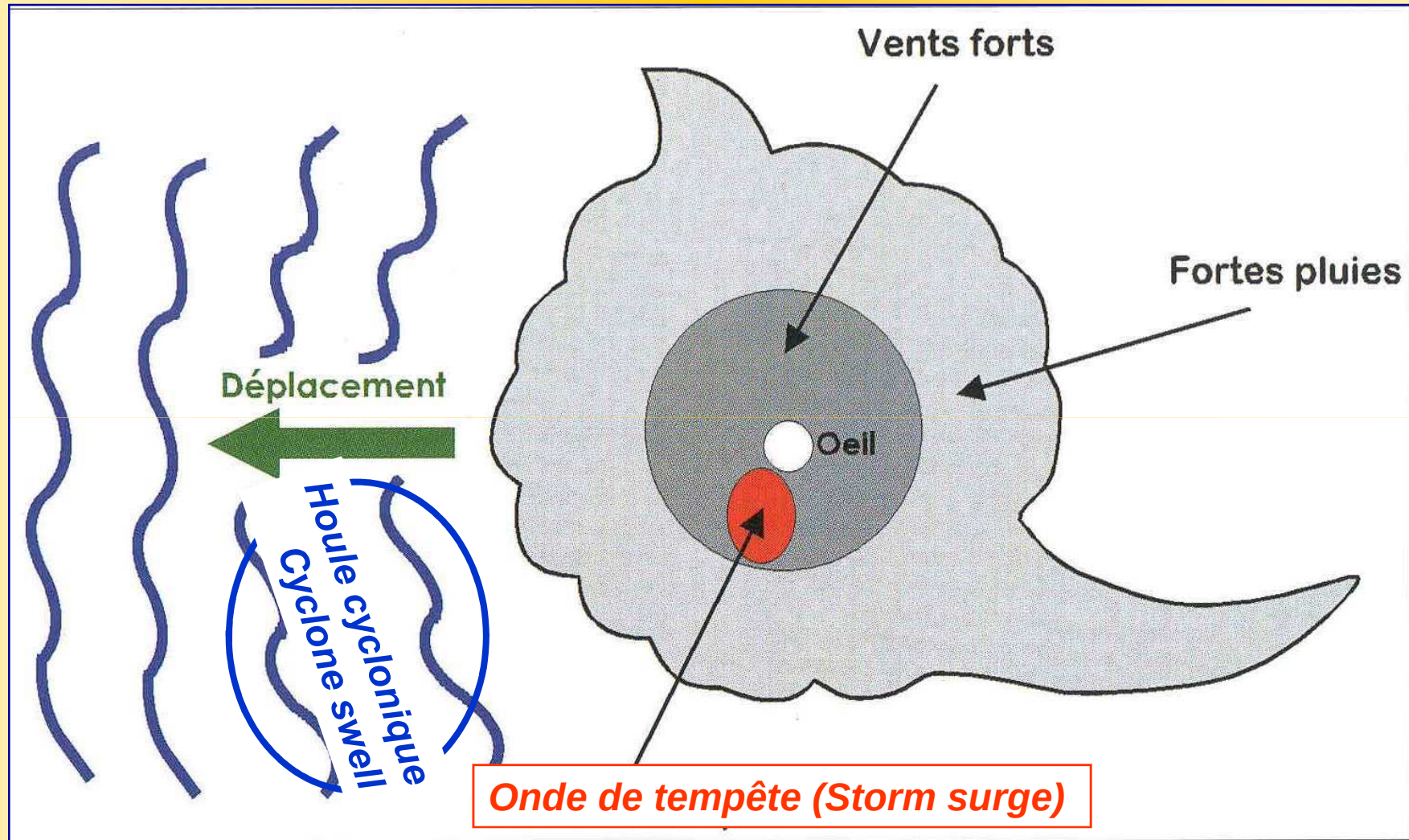
Houle cyclonique et Onde de tempête

VIth Training course on
tropical cyclones
WMO / METEO-France
28 oct. – 5 nov. 2013

Cyclone swell and Storm surge

A-C. FONTAN et H. QUETELARD/ Météo-France / DIR/RE/CYC

TC's dangers



Plan Général General Outline

- *Houle cyclonique* / Cyclonic swell
- *Onde de tempête* / Storm surge
- *Modélisation* / Modelisation

Houle cyclonique

Cyclone swell

Le cyclone Colina au Port en Janvier 1993

Houle cyclonique Cyclonic swell

- ***Généralités* / General ideas**
 - *Définitions* / Definitions
 - *Propagation* / Propagation
 - *Energie* / Energy
- ***Génération* / Generation**
 - *Mer du vent* / Wind waves
 - *Houle* / Swell
 - *Fetch, durée d'action* / *Fetch, Wind duration*
- ***Dissipation* / Dissipation**
- ***Houle cyclonique* / TC's swell**

General ideas - Parameters definitions

Une vague peut-être décrite à l'aide d'une onde sinusoïdale de la forme :

$$\eta(x, t) = a \sin(kx - \omega t)$$

$\lambda = 2\pi/k$: longueur d'onde : distance horizontale entre 2 crêtes successives.

λ : wavelength : horizontal distance between 2 successive crests.

$c = \lambda/T$: célérité de l'onde ou vitesse de phase : vitesse à laquelle l'onde voyage, ie la vitesse à laquelle la crête et le creux de la vague avance.

$c = \lambda/T$: wave speed or phase speed : speed at which the wave profile travels, ie the speed at which the crest and the trough of the wave advance.

Niveau de la mer
Sea level

H : hauteur de la vague : différence d'élévation entre la crête et le creux précédent.

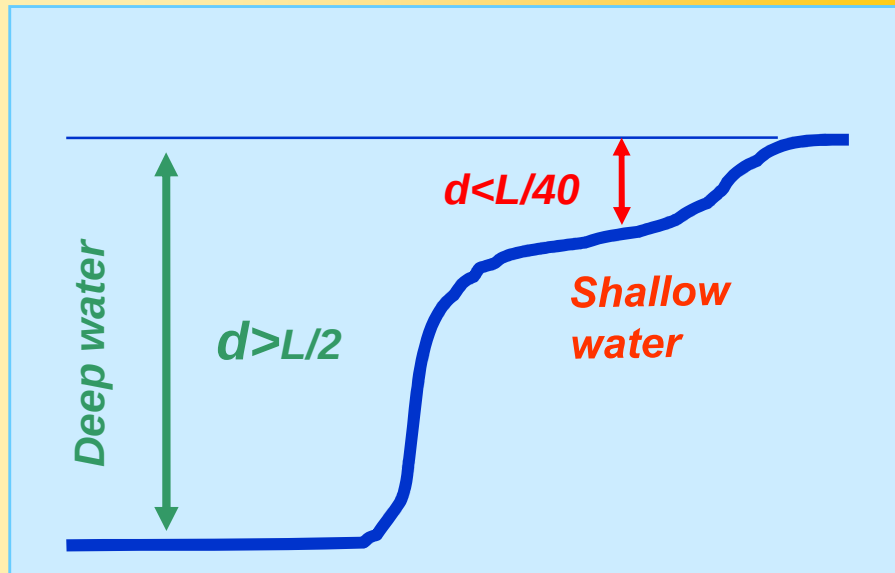
H : wave height : difference in surface elevation between the wave crest and the previous wave trough.

a : amplitude : déplacement maximum par rapport au niveau moyen de la mer.
 a : amplitude : magnitude of the maximum displacement from mean sea level.

$T = 2\pi/\omega$: période : intervalle de temps entre le passage de 2 crêtes successives en un point fixe.

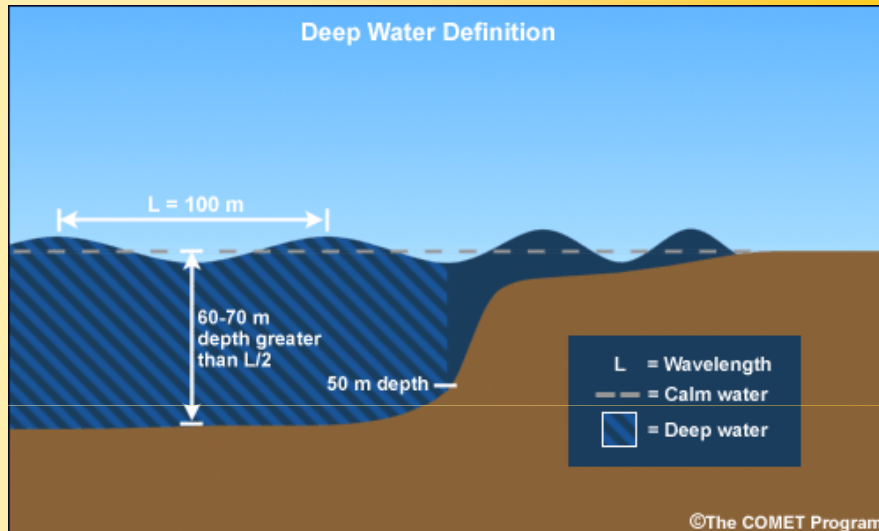
T : period : time interval between the passage of successive crests at a fixed point.

General ideas - Propagation



- *La propagation des vagues diffère suivant si elles sont en eau profonde ou en eau peu profonde.*
- *La variation de la vitesse de phase avec la longueur d'onde est appelée la relation de dispersion.*
- Waves propagation is different whether waves are in deep water or shallow water.
- Variation of wave speed with wavelength is called the dispersion relationship

General ideas - Propagation in deep water (1)



Steps:

$$1) C \cong \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)}$$

$$2) C \cong \sqrt{\frac{gL}{2\pi}} (1)$$

$$3) C \cong \sqrt{\frac{gL}{2\pi}}$$

where:

C = Wave Speed (m/s)

g = gravity = 9.8 (m/s²)

L = wavelength (m)

$\pi = 3.14159$

tanh = hyperbolic tangent

h = water depth (m)

EN EAU PROFONDE ($d > L/2$), on obtient une relation simple.

$$c = \sqrt{(gL / 2\pi)}$$

$$L = 1.56 T^2 \text{ m}$$

$$c = 1.56 T \text{ m/s} = 3 T \text{ kt}$$

$c \propto \lambda$: les ondes se propagent donc à une vitesse qui dépend de leur longueur d'onde, le milieu est dit DISPERSIF.

IN DEEP WATER ($d > L/2$), this dispersion relationship is simple.

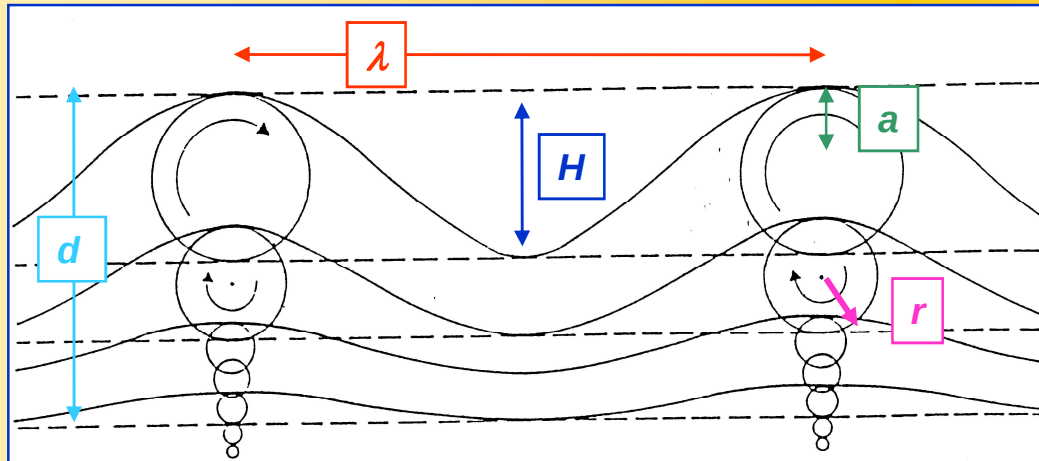
$$c = \sqrt{(gL / 2\pi)}$$

$$L = 1.56 T^2 \text{ m}$$

$$c = 1.56 T \text{ m/s} = 3 T \text{ kt}$$

$c \propto \lambda$ Waves propagate with a speed function of their wavelength, the environment is called DISPERSIVE.

General ideas - Propagation in deep water (2)



Le mouvement des particules est décrit par des trajectoires circulaires, dont le diamètre diminue très rapidement avec la profondeur : $r = a \cdot e(-kz)$
 Movement of particles of water is circular and diameter very quickly decreases with the depth : $r = a \cdot e(-kz)$

Plus l'onde est longue plus elle a des répercussions profondes.
 Longer is the wavelength, deeper is the impact of the wave.

Exemple : A $z = \lambda / 2$, on a $r = 0.02 \cdot H$.

Pour une houle de $H = 2$ mètres, $r = 4$ cm (r rayon des trajectoires circulaires)

- à $d = 37$ m pour $\lambda = 75$ m ou $T = 7$ s

- à $d = 75$ m pour $\lambda = 150$ m ou $T = 10$ s

- à $d = 300$ m pour $\lambda = 600$ m ou $T = 20$ s

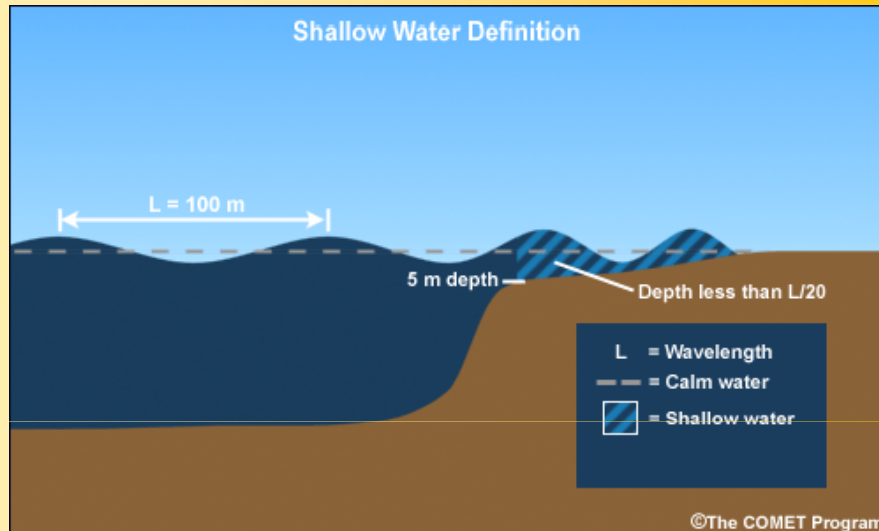
d : profondeur

($\lambda = 1.56 T^2$ mètres)

Au delà d'une profondeur supérieure à la moitié de la longueur d'onde, on peut donc considérer que la houle n'a plus d'impact.

