

Houle Cyclonique et Onde de tempête

Cyclonic swell and Storm Surge

Adrien Colomb

Prévisionniste Cyclone
TC Forecaster

06.09.2017

RSMC La Réunion



Plan Général

General Outline

I. Houle Cyclonique – *Cyclonic swell*

- 1. Houle : rappels théoriques – *Swell : theory***
- 2. Le cas cyclonique – *The cyclone case***
- 3. Prévisions – *Forecast***

II. Surcote Cyclonique – *Cyclonic storm surge*

- 1. Définition – *Definition***
- 2. Mécanismes – *Processes***
- 3. La prévision – *Forecast***

Houle Cyclonique

Cyclonic swell



Le cyclone Colina au Port en Janvier 1993

Tropical Cyclone Colina, Reunion Island, January 1993

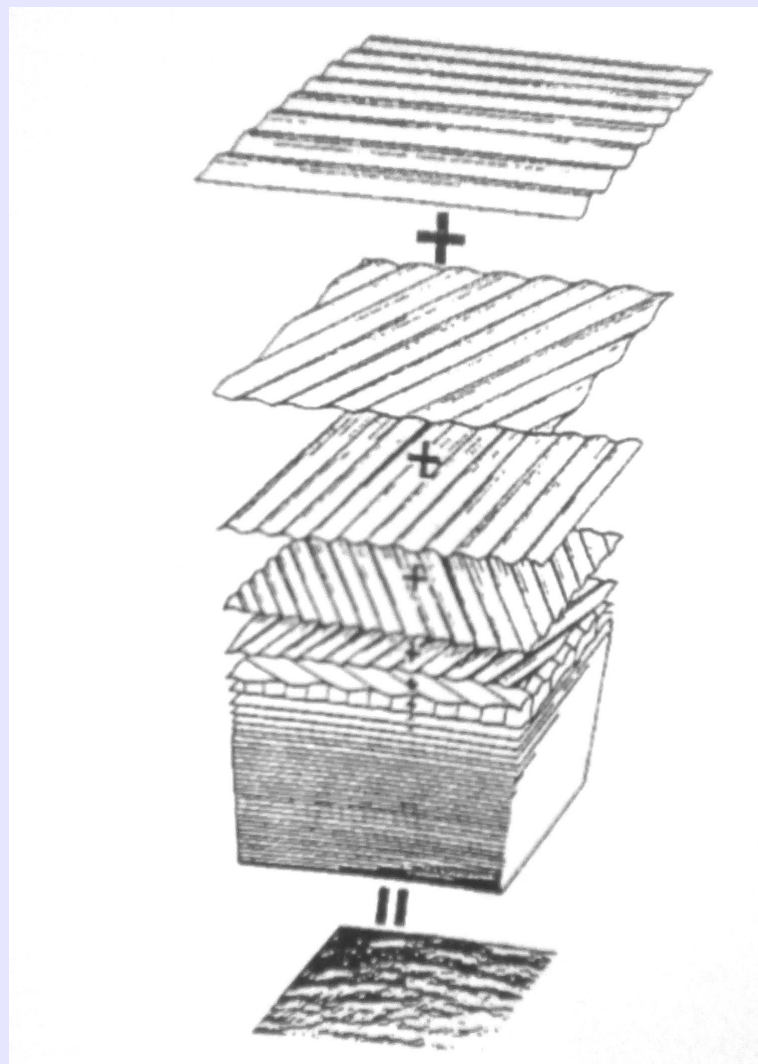
Introduction

Introduction

*Houle
Swell*

État de la Mer
=
Superposition d'ondes
sinusoïdales

Théorie linéaire
d'Airy



*Total sea state
=
Sinus waves overlay*

Linear theory of
Airy

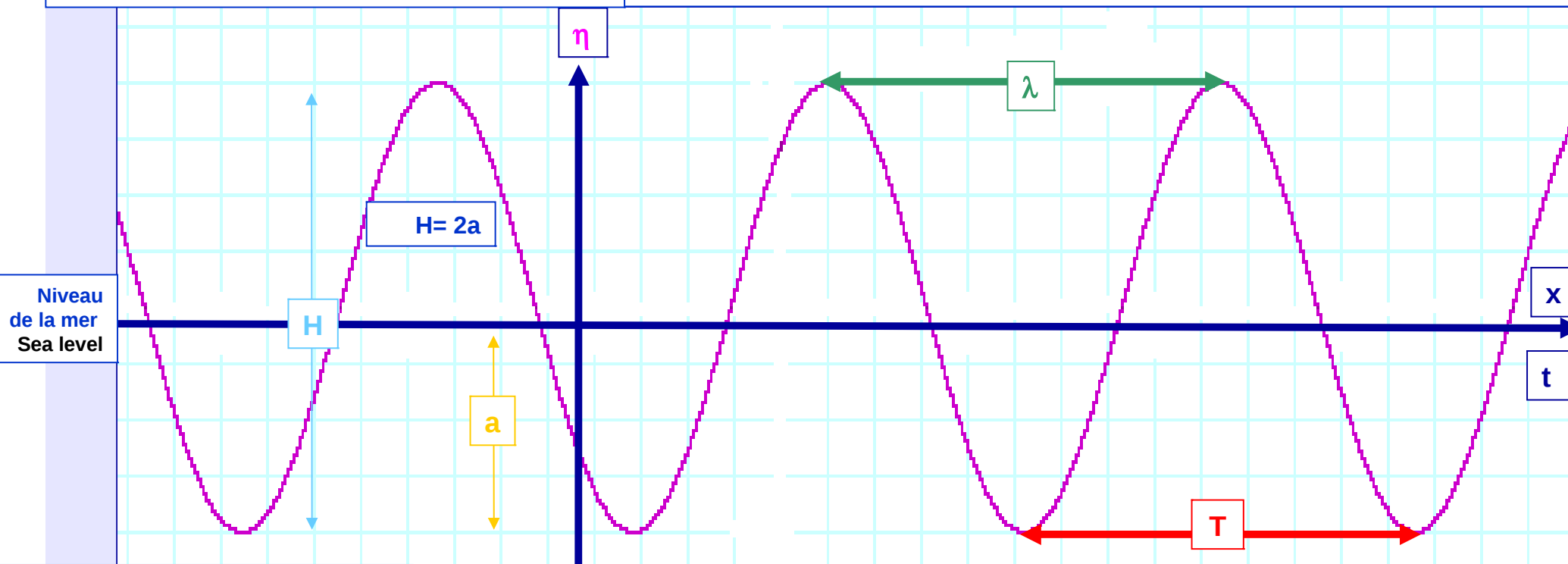
Introduction

Introduction

Houle
Swell

Une vague peut-être décrite à l'aide
d'une onde sinusoïdale de la forme :
 $\eta(x, t) = a \sin(kx - \omega t)$

$c = \lambda / T$: 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.



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.