Beyond a depth superior to the half of the wavelength, the swell is considered to have no impact anymore.

General ideas - Propagation in shallow water



$$c \cong \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)}$$

Steps:

$$1) c \cong \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)}$$

$$2) c \cong \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \left(\frac{2\pi h}{L}\right)}$$

$$3) c \cong \sqrt{gh}$$

where:

C = Wave Speed (m/s)

g = gravity = 9.8 (m/s²)

L = wavelength (m)

π = 3.14159

tanh = hyperbolic tangent

h = water depth (m)

- **EN EAU PEU PROFONDE** ($d < L/40$), la relation de dispersion donne :

$$c = \sqrt{gd}$$

- **$c \propto \sqrt{d}$** : la célérité est donc proportionnelle à la racine carrée de la profondeur.
- **Toutes les ondes se propagent à la même vitesse, le milieu n'est PLUS dispersif.**

- Dispersion relationship in shallow water becomes :

$$c = \sqrt{gd}$$

- **$c \propto \sqrt{d}$** : Speed is proportional to the square root of the depth.
- All the waves propagate at the same speed, the environment is not dispersive anymore

General ideas - Energy

- *L'énergie des vagues par unité d'aire de surface de la mer est proportionnelle au carré de la hauteur de la vague (valable avant le déferlement) :*

$$E = H^2$$

- *La vitesse de transmission de l'énergie est mesurée par la VITESSE DE GROUPE qui représente la vitesse d'un train d'ondes.*

- *EN EAU PROFONDE, la vitesse de groupe est égale à la moitié de la vitesse de phase*

$$c_g = \frac{c}{2}$$

- *EN EAU PEU PROFONDE, les vitesses de phase et de groupe sont égales.*

$$c_g = c$$

- Wave energy per unit area of the sea surface is proportional to the square of the wave height (except shortly before waves become breakers)

$$E = H^2$$

- Energy does not move with the wave speed but with the speed of groups of waves.

- In deep water $c_g = \frac{c}{2}$

- In shallow water $c_g = c$

Houle cyclonique Cyclonic swell

- ***Généralités* / General ideas**
 - *Définitions* / Definitions
 - *Propagation* / Propagation
 - *Energie* / Energy
- ***Génération* / Generation**
 - *Mer du vent* / Wind waves
 - *Houle* / Swell
 - *Fetch, durée d'action* / *Fetch, Wind duration*
- ***Dissipation* / Dissipation**
- ***Houle cyclonique* / TC's swell**

Generation - Wind waves

On distingue deux types de vagues : celles qui sont encore sous l'action du vent (mer du vent) et celles qui ne le sont plus (houle).

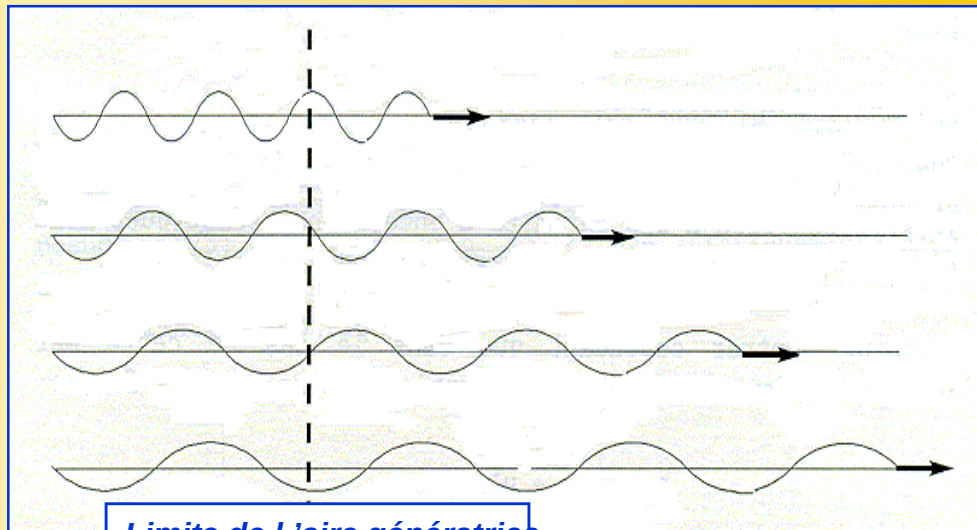
Two kinds of gravity waves : waves under wind action (wind waves) and the ones that are not anymore (swell).

MER du VENT

- à l'intérieur de la zone génératrice
- aspect chaotique
- direction de propagation proche de celle du vent

WAVES

- in the generating area
- chaotic aspect
- propagation direction close to the wind one



En eau profonde, c dépend directement de λ , c'est donc un milieu dispersif : plus les ondes sont longues, plus elles sont rapides.

Dispersive environment : the longer the waves are, the faster they go.

Generation - Swell

On aboutit donc à un filtrage qui isole au bout d'un certain temps les ondes de différentes longueurs d'onde et donc de différentes périodes.

Ces ondes isolées forment la houle.

So, there is a filtering that isolates waves with different lengthwaves or periods.

These isolated waves are called the swell.

HOULE - *vagues observées dans des zones où le vent ne peut les faire grossir*
- *aspect régulier*
- *longueurs d'onde généralement plus importantes*

SWELL - *waves located in areas where wind can't make them increase.*
- *regular aspect*
- *longer wavelength*

Fetch, wind duration, $H_{1/3}$ - Definitions

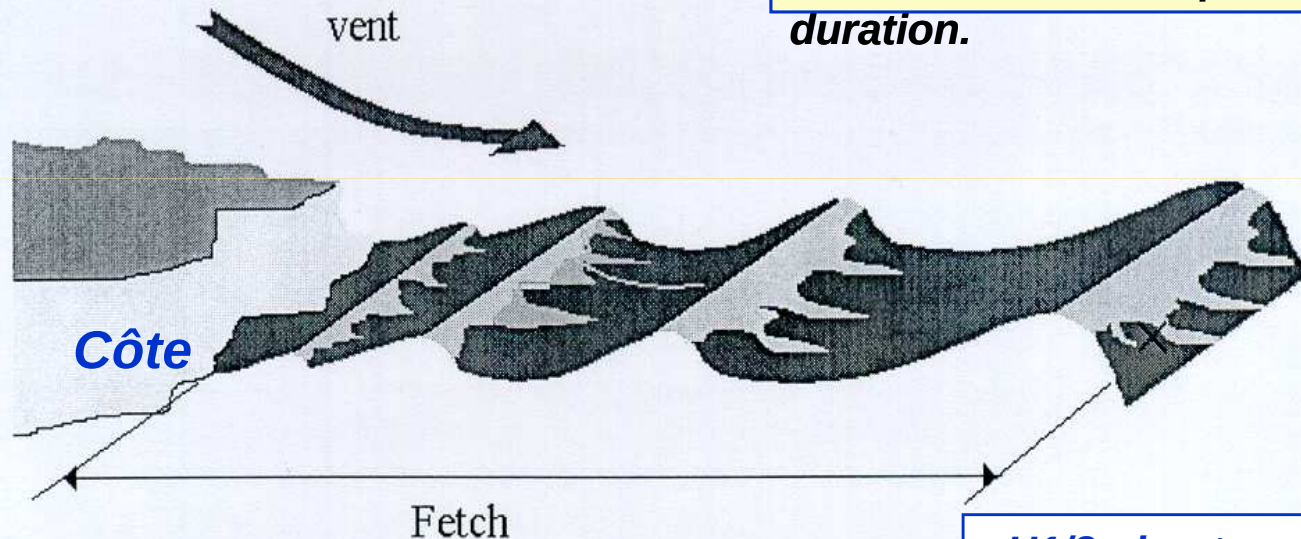
DUREE d'ACTION : temps pendant lequel le vent souffle sur l'aire génératrice.

Wind duration : duration during which the wind blows on the generating area.

Les caractéristiques des vagues sont donc fonction :

- de la vitesse du vent
- de sa durée d'action
- de la longueur de l'aire génératrice.

Characteristics of the waves depend on the fetch, the wind speed, and its duration.



FETCH : dimension de l'aire génératrice dans la direction du vent.

Fetch : length of the generating area in the direction of the wind.

$H_{1/3}$: hauteur significative : hauteur moyenne du tiers des vagues les plus hautes.

$H_{1/3}$: significant wave height, the average height of the 1/3 highest waves.

Distribution of waves heights

Distribution des hauteurs de vagues

$H_{1/3}$ représente la hauteur moyenne des vagues du tiers des vagues les plus hautes. Cette valeur correspond à l'observation visuelle.

- * la moitié des vagues ont une hauteur supérieure à $0,5.H_{1/3}$
- * 1 vague sur 100 en moyenne a une hauteur supérieure à $1,5.H_{1/3}$
- * 1 vague sur 1 000 en moyenne a une hauteur supérieure à $1,8.H_{1/3}$
- * 1 vague sur 10 000 en moyenne a une hauteur supérieure à $2 H_{1/3}$

La hauteur maximale d'une vague est comprise entre 1,6 et 2 fois $H_{1/3}$.

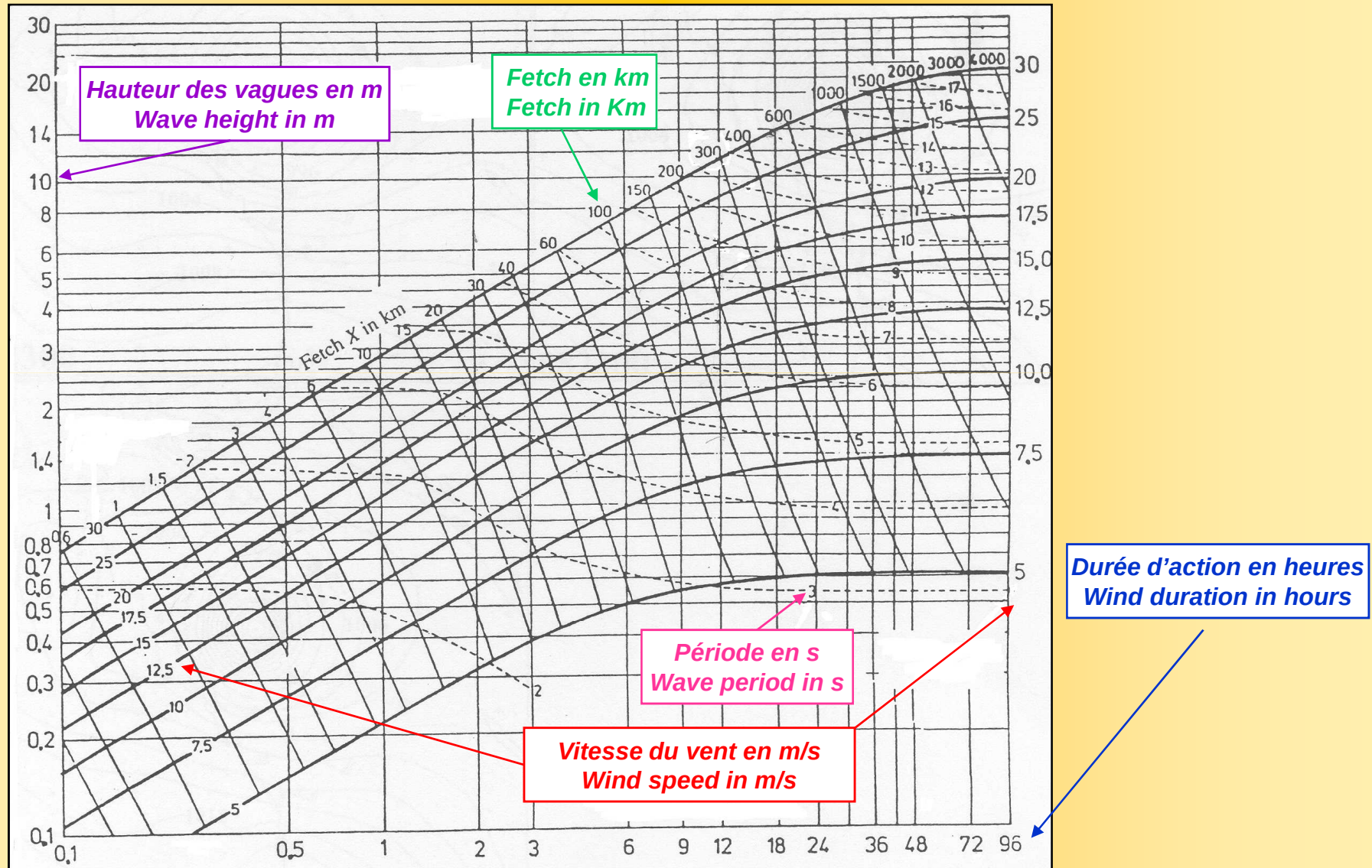
$H_{1/3}$ represents the average height of the third highest waves. $H_{1/3}$ corresponds to visual observation.

- * half waves have a height greater than $0,5.H_{1/3}$
- * 1 wave in 100 has a height greater than $1,5.H_{1/3}$
- * 1 wave in 1 000 has a height greater than $1,8.H_{1/3}$
- * 1 wave in 10 000 has a height greater than $2 H_{1/3}$

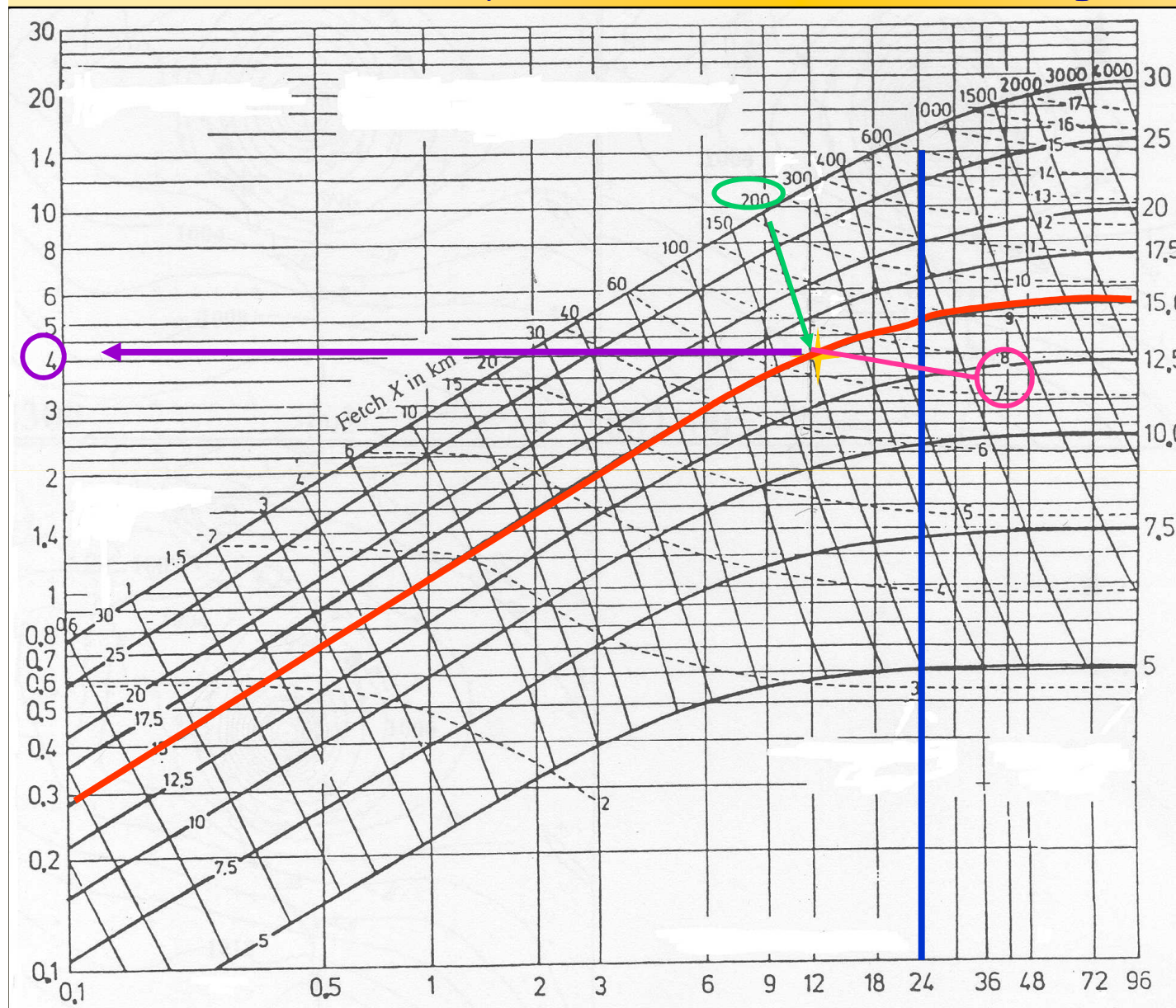
Maximum height of a wave is from 1,6 to 2 $H_{1/3}$.

Manual wave diagram

Abaque de croissance des vagues



Manual wave diagram *Abaque de croissance des vagues*



Vent = 30 nds
≈ 15 m/s

Durée d'action = 24h

Fetch = 200 km

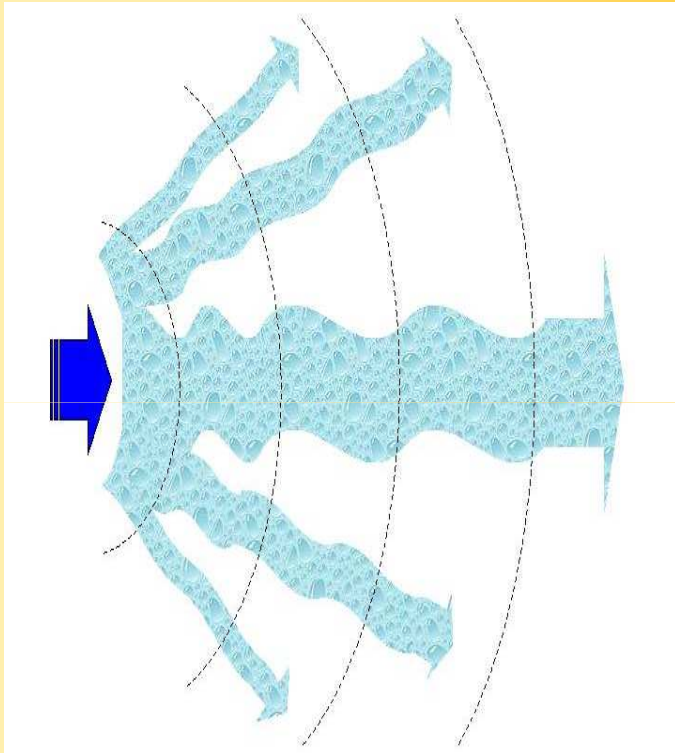
$H_{1/3} ?$ 4m

$T_{1/3} ?$ 7/8s

Houle cyclonique Cyclonic swell

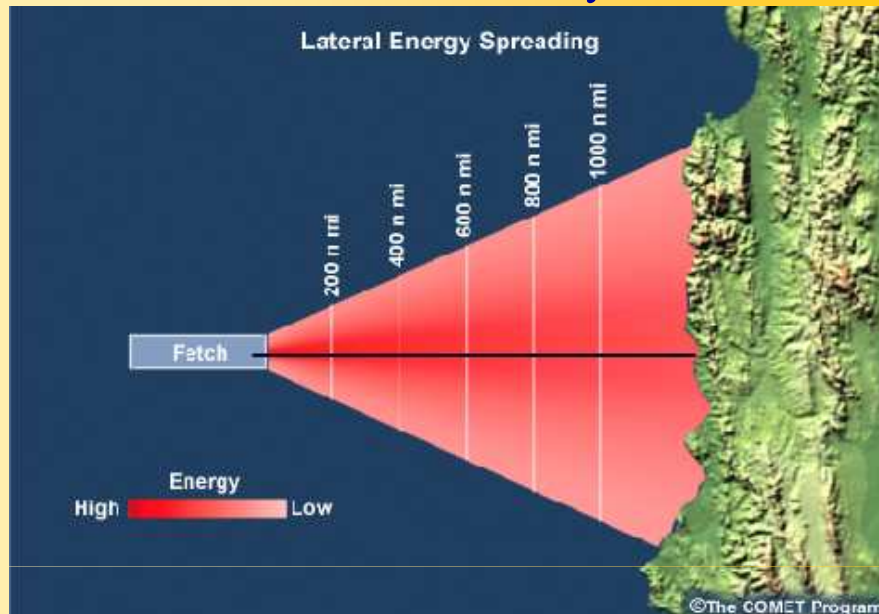
- ***Généralités* / General ideas**
 - *Définitions* / Definitions
 - *Propagation* / Propagation
 - *Energie* / Energy
- ***Génération* / Generation**
 - *Mer du vent* / Wind waves
 - *Houle* / Swell
 - *Fetch, durée d'action* / *Fetch, Wind duration*
- ***Dissipation* / Dissipation**
- ***Houle cyclonique* / TC's swell**

Dispersion (1)

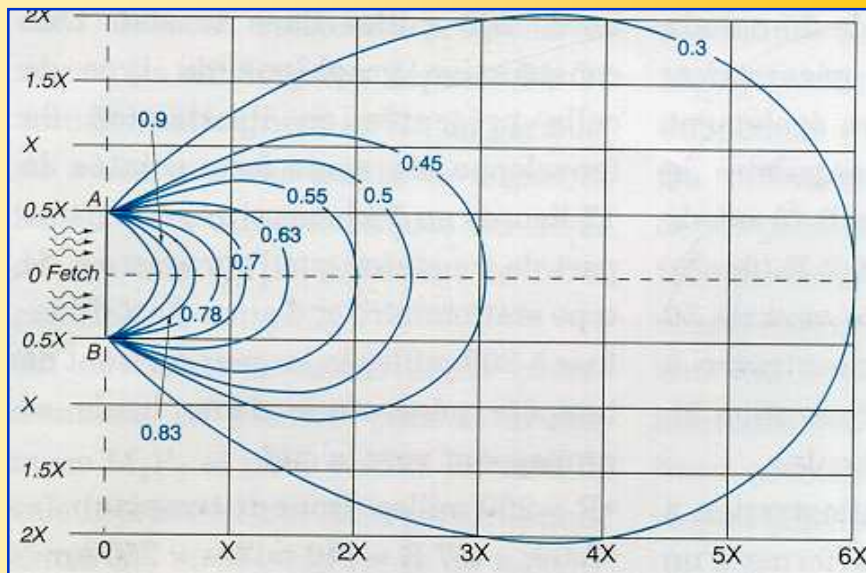


- *La dispersion de l'énergie a pour effet de répartir une même énergie sur une étendue plus vaste.*
- *Il en résulte donc une diminution de la quantité d'énergie par unité de surface et donc une diminution de la hauteur des vagues.*
- Dispersion of energy : distributes a same energy over a wider area.
- So energy per surface unit decreases and so the wave height.

Dispersion (2) - latérale



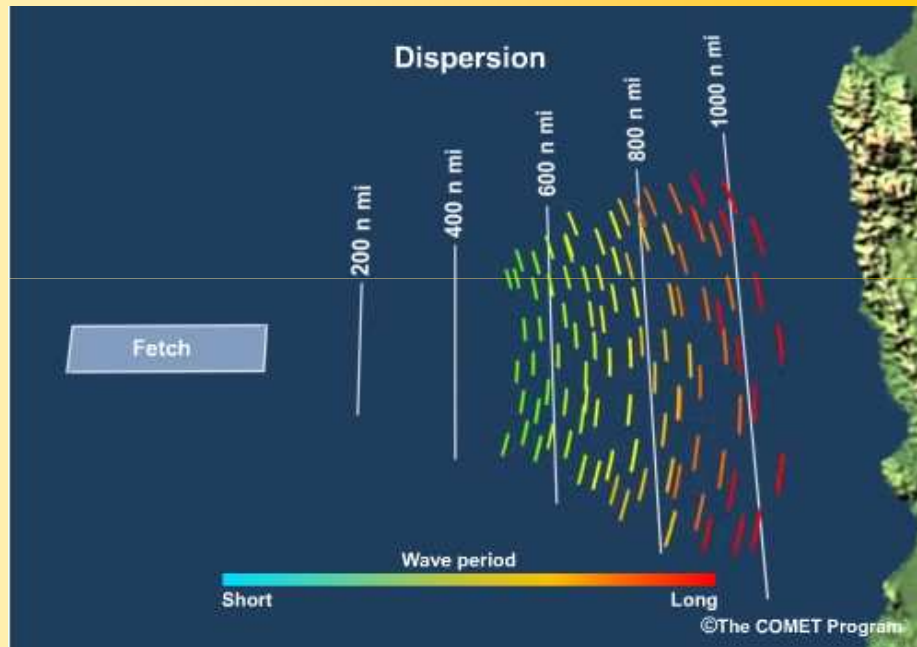
- *Energie plus importante au centre*
- Higher energy in the centerline



A une distance de la tempête égale à 6 fois sa largeur, la hauteur de la houle n'est plus que de 0.3 fois la hauteur générée.

To a distance equal at 6 times the width of the storm, swell height has decreased of the third of the generated height.

Dispersion (3)

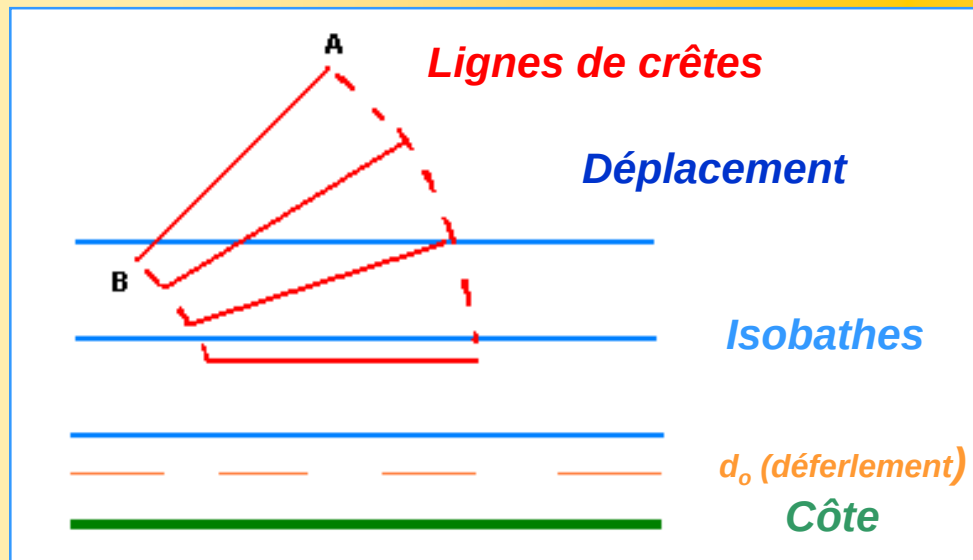


- Avec le filtrage des ondes, l'énergie initialement émise se disperse au fur et à mesure de la propagation, du seul fait de la séparation des différentes périodes la constituant.
- L'aspect régulier de la houle résulte du phénomène de dispersion et de dissipation.
- As the waves are filtered, initial energy scatters with propagation because of splitting of the different periods.
- Regular aspect results from dispersion and dissipation phenomenas.