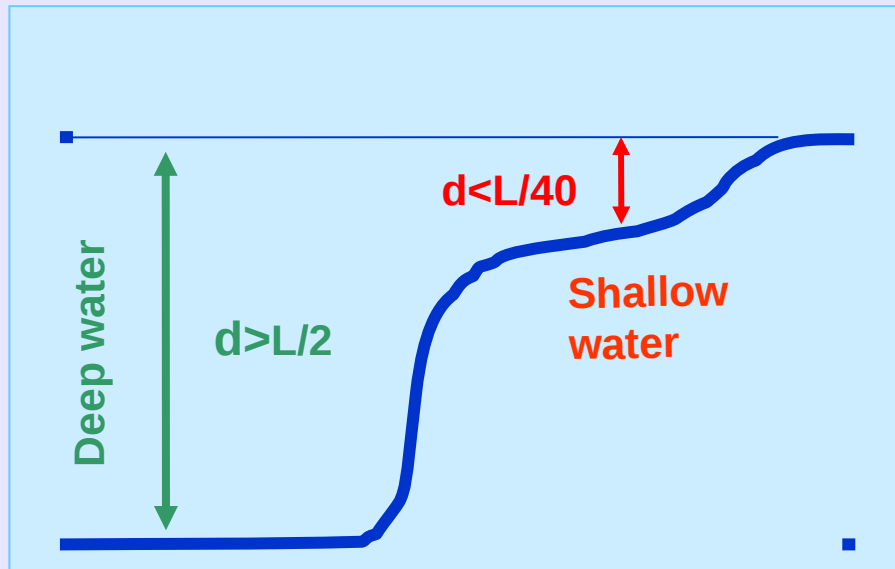
λ = $2\pi/k$: longueur d'onde :
distance horizontale entre 2
crêtes successives.

λ : wavelength : horizontal
distance between 2
successive crests.

Introduction

Introduction

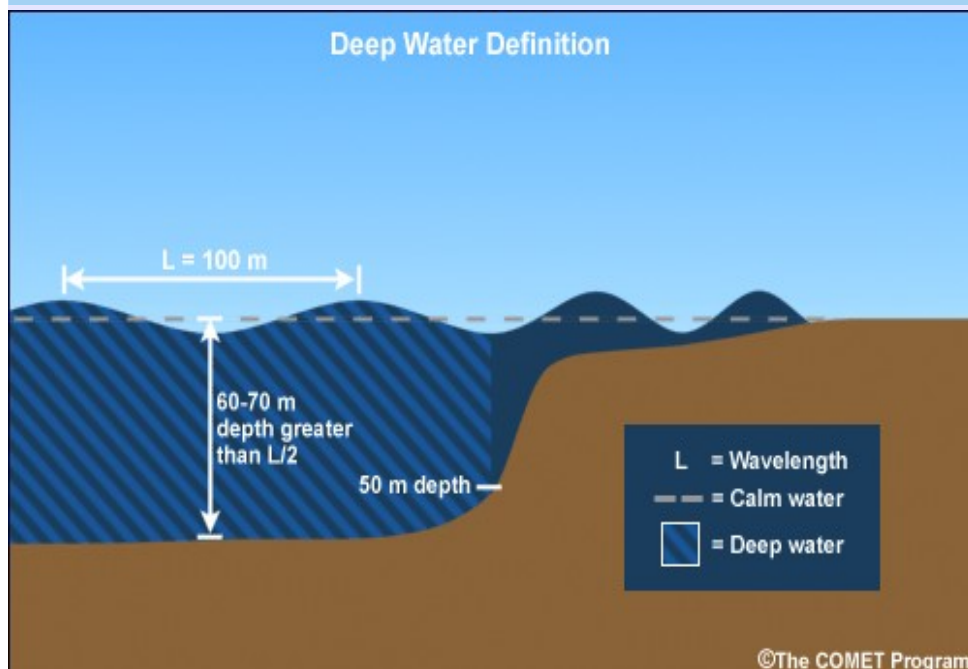
Houle
Swell



- 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*

Eau profonde Deep Water

Houle
Swell



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

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

$$c \approx T * 3.03$$

$c \propto \lambda$: 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.

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

$$c \approx T * 3.03$$

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

Steps:

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

$$2) c \approx \sqrt{\frac{gL}{2\pi}} (1)$$

$$3) c \approx \sqrt{\frac{gL}{2\pi}}$$

where:

C = Wave Speed (m/s)

g = gravity = 9.8 (m/s²)

L = wavelength (m)

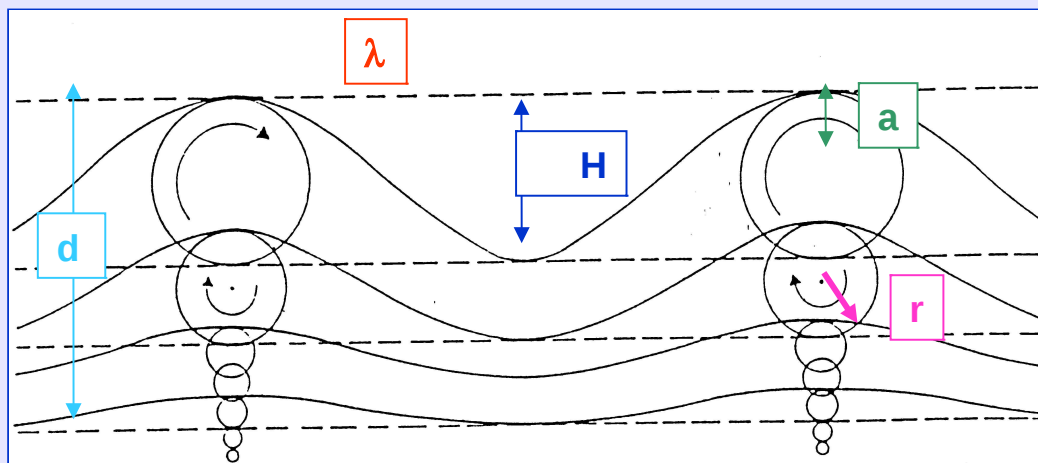
π = 3.14159

$\tanh$ = hyperbolic tangent

h = water depth (m)

Eau profonde Deep Water

Houle Swell



Le mouvement des particules est décrit par des trajectoires circulaires, dont le diamètre diminue très rapidement avec la profondeur.

Movement of particles of water is circular and diameter very quickly decreases with the depth.

Plus l'onde est longue plus elle a des répercussions profondes.

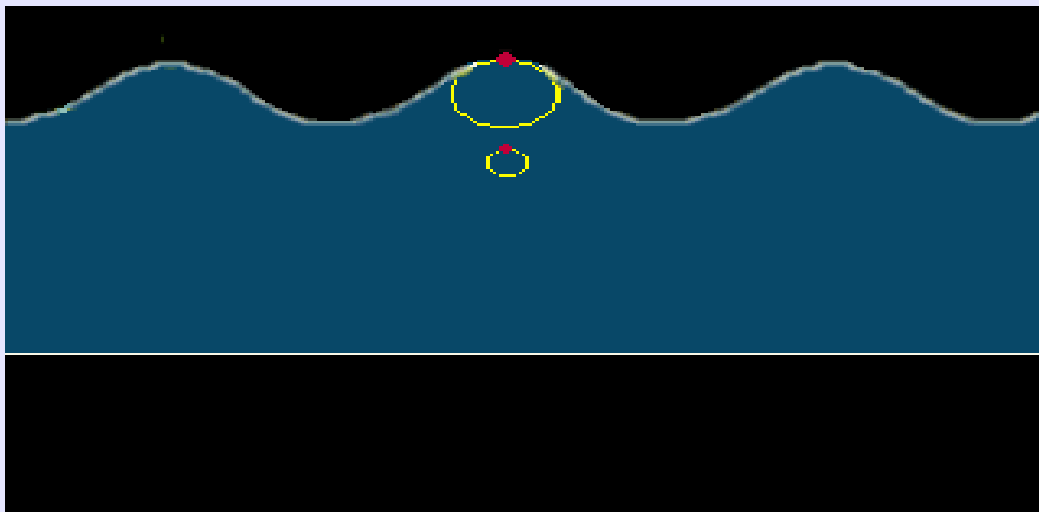
The longer the wavelength, the deeper the impact of the wave.