Transformation in shallow water - Refraction

*La réfraction est la modification de la direction de propagation en fonction de la profondeur.
Refraction is the variation of the propagation direction with depth.*

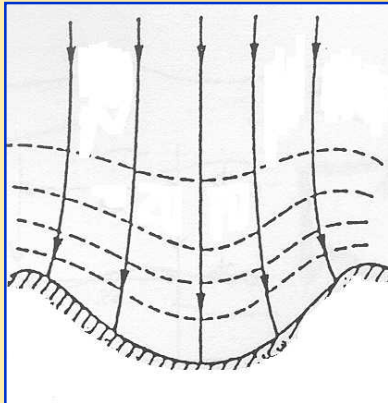
*En eau peu profonde, le milieu est non dispersif, la célérité est proportionnelle à la racine carrée de la profondeur. $c \propto \sqrt{d}$
In shallow water, environment is not dispersive, and speed is proportional to the square root of the depth.*



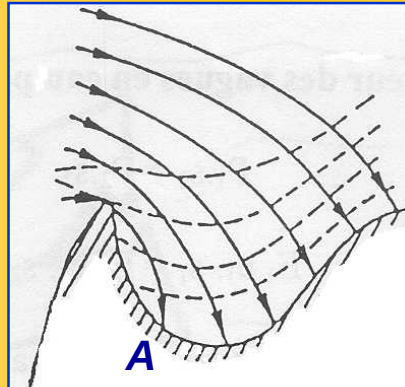
La crête AB est freinée sur sa partie droite de façon plus sensible que sur sa partie gauche. Elle va donc pivoter pour se présenter progressivement parallèle au rivage, jusqu'à une profondeur d_0 , où se produit le déferlement.

Crest AB is slowed down on its right side much more than on its left side. It gradually swivels to become parallel to the coast, till the breaking depth d_0 .

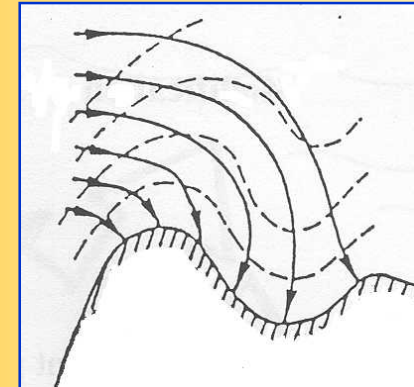
Refraction process - Examples (1)



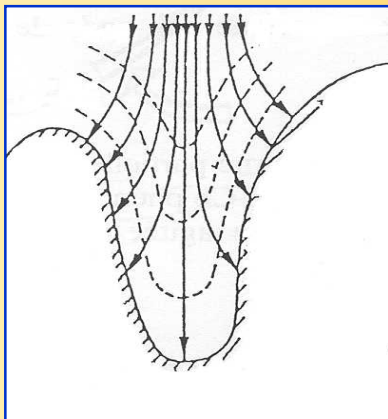
*Peu de déviation vers l'extérieur.
Small deviation towards the exterior*



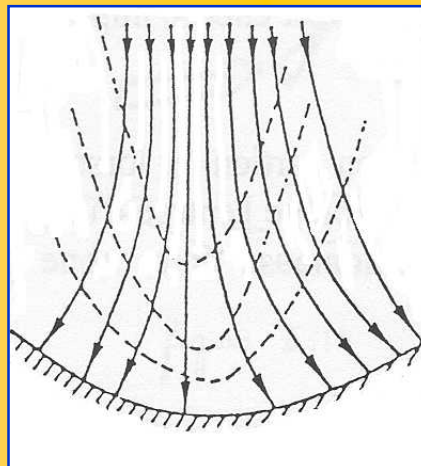
*Vagues dépassant le cap pointu sans réfraction importante. Déferlement à partir de A
Waves passing the pointed cape without big refraction ; breaking starts at A point.*



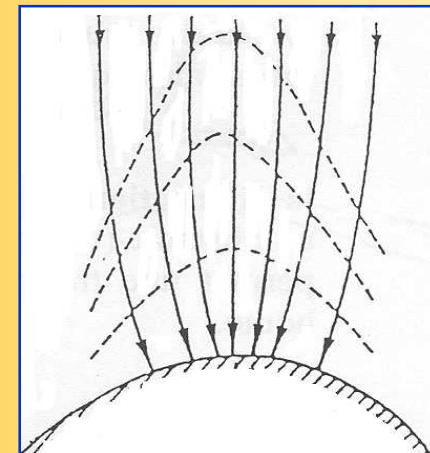
*Avec un cap arrondi, les vagues déferlent sur toute la côte.
With the rounded cape, waves break on all the coast.*



*Crêtes de plus en plus étirées au fur et à mesure que les vagues pénètrent dans le goulet.
The more the waves get into the narrows, the more the crests are elongated.*

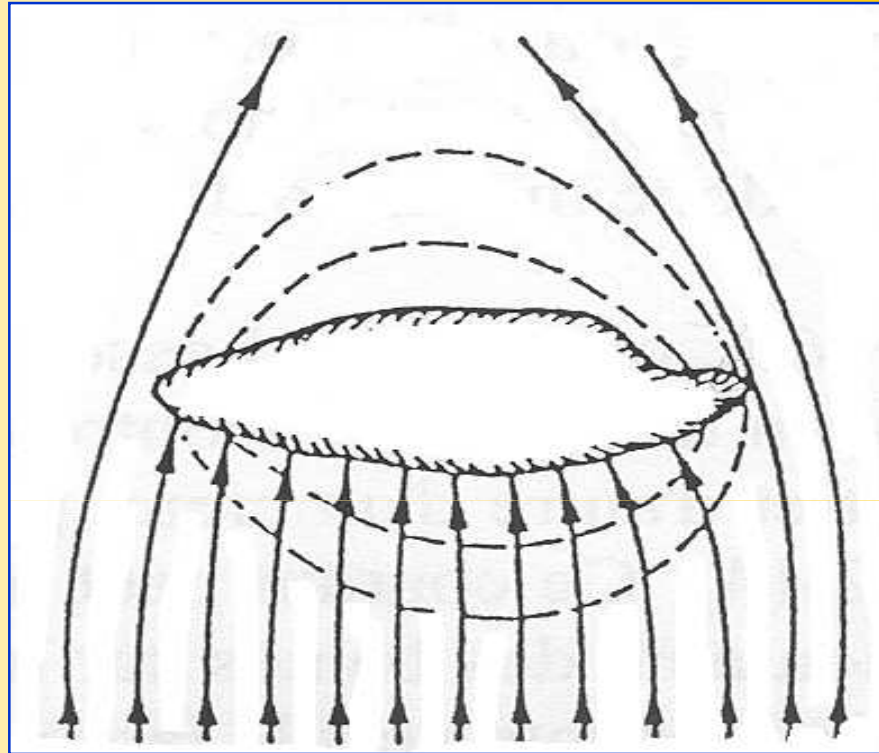


*Réfraction vers l'extérieur de la vallée sous-marine, diminution du déferlement.
Refraction towards the submarine valley and decrease of the breaking.*



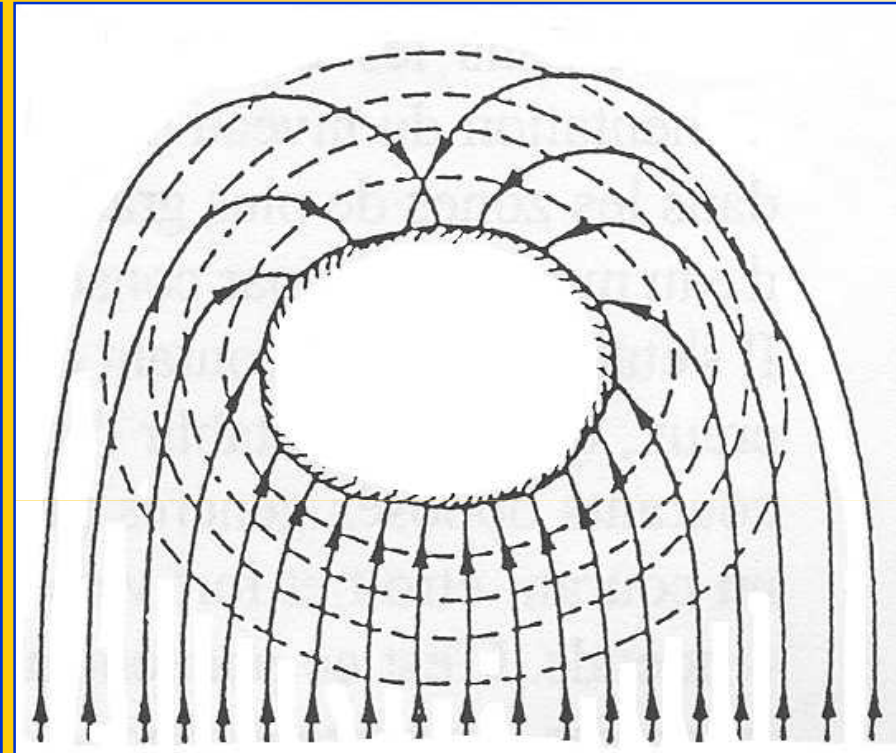
*Réfraction vers l'intérieur de la crête sous-marine ; augmentation du déferlement.
Refraction towards the submarine crest ; increase of the breaking.*

Refraction process - Examples (2)



Bon abri sous le vent de l'île à rivage abrupt ; pas de réfraction.

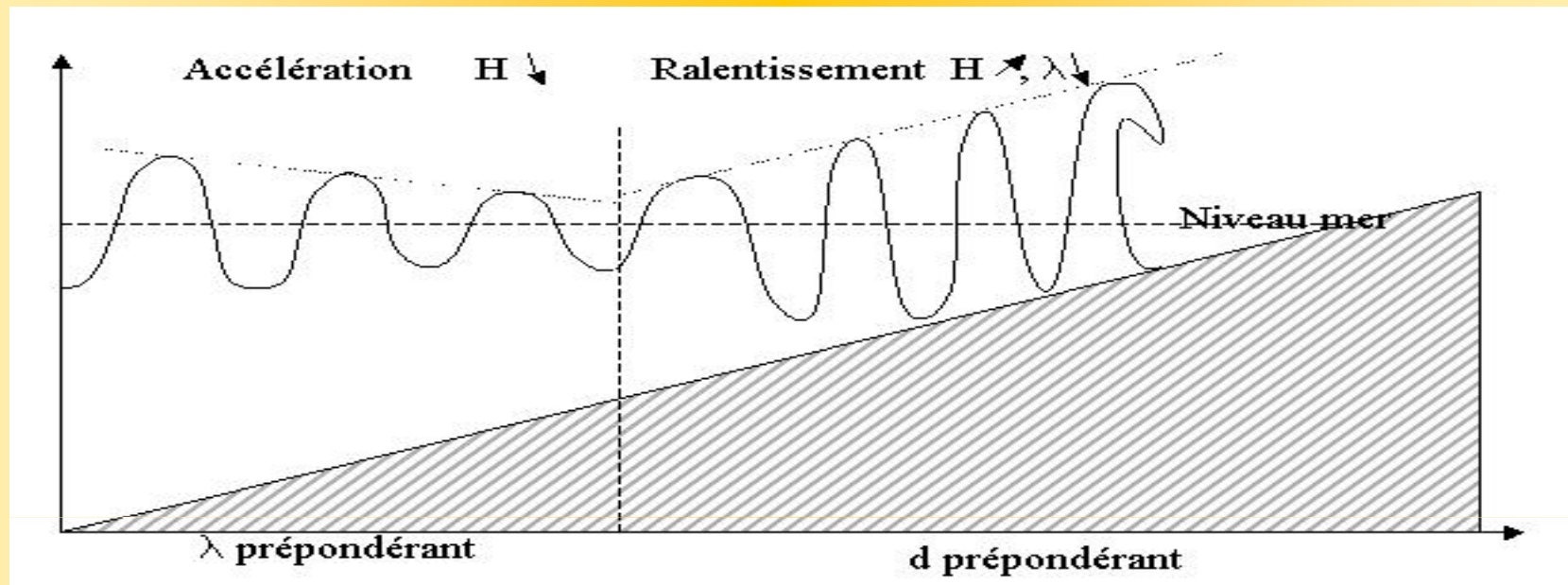
Good shelter on the leeward coast of the island with steep slope ; no refraction.



Ile à bords arrondis et pente sous-marine douce : réfraction tout autour. Les vagues interfèrent sous le vent et peuvent atteindre une grande hauteur.

Islands with rounded coasts and soft submarine slope : refraction all around. Waves interfere leeward and can be very high.

Modification in shallow water - Shoaling



- *Le flux d'énergie perpendiculaire à la côte est constant.*
- *En eau intermédiaire, la vitesse de groupe augmente ($c_g \propto c$) > H diminue.*
- *En eau peu profonde, $c_g = c \propto \sqrt{d}$. La vitesse diminue > H augmente avant déferlement (heureusement !)*
- *Ceci explique les surélévations dévastatrices qui surviennent dans le cas des tsunamis.*

- Energy flux perpendicular to the coast is constant.
- When waves arrive in middle water , speed increases >> H decreases.
- In shallow water, speed decreases >> H increases before breaking (happily !)
- This phenomena explains devastating elevations in tsunamis.

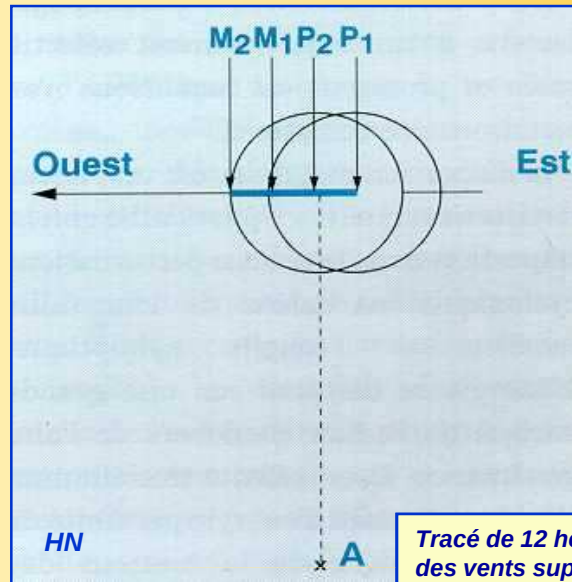
Houle cyclonique Cyclonic swell

- ***Généralités* / General ideas**
 - *Définitions* / Definitions
 - *Propagation* / Propagation
 - *Energie* / Energy
- ***Génération* / Generation**
 - *Mer du vent* / Wind waves
 - *Houle* / Swell
 - *Fetch, durée d'action* / *Fetch, Wind duration*
- ***Dissipation* / Dissipation**
- ***Houle cyclonique* / TC's swell**

Cyclone swell (1)

- ***Dans le cas d'un cyclone tropical, complexités liées à***
 - *rotation des vents*
 - *variation d'intensité des vents*
 - *déplacement du système.*
- ***Dans un cyclone tropical, zone de violente tempête géographiquement très limitée (« fetch » court).***
 - *Vagues échappent donc à l'action du vent avant de s'être pleinement développées,*
 - *H1/3 reste souvent inférieur à 10 mètres.*
- ***Toutefois, si un cyclone se déplace à une certaine vitesse , il peut accompagner ces vagues sur un temps plus long et leur permettre ainsi de continuer à se développer (fetch considérablement augmenté).***
- **In TC case, difficulty comes from wind rotation, variation of the wind intensity and movement of the cyclone.**
- **In TC, violent storm winds area is spatially very limited (short fetch). Waves are not anymore under wind action before being completely developed and H1/3 often remains inferior to 10 meters.**
- **However, if a cyclone tracks quickly, with a speed close to the waves one, waves can then keep on increasing.**

Cyclone swell (2) - Illustration



Tracé de 12 heures en 12 heures de l'enveloppe des vents supérieurs à 34 nœuds permet de déterminer la largeur du front de tempête.

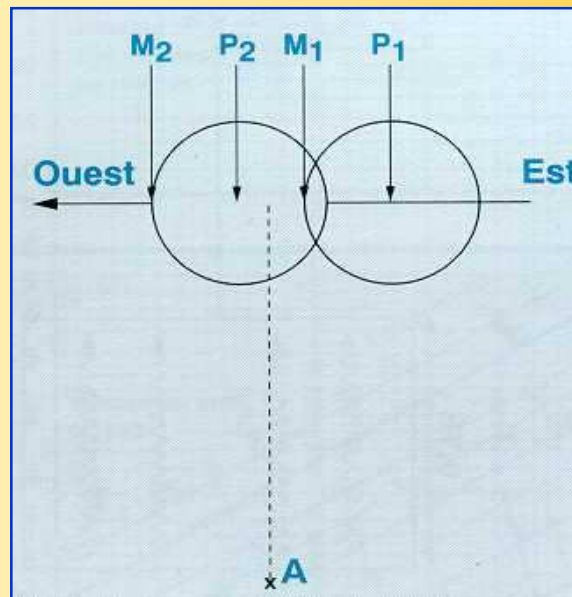
Areas of winds reaching 34 kts or more, drawn each 12 hours. Allows to measure the storm front.

Déplacement lent du cyclone. Les enveloppes se recouvrent largement ; sur une même zone, les vents gardent la même direction pendant 12 heures ou plus.

La houle générée sera suffisamment importante pour se propager loin du cyclone.

Slow track : over a same area, winds have the same direction 12 hours or more.

Swell will be big enough to propagate far from the system



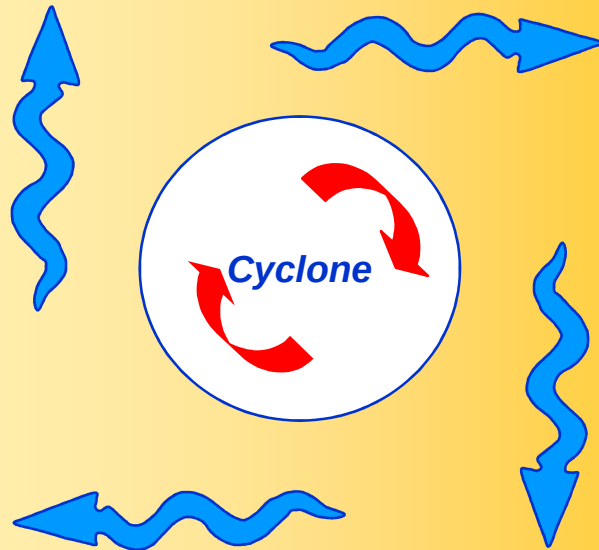
Déplacement rapide. Les enveloppes se recouvrent peu ou pas du tout. Vents du nord remplacés rapidement par vent du sud, et n'ont pas le temps de générer une houle suffisante pour atteindre A.

Quick track : northerly winds quickly become southerly winds et do not have time to generate swell able to reach point A.

Taille et la vitesse de déplacement d'un cyclone sont en fait les éléments essentiels pour la détermination des houles.

The cyclone capability to generate heavy swell in an other direction than its propagation depends on its size, its intensity and its speed.

Cyclone swell (3)



- **Les vents tournent autour d'une dépression, mais la houle s'en échappe tangentiellement**
- **Pourquoi ?**
 - Les vagues sont des ondes, elles transportent de l'énergie et non de la matière. Elles ne sont donc guère soumises à la force de Coriolis et se propagent en ligne droite (exactement sur de grands cercles)
- **La houle concerne donc des zones qui n'ont jamais été directement soumises aux vents de la dépression**

Definition

Great Circle Tracks



©The COMET Program

- All ocean waves move along great circle tracks.
- A great circle track is the shortest distance between two points on a sphere.

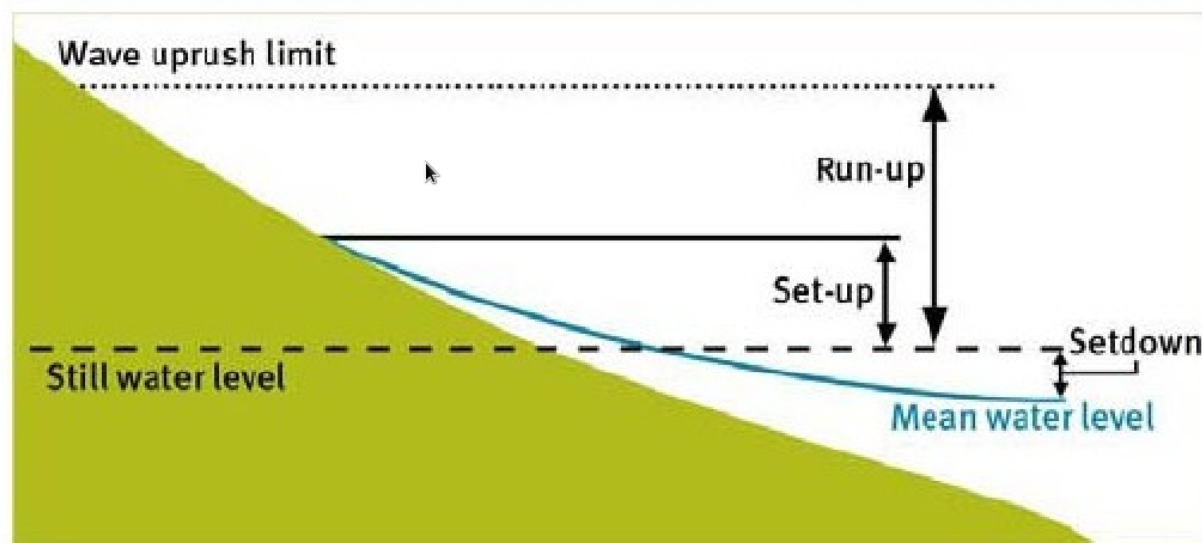
- **Winds veer around lows, but swell escapes tangentially**
- **Why ?**
 - Swells are waves, they are energy, not matter. Do not undergo Coriolis force so much and so propagate on straight lines (actually on big circles)
- **So swell reach areas never directly concerned the winds of the low..**

Cyclone swell (4)

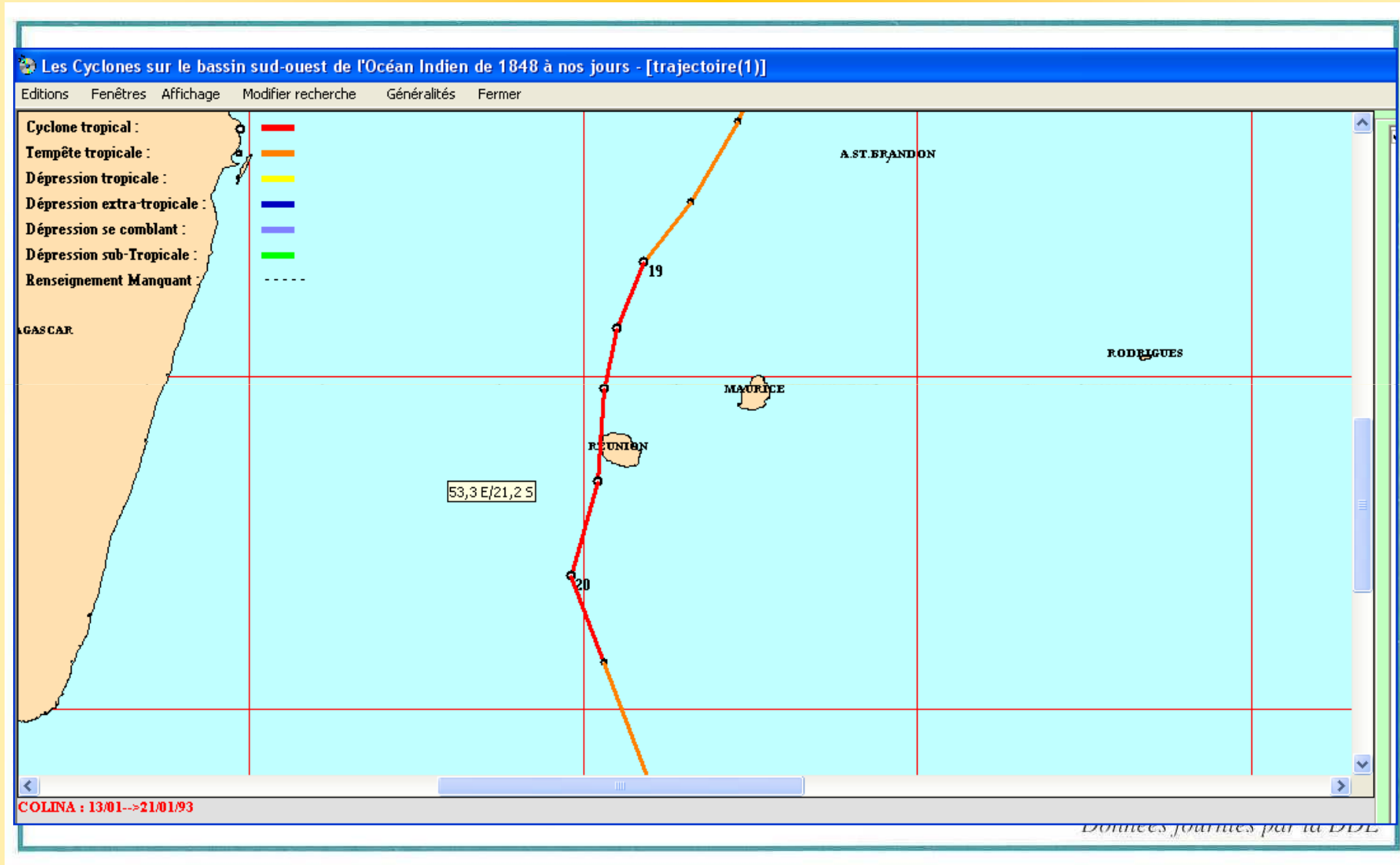
- *Rappelez-vous : en eau profonde*
 - $c = 1.56 T$ m/s
- *La houle étant une vague de période longue, elle se déplace plus vite que le cyclone.*
- *Une forte houle est donc perceptible à l'avant du cyclone (jusqu'à 800 km de son centre).*
- *La houle cyclonique est surtout susceptible de causer des dégâts par déferlement sur le littoral.*
- Remember : deep water
 - $c = 1.56 T$ m/s
- Swell is a long period wave, and so tracks quicker than the cyclone.
- This swell is then perceptible far away forehead the cyclone (up to 800 km from its centre).
- Cyclonic swell can above all cause a lot of damages by breaking on the coast.

Cyclone swell (5)

- *Quand les vagues déferlent sur une plage, elles produisent une surcote, une montée du niveau de la mer moyen au-dessus du niveau qu'aurait la mer au repos*
- *Par conservation de la masse, une zone de décote, où le niveau de la mer moyen diminue, apparaît conjointement.*
- When the waves break on the coast, they product a set-up
- At the same time, a set-down area exists offshore