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.

Eau profonde *Deep Water*

Houle Swell



Le mouvement des particules est décrit par des trajectoires circulaires, dont le diamètre diminue très rapidement avec la profondeur.

Movement of particles of water is circular and diameter very quickly decreases with the depth.

Plus l'onde est longue plus elle a des répercussions profondes.

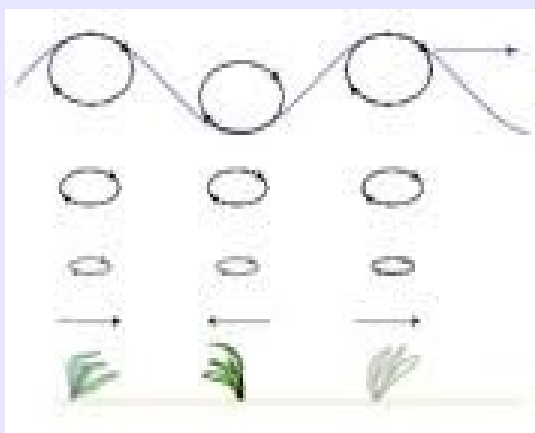
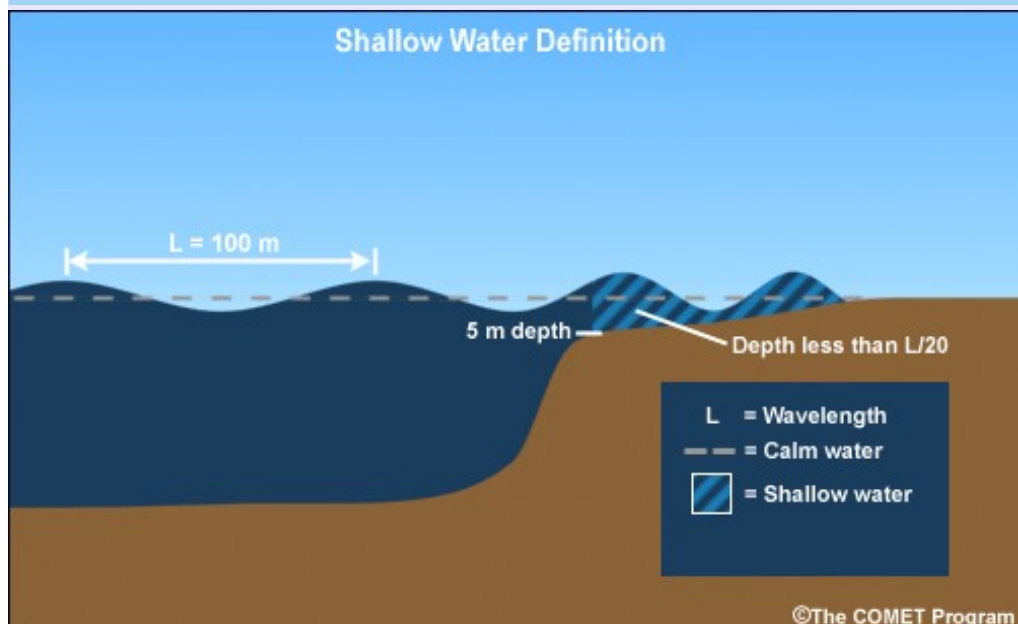
The longer the wavelength, the deeper the impact of the wave.

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.

Eau peu profonde Shallow Water

Houle
Swell



- 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*

Éléments théoriques

Theory elements

Houle
Swell

- 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) :

$$E \propto H^2$$

- 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)*

$$E \propto H^2$$

- *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* $C_g = C$

Éléments théoriques

Theory elements

**Houle
Swell**

- La puissance de la houle par unité de longueur de front d'onde est donnée par la formule :

$$P \approx E \cdot c_g \text{ (kW/m)}$$

$$P = \frac{\rho \cdot g^3}{64 \cdot \pi} \cdot H_s^3 \cdot T$$

$$P = \frac{1}{2} \cdot H_s^2 \cdot T \text{ (kW/m)}$$

- *The power of the swell by wave front length unit is given by the following formula :*

- La période des vagues se conserve **TOUJOURS** même au moment du levage près de la côte

- *Wave period is ALWAYS conserved, even during shoaling near the coasts*

Cycle de vie des vagues

Wave life cycle

Houle
Swell

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

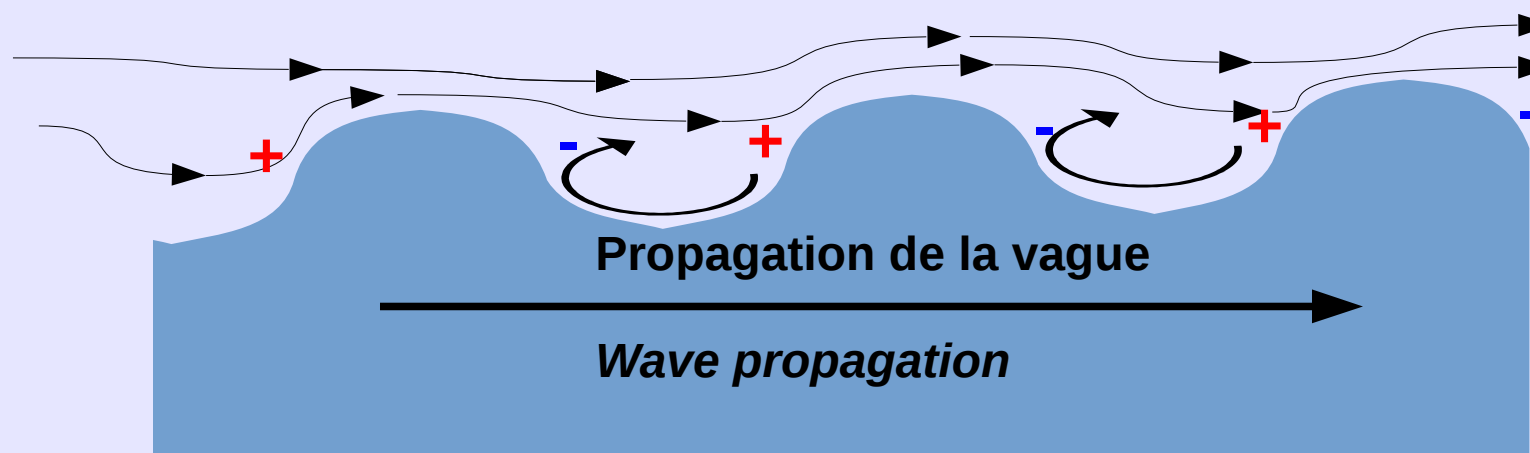
- à l'intérieur de la zone génératrice
- aspect chaotique
- direction de propagation proche de celle du vent

WAVES

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

Cycle de vie des vagues *Wave life cycle*

*Houle
Swell*



Hypothèse de Jeffrey : Les risées produites par le vent s'amplifient par un phénomène de différences de pression entre les faces au vent et sous le vent de la vague

Jeffrey hypothesis : *the ripples produced by the wind are growing thanks to a pressure differential between the on-side and lee-side of the wave*

Cycle de vie des vagues

Wave life cycle

Houle
Swell

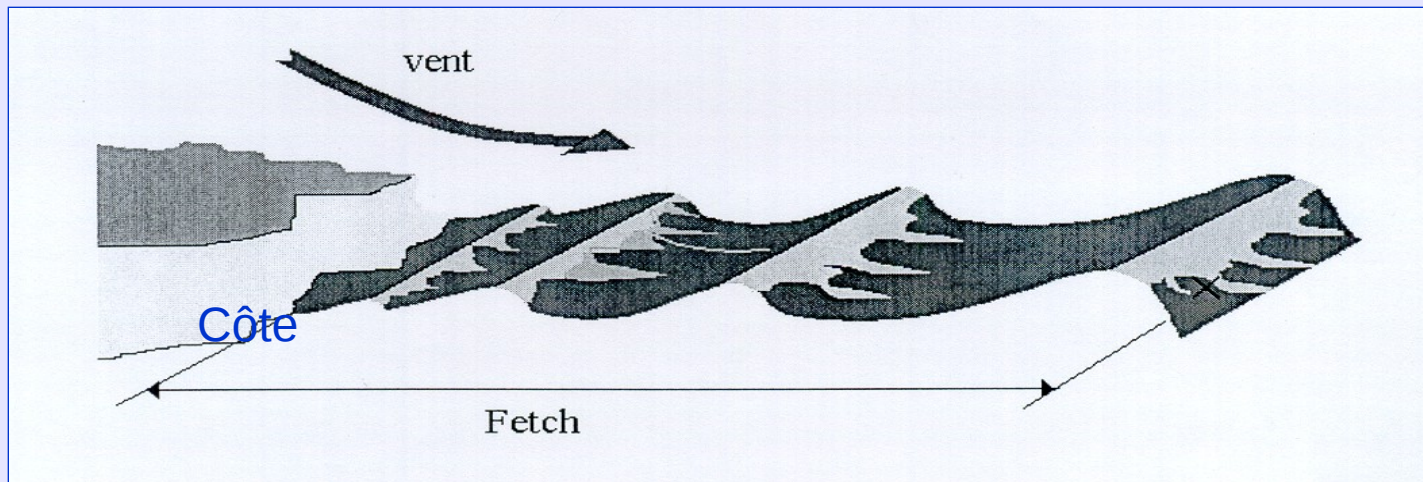
DUREE d'ACTION : temps pendant lequel le vent souffle sur l'aire génératrice.

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.

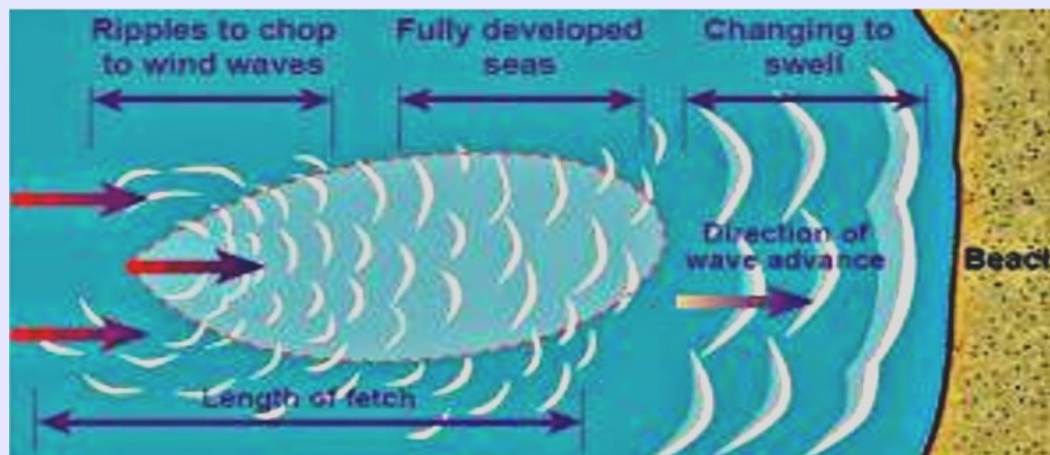
Fetch : length of the generating area in the direction of the wind.

H1/3 : hauteur significative : hauteur moyenne du tiers des vagues les plus hautes.

H1/3 : significant wave height, the average height of the 1/3 highest waves.

Cycle de vie des vagues *Wave life cycle*

*Houle
Swell*



Naissance de la houle *Swell formation*

Croissance sans contraintes : Pour atteindre l'état de mer développée (à l'équilibre, plus de croissance possible), il faut que le fetch soit assez grand et que la durée d'action du vent soit assez longue

Growth free of constraints : To reach the fully developed seas stage (no more wave growth, balance with the wind), the fetch needs to be large enough and the wind needs to blow long enough

Cycle de vie des vagues

Wave life cycle

Houle
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*

Cycle de vie des vagues *Wave life cycle*

**Houle
Swell**



- 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 phenomena.*

Cycle de vie des vagues

Wave life cycle

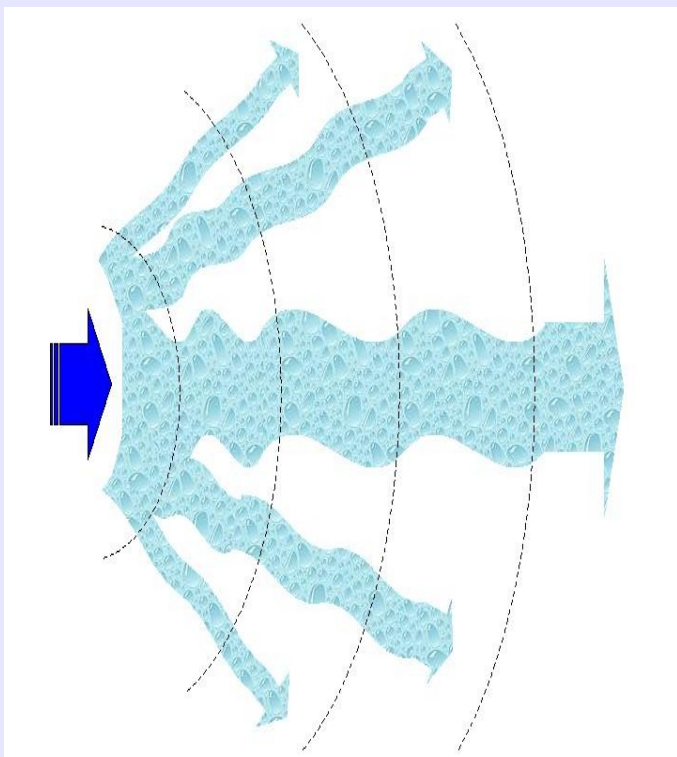
**Houle
Swell**

- Dissipation de l'énergie relativement faible. Elle est principalement dûe à :
 - Dissipation visqueuse
 - Frottement de l'air (vent dans le sens contraire)
 - Interaction avec le fond
 - Déferlement
- *Energy dissipation is relatively weak. It is mainly due to :*
 - *Viscous friction*
 - *Air friction*
 - *Bottom interactions*
 - *Wave breaking*