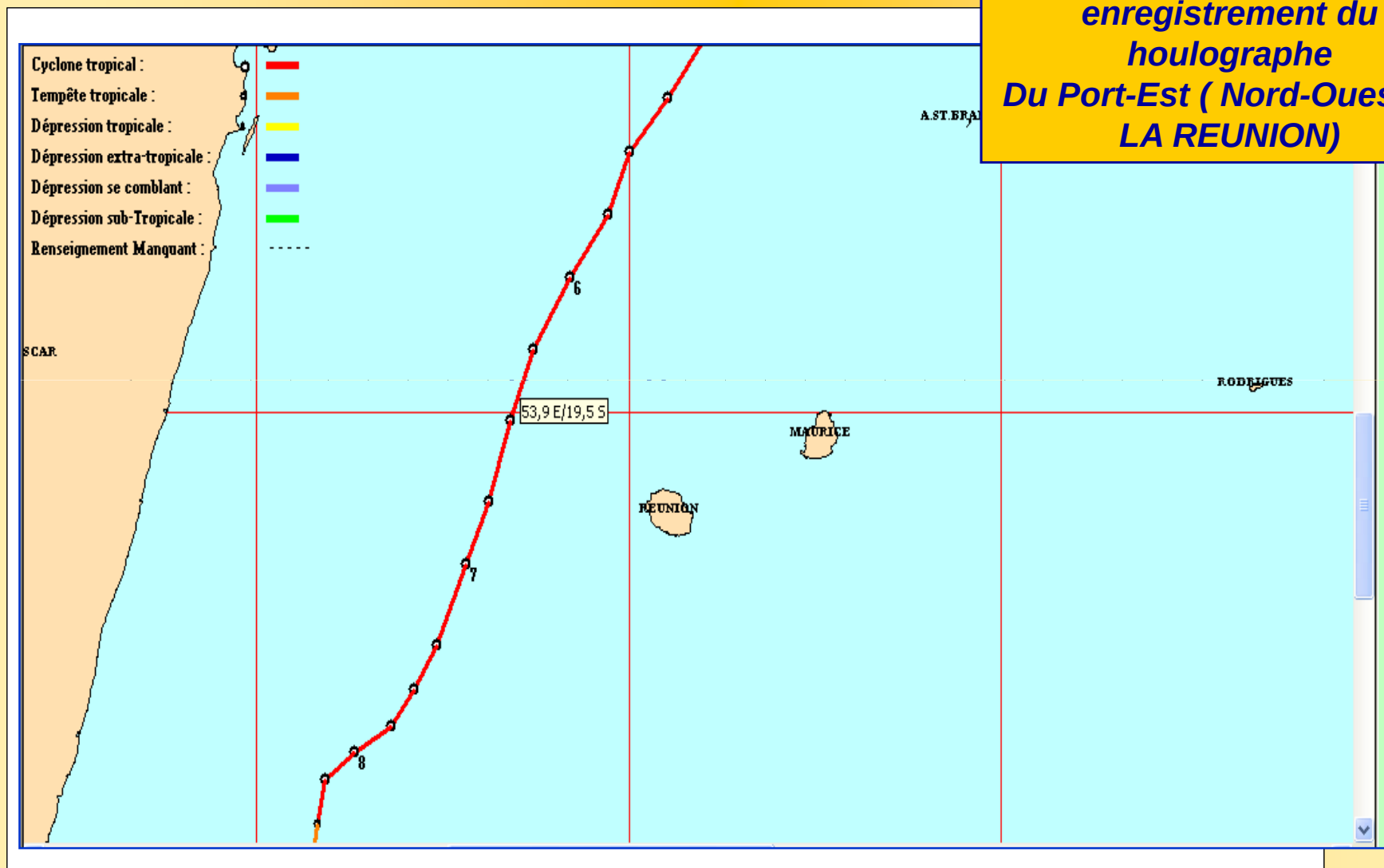


Swell obs during Colina, in 1993



**ANDO and the associated swell :
wave record by Port-Est's
waverider buoy (LA REUNION)**

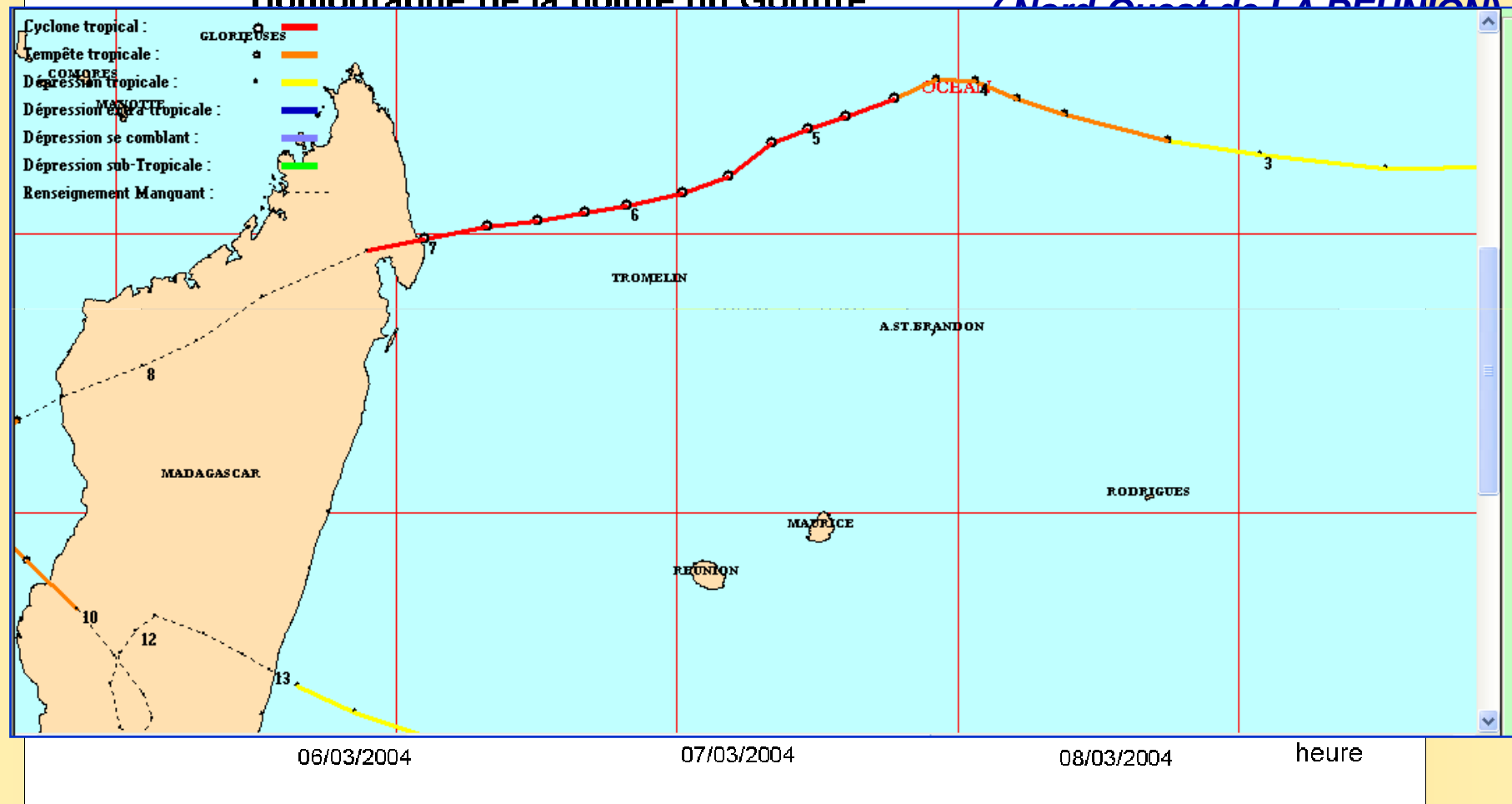
**ANDO et
la houle cyclonique :
enregistrement du
houlographe
Du Port-Est (Nord-Ouest de
LA REUNION)**



**GAFILO and the associated swell :
wave record by Gouffre's
waverider buoy (LA REUNION)**

**GAFILO et
la houle cyclonique :
enregistrement du
houlographe
De la Pointe du Gouffre**

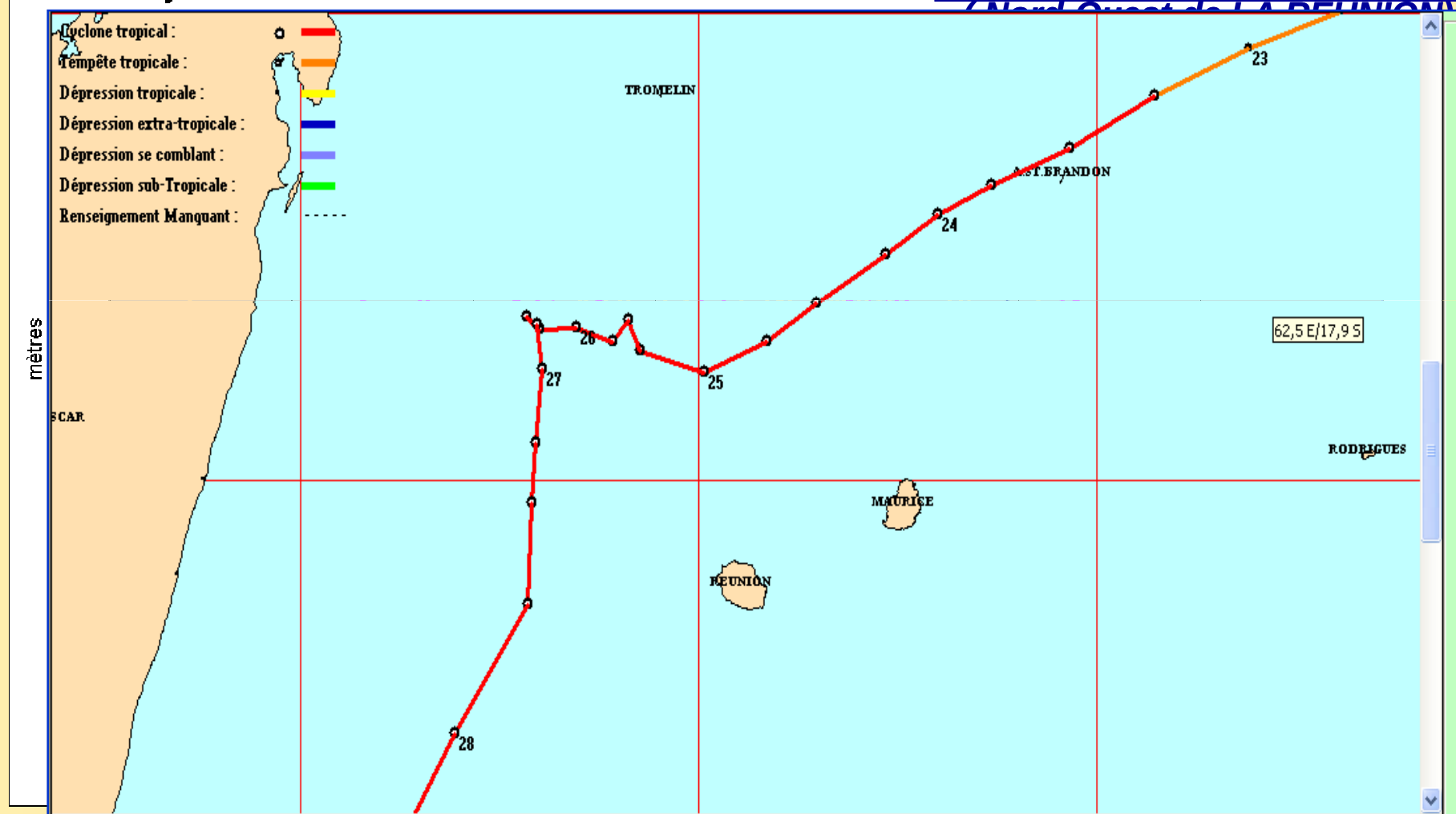
Houlographe de la pointe du Gouffre



**GAMEDE and the associated swell :
wave record by Gouffre's
waverider buoy (LA REUNION)**

**GAMEDE et
la houle cyclonique :
enregistrement du
houlographe
De la Pointe du Gouffre**

Cyclone GAMEDE : Hauteur de houle GOUFFRE





Onde de tempête

Storm surge

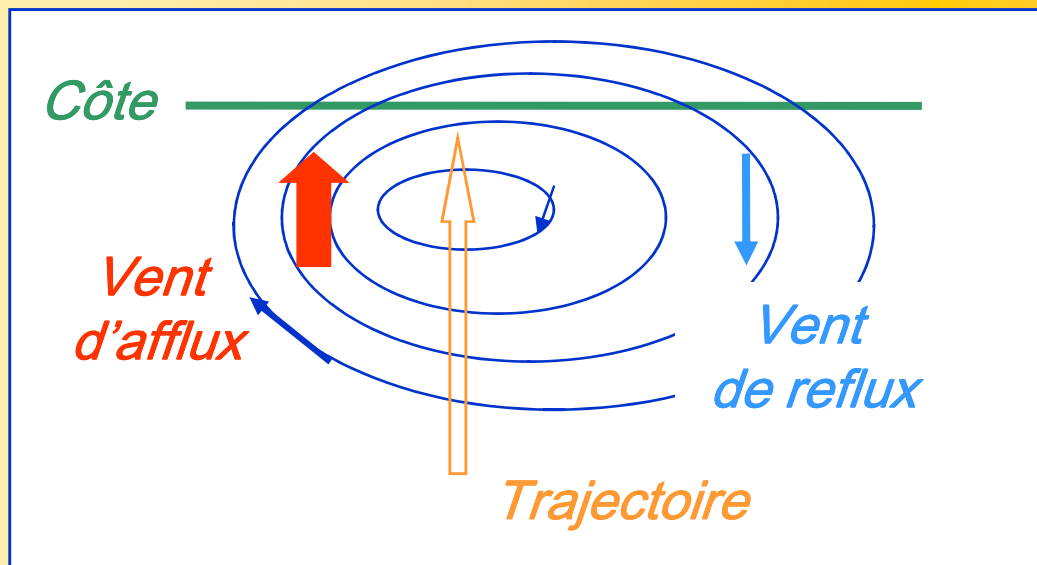
Storm surge *Onde de tempête*

- *Généralités* / General ideas
- *Dégâts* / Damages

General ideas - Wind effect

Dans un cyclone tropical, les vents du demi-cercle dangereux (gauche dans HS) créent un courant dit courant de dérive.

Celui-ci n'a pas d'impact en eau profonde.



En revanche, à l'approche d'une côte, ce courant conduit à une accumulation des eaux dans le quadrant avant.

Les eaux provoquent alors une surélévation du niveau de la mer.

As a cyclone is close to landfall, elevation of water is generated by a current created by strong wind-stress forcing in the dangerous semi-circle.

General ideas - Inverted barometer effect

Effet baromètre inverse

L'élévation de la mer due à de faibles pressions est appelé effet barométrique inverse.

A la zone de très basses pressions au centre du cyclone correspond une hausse du niveau de la mer.

Une baisse de pression de 10 hPa provoque une hausse de la mer de 10 cm.

Elevation of water is generated by a drop in the atmospheric pressure. It is called the inverted barometer effect.

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.*

Elevation of water depends on the speed of the winds, coastline configuration, and local bathymetry.

General ideas - Storm surge definition



Lorsque un cyclone aborde une côte, ces deux phénomènes, forçage du vent et effet barométrique inverse se conjuguent. L'élévation résultante est la **SURCOTE** ou **ONDE de TEMPETE**

When a hurricane arrives on a coast, both of the phenomena are combined. The resulting elevation is the **STORM SURGE**.



A : marée astronomique (1 mètre) (astronomical tide)

B: marée de tempête (5 mètres) (storm tide)

C = B - A : onde de tempête ou surcote (4 mètres) (storm surge)

NB : on peut parler de décote ou d'onde de tempête négative (negative storm surge).