Cycle de vie des vagues

Wave life cycle

**Houle
Swell**

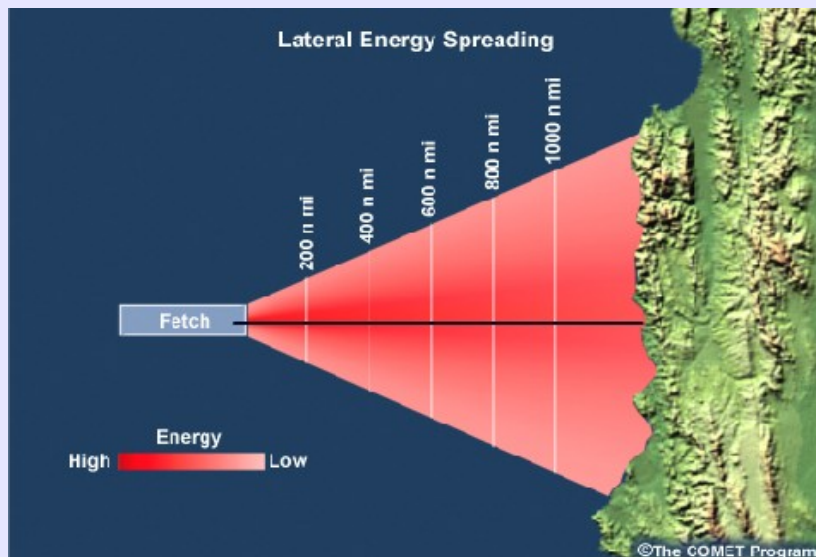


- La dispersion de l'énergie a pour effet de répartir une même énergie sur une étendue plus vaste.
- Il en résulte donc une diminution de la quantité d'énergie par unité de surface et donc une diminution de la hauteur des vagues.
- *Dispersion of energy : distributes a same energy over a wider area.*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

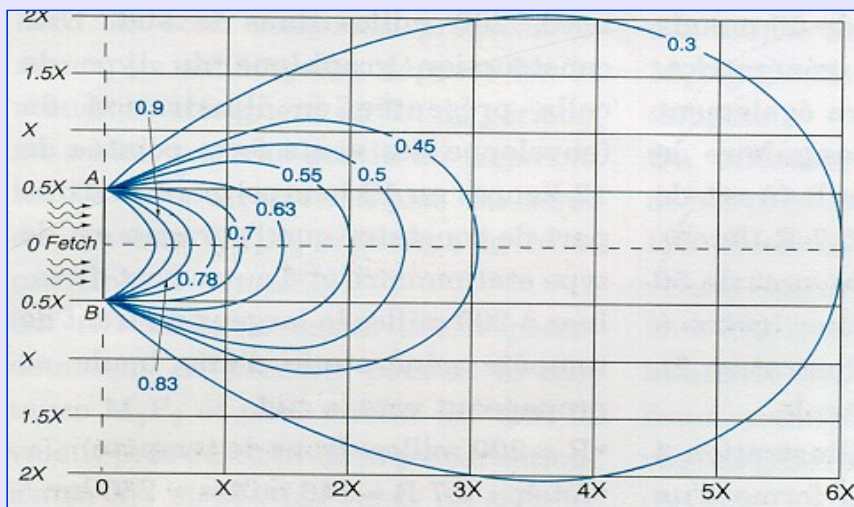
Cycle de vie des vagues

Wave life cycle

Houle
Swell



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

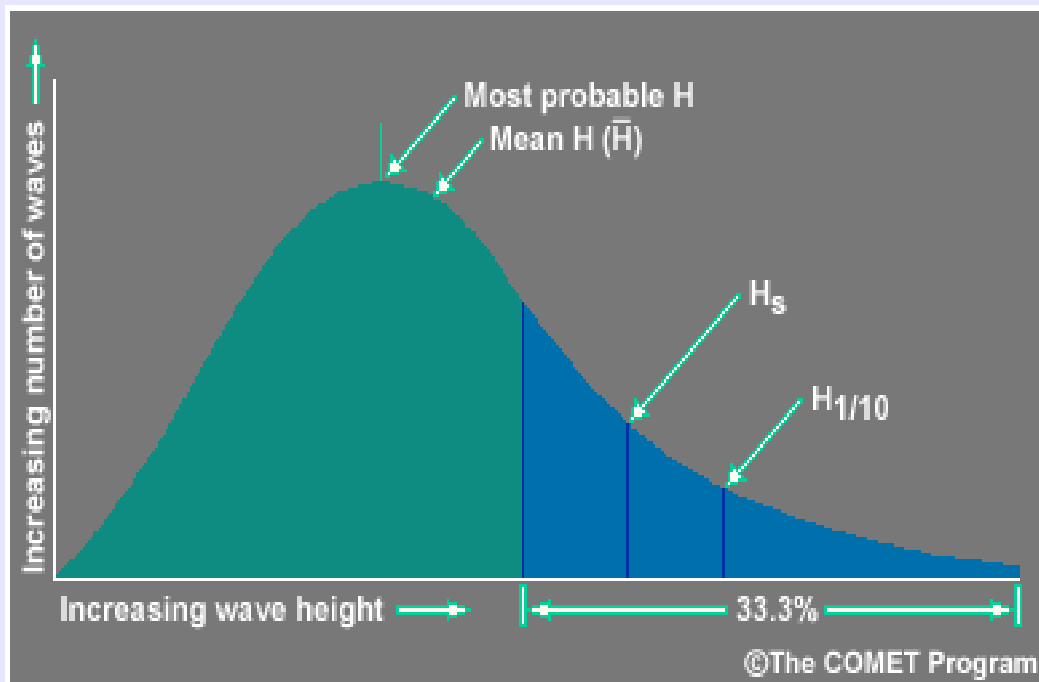


A une distance de la tempête égale à 6 fois sa largeur, la hauteur de la houle n'est plus que de 0.3 fois la hauteur générée.

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

Hauteur significative *Significant height*

*Houle
Swell*



Mean H = Hauteur de vagues moyennes

$H_s = H_{1/3}$ = Hauteur significative

$H_{1/10}$ = Hauteur moyenne du dixième des vagues les plus hautes

Mean H = Average wave height

H_s or $H_{1/3}$ = Significant wave height

$H_{1/10}$ = Highest one-tenth wave height

Hauteur significative *Significant height*

Houle
Swell

$H_{1/3}$ 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 $H_{1/3}$.

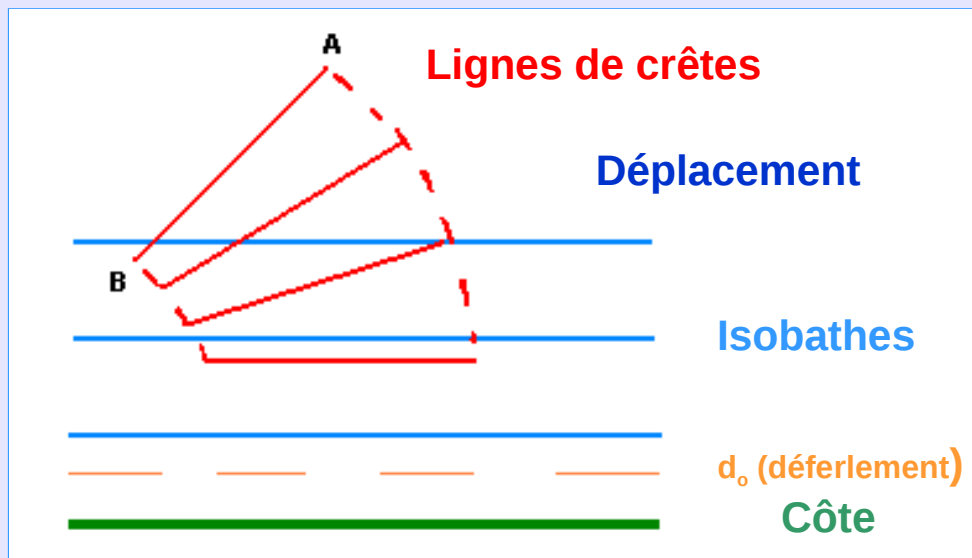
Processus côtiers

Coastline processes

Houle
Swell

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.