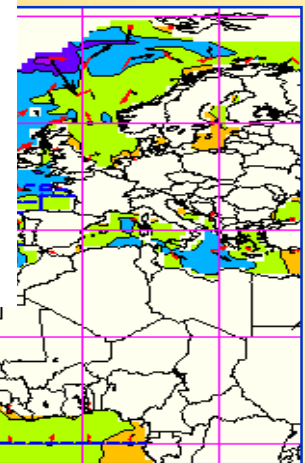
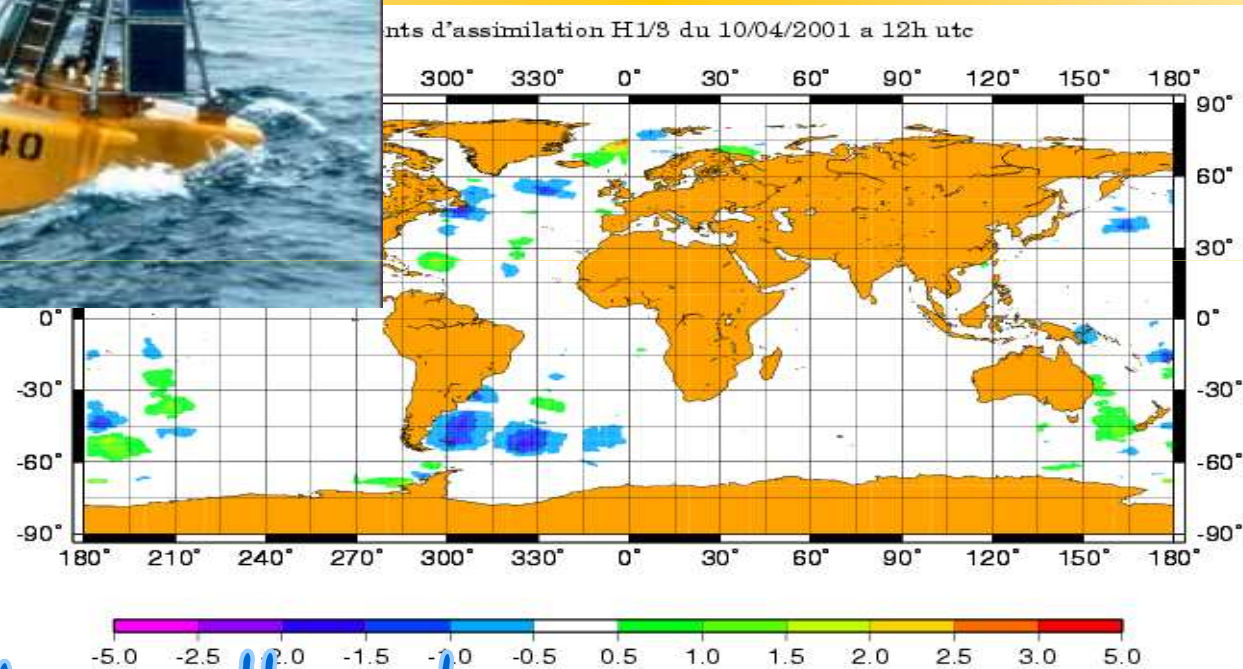
Storm surge Onde de tempête

- *Généralités* / General ideas
- *Dégâts* / Damages

Associated damages

- *Les pays dont l'altitude est basse, et bordés d'eau peu profonde sont particulièrement vulnérables aux surcotes.*
- *Les surcotes, et les inondations qu'elles ont provoquées, ont causé des pertes en vies humaines et des dégâts considérables dans les collectivités côtières.*
- *La surcote la plus forte enregistrée dans l'Atlantique Nord s'est produite avec Camille en 1969 sur la Louisiane : 7 mètres. Cette surcote a causé plus de 100 morts et près d'un milliard de dollars de dégâts.*
- *En novembre 1970, une surcote estimée à 9 mètres a coûté la vie à 350 000 personnes au Bangladesh.*
- *Plus récemment, le tristement célèbre cyclone NARGIS a provoqué une onde de tempête de plus de 3 mètres sur les côtes birmanes en mai 2008.*
- Certain low-lying areas adjacent to shallow seas are particularly vulnerable to surges.
- Storm surges and generated floods cause most of the damage associated with tropical cyclones in coastal areas
- The strongest surge recorded in the northern Atlantic is associated with Camille in 1969 over Louisiana : 7 meters. This surge caused more than than 100 deaths and almost one billion dollars in damage.
- November 1970 : a 9 m storm surge responsible for 350 000 dead people in Bangladesh
- May 2008 : a 3 m storm surge associated to cyclone NARGIS on the Burma coasts.

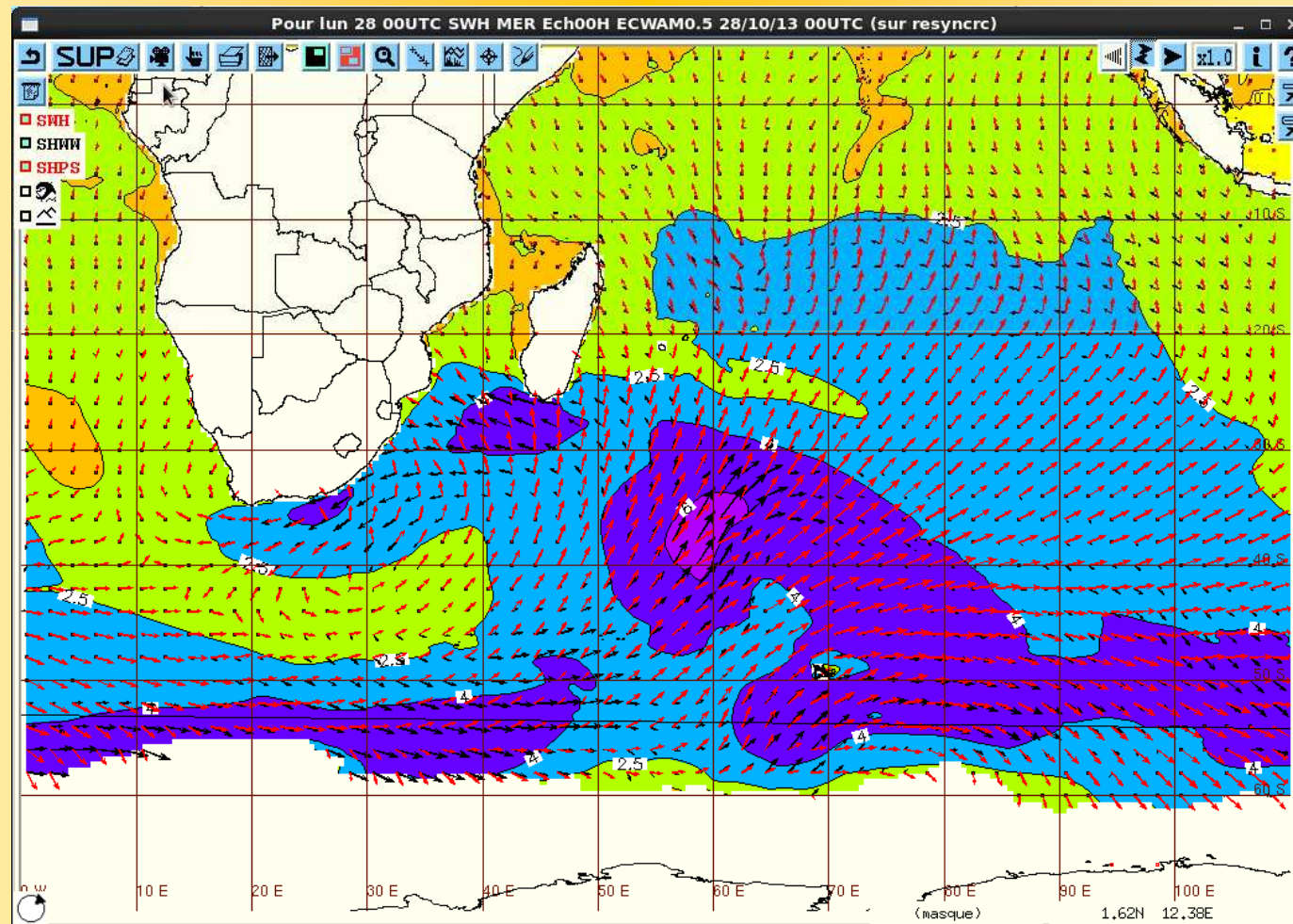
Modélisation



Cyclonic swell and surge

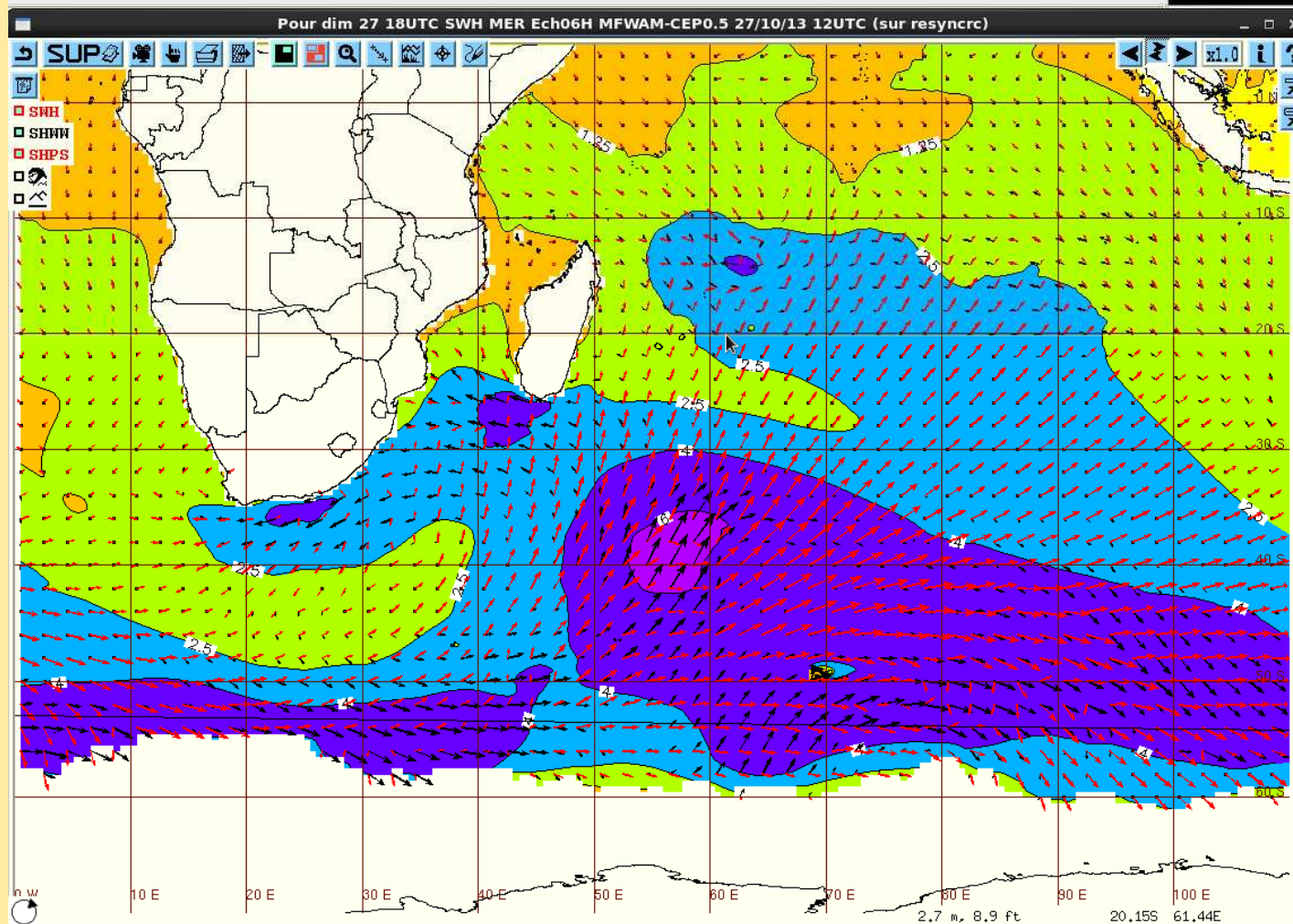
Operational swell Models (WAM-CEP)

**WAM Model – Spatial Resolution $0.5 \times 0.5^\circ$ - Global
Assimilation ERS+SAR – 2 Runs per day – 0h -> 120h**



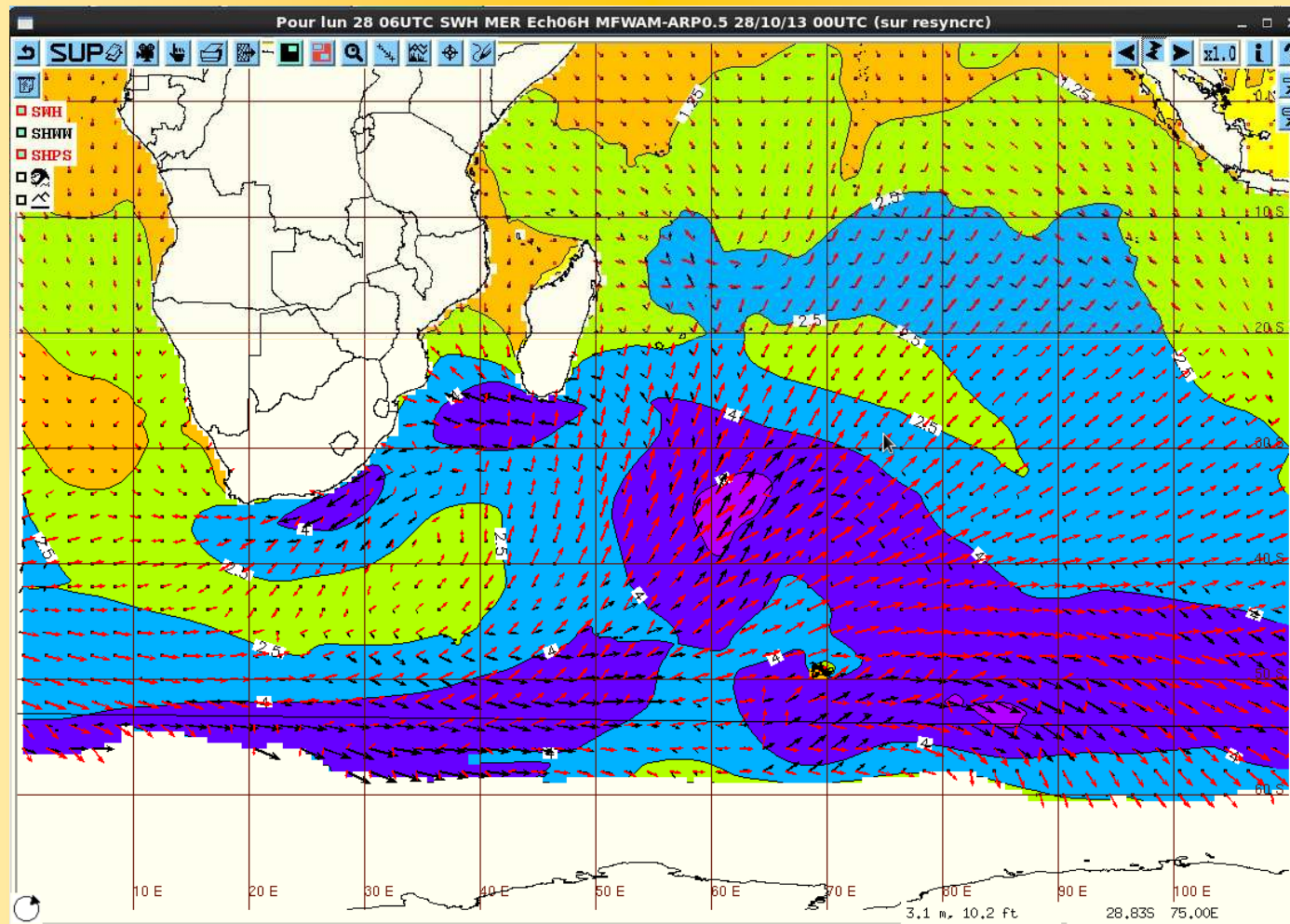
Operational swell Models (MFWAM-CEP)