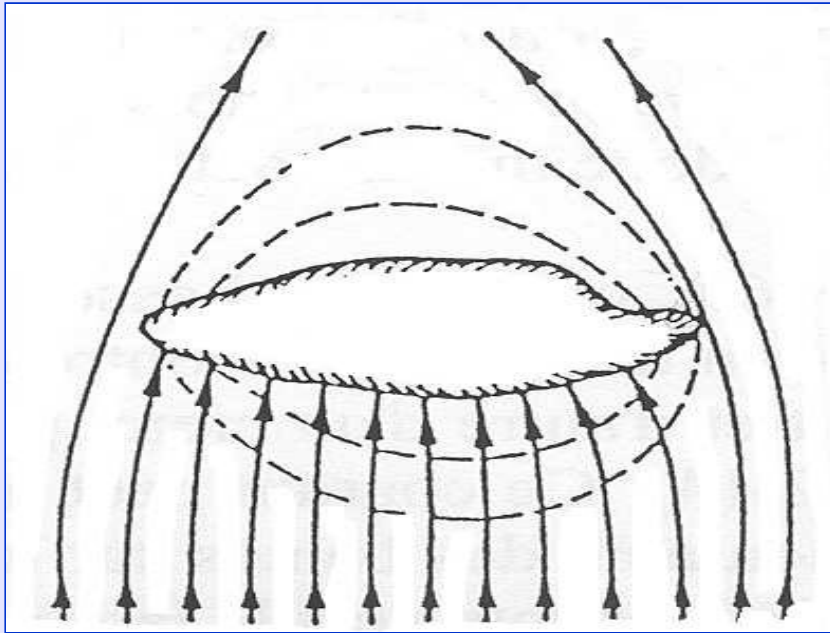
La crête AB est freinée sur sa partie droite de façon plus sensible que sur sa partie gauche. Elle va donc pivoter pour se présenter progressivement parallèle au rivage, jusqu'à une profondeur d_0 , où se produit le déferlement.

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 .

Processus côtiers

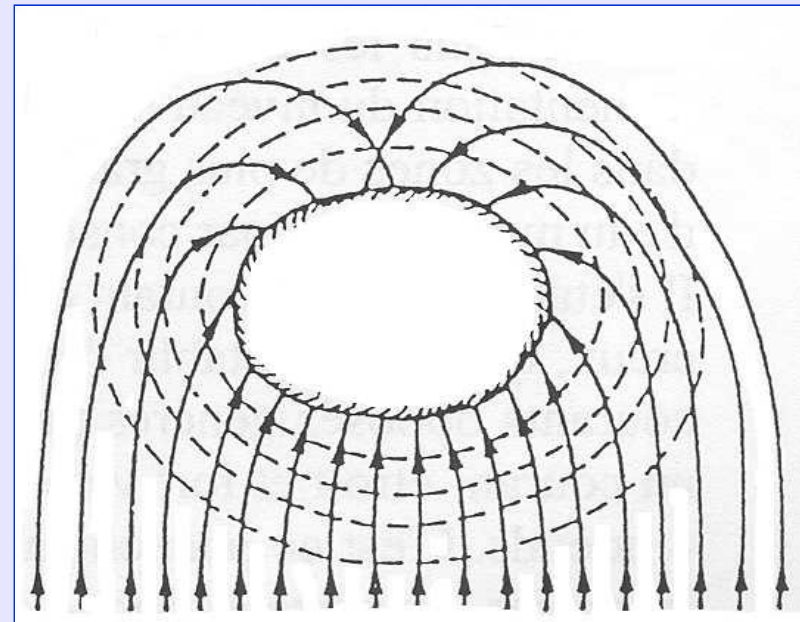
Coastline processes

Houle
Swell



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.



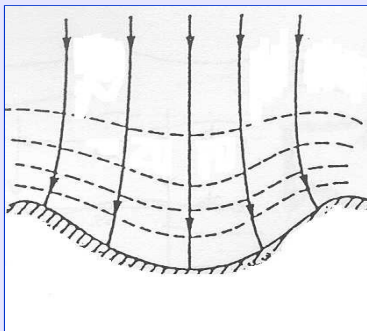
Ile à bords arrondis et pente sous-marine douce : réfraction tout autour. Les vagues interfèrent sous le vent et peuvent atteindre une grande hauteur.

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

Processus côtiers

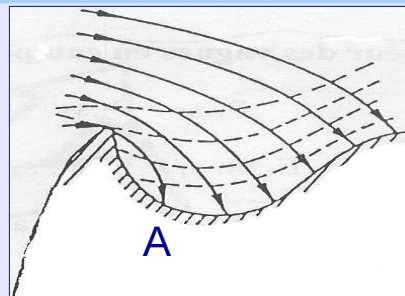
Coastline processes

Houle
Swell



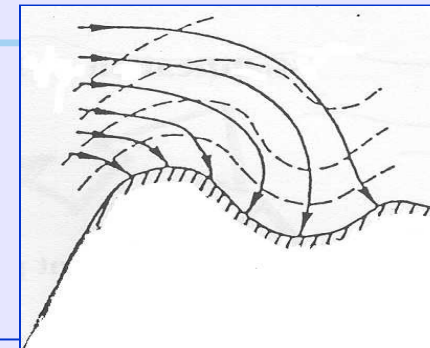
Peu de déviation vers l'extérieur.

Small deviation towards the exterior



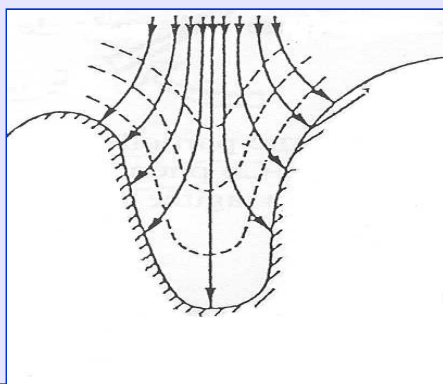
Vagues dépassant le cap pointu sans réfraction importante. Déferlement à partir de A

Waves passing the pointed cape without big refraction ; breaking starts at A point.



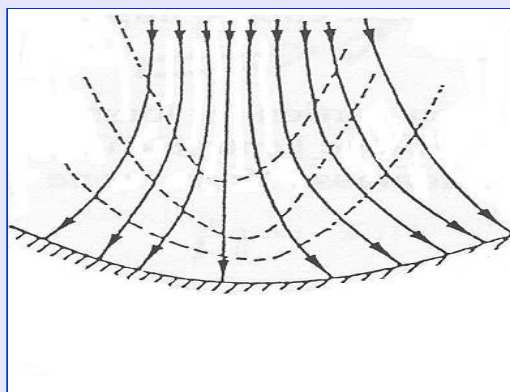
Avec un cap arrondi, les vagues déferlent sur toute la côte.

With the rounded cape, waves break on all the coast.



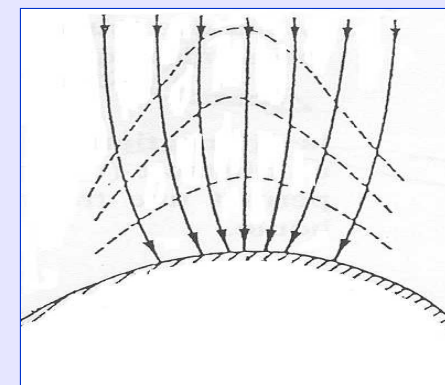
Crêtes de plus en plus étirées au fur et à mesure que les vagues pénètrent dans le goulet.

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.



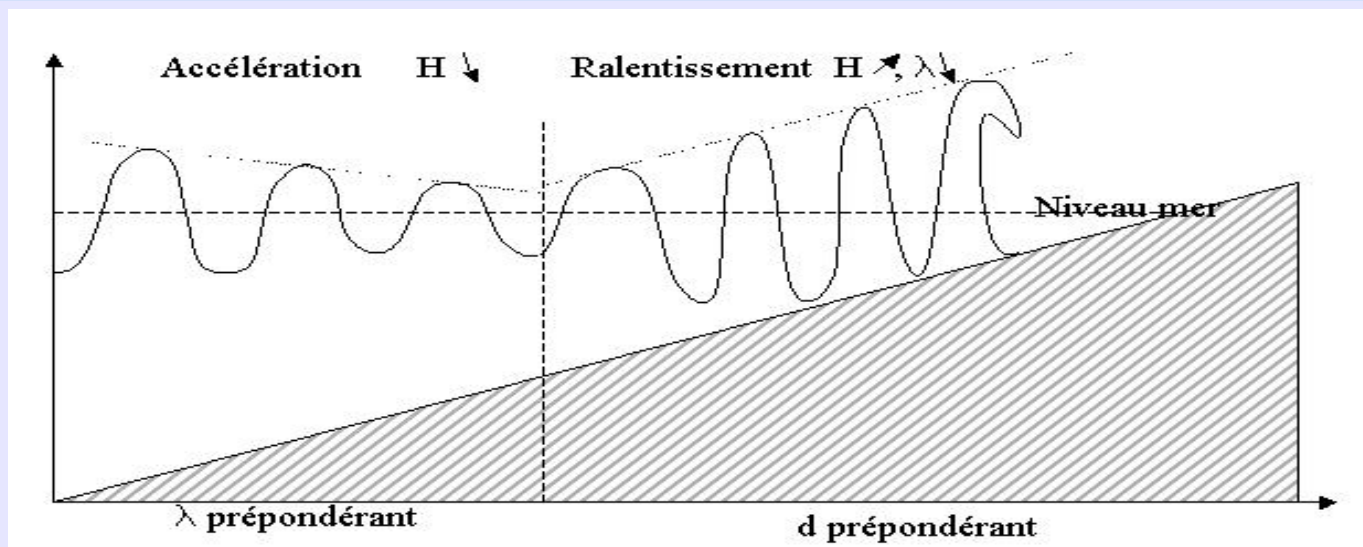
Réfraction vers l'intérieur de la crête sous-marine ; augmentation du déferlement.

Refraction towards the submarine crest ; increase of the breaking.

Processus côtiers

Coastline processes

Houle
Swell



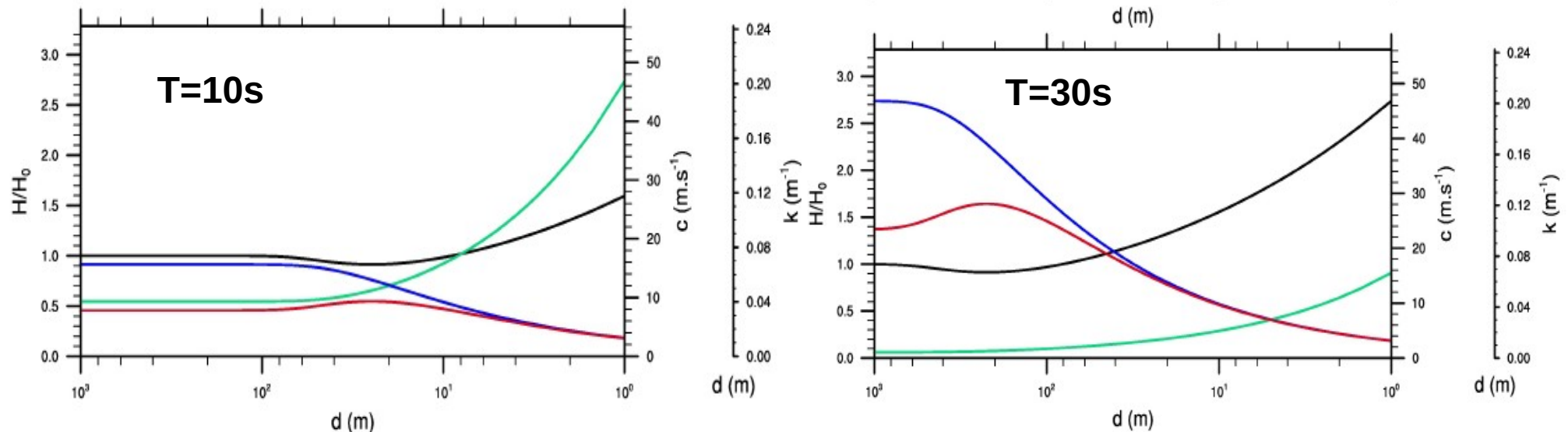
- Le flux d'énergie perpendiculaire à la côte est constant.
- En eau intermédiaire, la vitesse de groupe augmente ($c_g \propto c$) > H diminue.
- En eau peu profonde, $c_g = c \propto \sqrt{d}$. La vitesse diminue > H augmente avant déferlement
- Ceci explique les surélévations dévastatrices qui surviennent 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
- This phenomena explains devastating elevations in tsunamis.

Processus côtiers

Coastline processes

Houle
Swell



Coefficients de levage (noir), vitesses de phase (bleu) et de groupe (rouge), nombre d'onde (vert), pour des ondes de période $T = 10$ s (haut) et $T = 30$ s (bas).