**MFWAM Model – Spatial Resolution $0.5 \times 0.5^\circ$ - Global
Assimilation ERS+SAR – 2 Runs per day – 0h -> 120h**



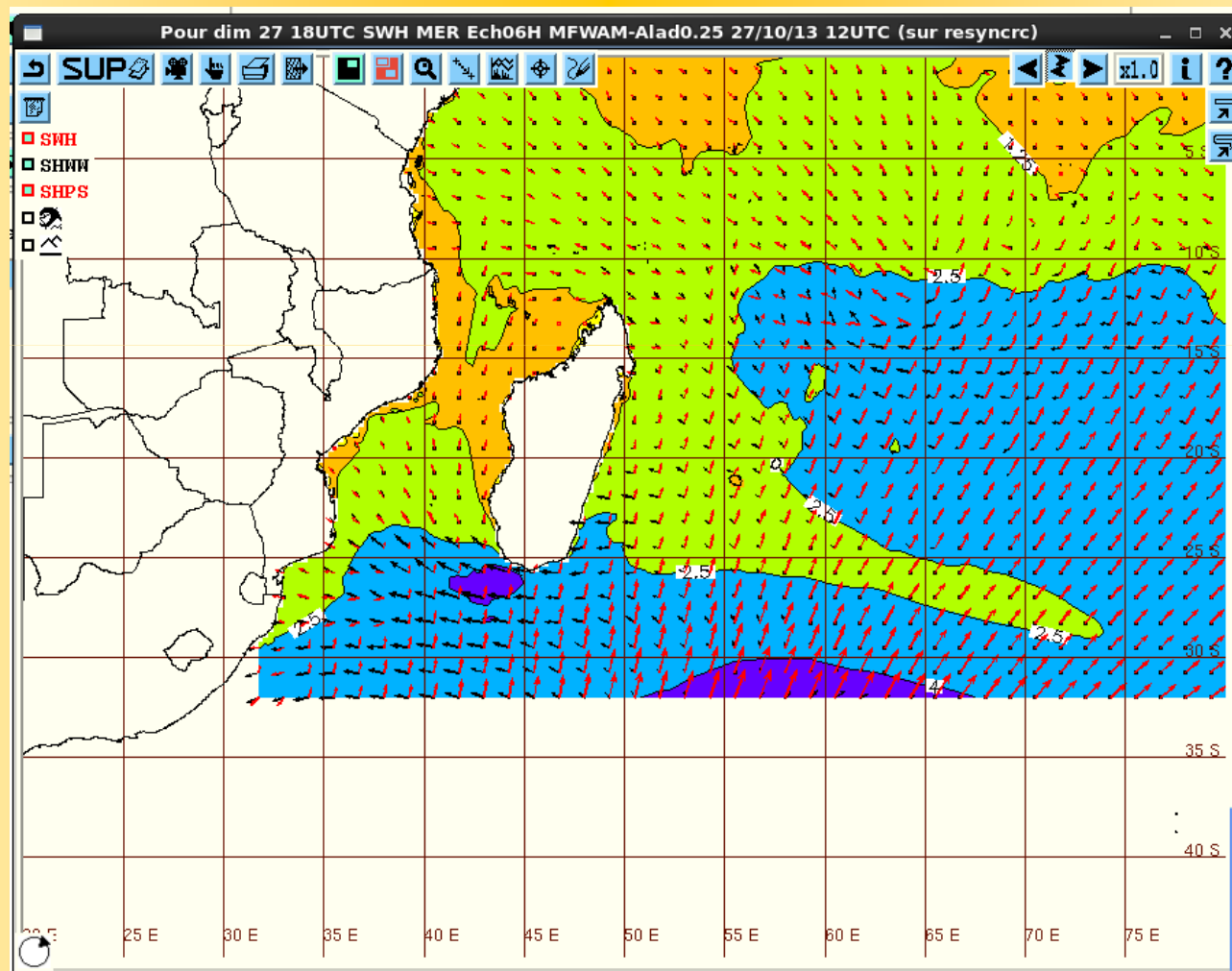
Operational swell Models (MFWAM-ARP)

MF-WAM Model – Spatial Resolution $1^\circ \times 1^\circ$ - Global
Assimilation – 4 Runs per day – 0h -> 102h



Operational swell Models (MFWAM-ALA)

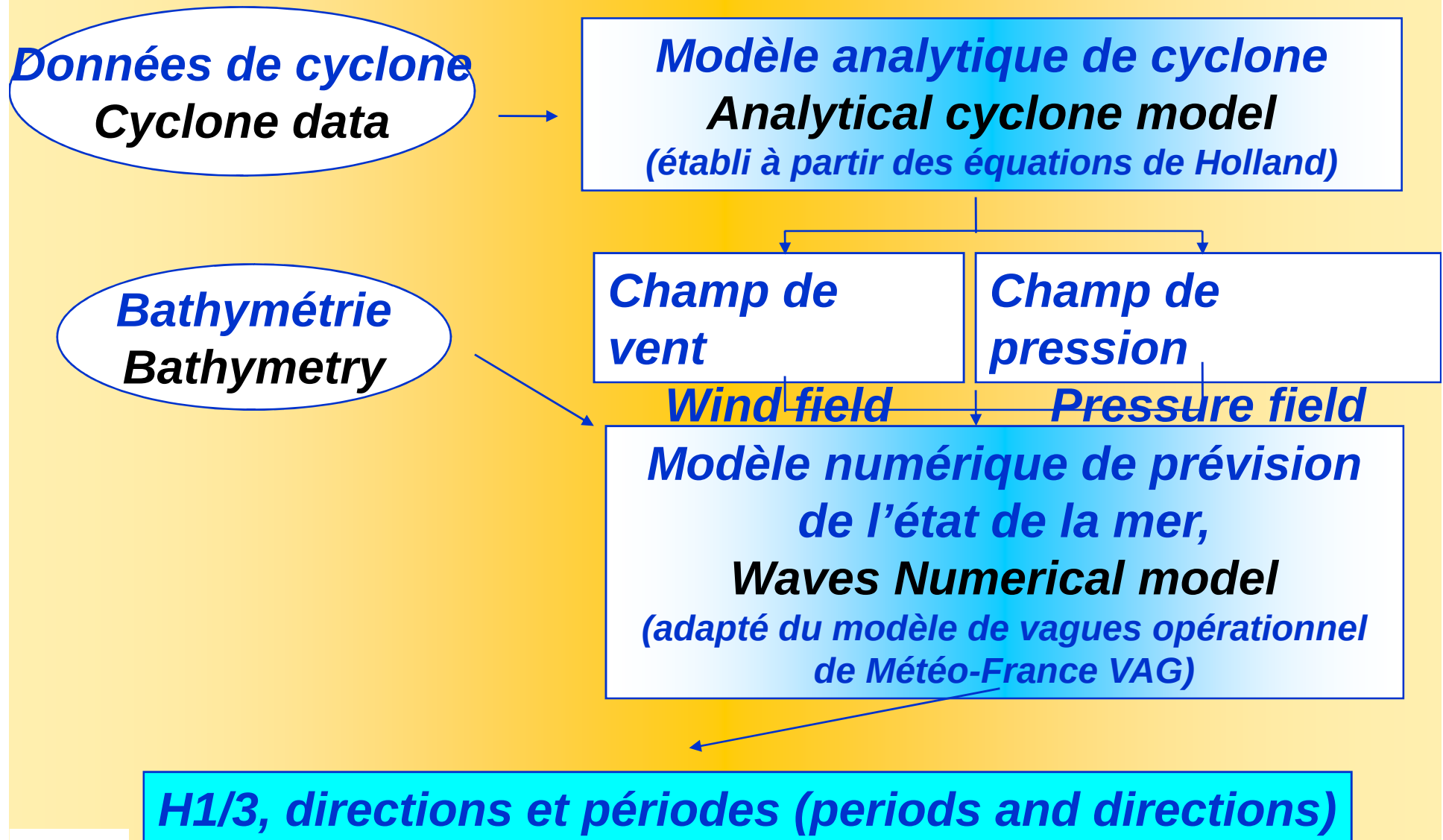
MF-WAM Model – Spatial Resolution $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ - Domain e REU
Assimilation – 2 Runs per day – 0h -> 84h



Operational swell models and Cyclone

- *Les modèles de vague simulent bien l'évolution de la mer du vent et de la houle*
- *C'est la représentation du champ de vent en entrée du modèle de vagues qui est primordiale*
- *La bonne représentation de la taille de l'extension des vents forts semble plus importante plus que celle de l'intensité au cœur du système*
- *Assez bon comportement des modèles sur la prévision de la houle cyclonique (chronologie, hauteur)*
- Swell models correctly simulate the evolution of waves and swell
- Good representation of wind shield is fundamental for good prediction
- Strong winds extent seems more important than system intensity inner
- Operational models forecast fairly well cyclonic swell (timing and height)

Cyclone swell model - Organization chart



Storm surge forecast models

Dans les régions comme les Tropiques, où les mesures sont quasi inexistantes, on a recours aux modèles dynamiques.

In the Tropics, where not so much measures are available, we have to use dynamical models.

Les modèles dynamiques

Coûteux en temps de calcul, mais il est possible d'effectuer des prévisions de surcote partout sur une côte.

Run time is longer, but it's possible to do forecast everywhere on a coast.

Avec l'apparition de stations de travail puissantes, ce type de modèle peut être utilisé de façon autonome dans les centres de prévision opérationnels.

Advent of powerful workstations has opened the possibility of direct use of dynamical models in operationnel centres.

Météo-France a installé ce type de modèle aux Antilles (1993), en Nouvelle-Calédonie (1994), en Polynésie française (1995) et à La Réunion (1996).

Validations

Ce modèle a été testé sur des cyclones tropicaux qui ont donné des surcotes significatives dans les territoires français d'Outre-Mer pendant les 15 dernières années.

This model has been tested on tropical cyclones with significant surges over the last 15 years in the DOM.

La qualité des prévisions dépend fortement de la qualité du forçage atmosphérique et donc de la précision sur la trajectoire du cyclone.

The quality of the forecasts strongly depend on the quality of the atmospheric forcing and then on the precision of the cyclone track.

Dans le cas d'île ayant une barrière proche des côtes, l'effet des vagues contribue notablement à l'élévation du niveau de la mer. Il s'agit du remplissage du lagon par le déferlement des vagues sur le récif.

In case of islands with a reef close to the coasts, waves effect particularly contribute to the elevation of the sea level. Lagoon is filled up by the waves breaking on the reef.

L'amélioration future de ce système de prévision passe par le couplage avec un modèle de vague.

Il est également souhaitable de prendre en compte l'impact des précipitations pour des îles comme La Réunion, où elles sont très importantes.

Model useages (1)

en mode temps réel (real time use)

- *Lancement automatique du modèle à partir d'une interface selon la trajectoire analysée et prévue par les prévisionnistes*

Inputs : cyclone positions, minimal pressure, analysed and forecasted wind radii.

- *Runs du modèle sur des domaines prédéfinis touchés par la trajectoire*

Model runs on predefined areas impacted by the cyclone

- *En sortie, cartes prévues*
 - *vent et pression atmosphérique*
 - *élévation du niveau de la mer et de courants*
 - *surcotes max*
 - *séries temporelles d'élévation sur différents sites prédéfinis*

Outputs :

- *wind and pressure*
- *currents and sea level elevation*
- *max storm surge*
- *temporal series of elevation in chosen stations.*

Une simulation de 24 heures sur une station de travail prend quelques minutes.

Model useages (2)

En mode climatologique

- *Consiste à effectuer un grand nombre de simulations représentatives de la majorité des cyclones possibles pour obtenir une cartographie des zones à risque.*
Several runs to represent the different cyclones and then to draw a risk map.
- *Résultats des simulations accessibles dans une base de données.*
Results available in a data base
- *Les prévisionnistes disposent ainsi d'une connaissance immédiate des surcotes pour un certain nombre de cas représentatifs.*
Forecasters have then the measure of the storm surges for representative cases.

L'incertitude sur la prévision de trajectoire des cyclones rend délicate l'utilisation du modèle en mode temps réel. En effet, lorsqu'un cyclone aborde une côte, une petite variation de la trajectoire entraîne une grande variation de la répartition spatiale des surcotes.

FIN