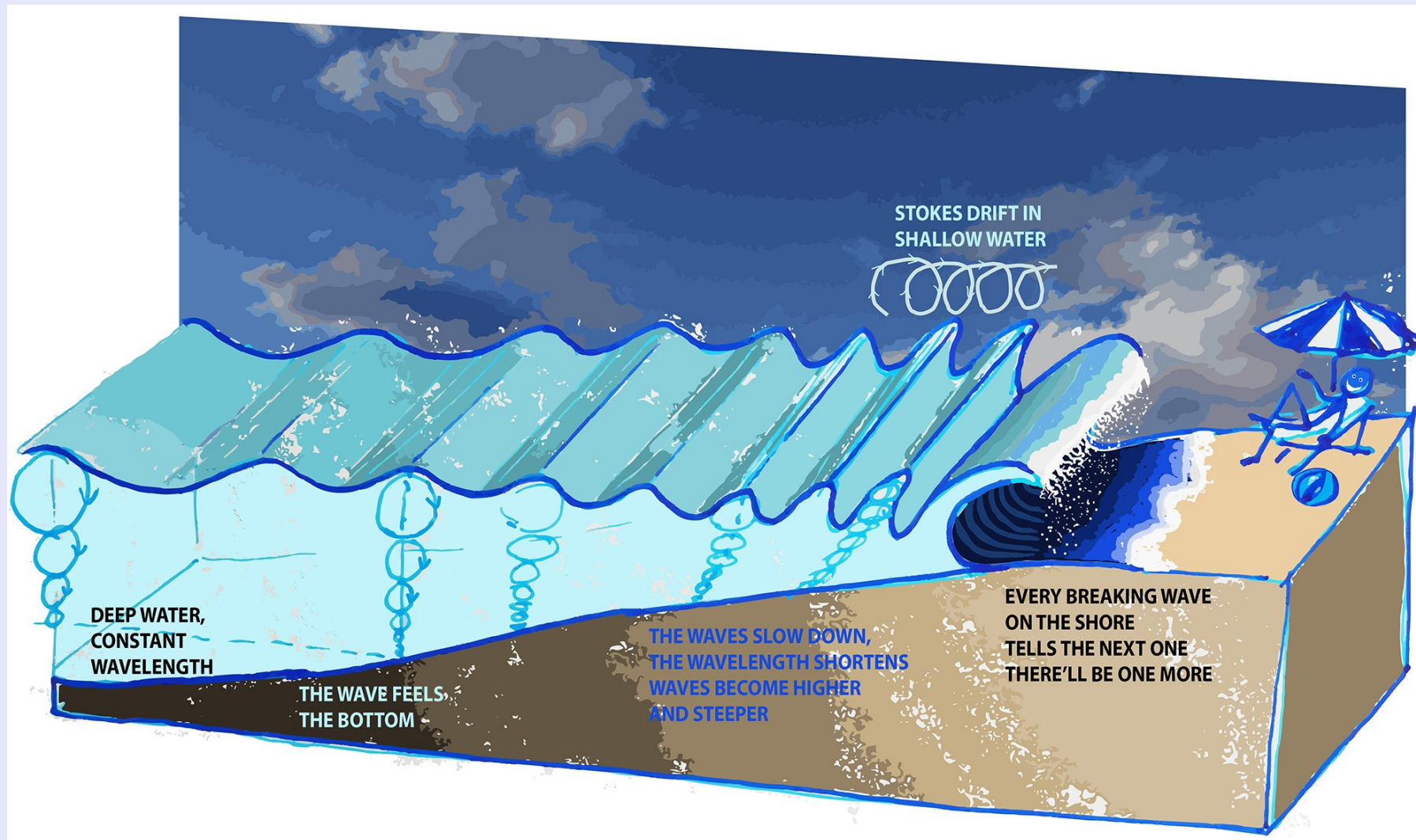
- Importance de la période des vagues
- Plus T est grand, plus le levage est important

- The swell period matters !
- The greater the wave period, the greater the shoaling

Processus côtiers

Coastline processes

Houle
Swell



Processus côtiers *Coastline processes*

**Houle
Swell**



Spilling

Plunging

Surging

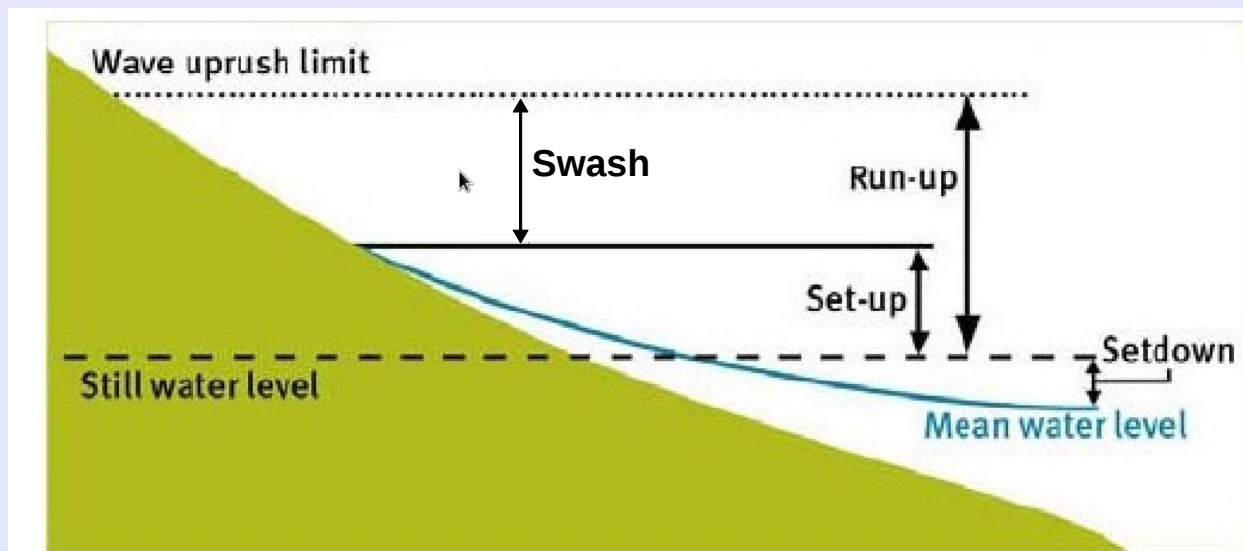
Types de déferlement
Types of breakers

Processus côtiers

Coastline processes

Houle
Swell

- 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*



Le cas des cyclones tropicaux

Tropical cyclones

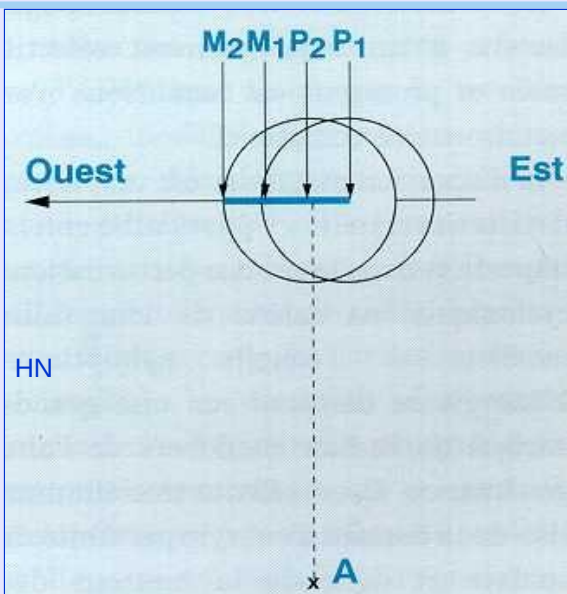
**Houle
Swell**

- 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.

Le cas des cyclones tropicaux

Tropical cyclones

Houle
Swell



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

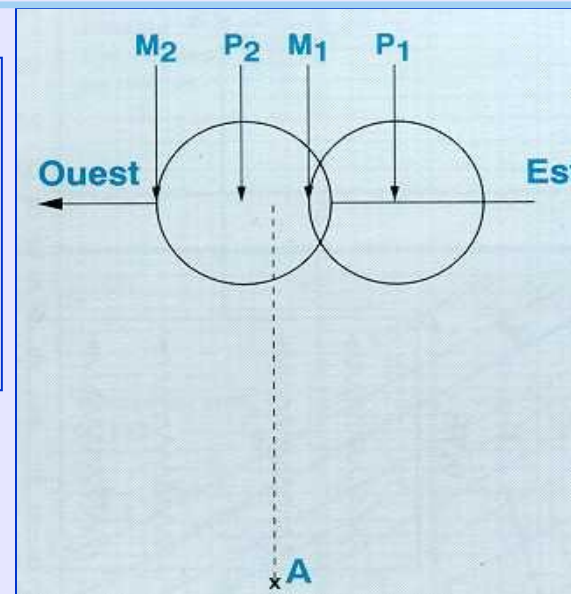
The cyclone capability to generate heavy swell in an other direction than its propagation depends on its size, its intensity and its speed.

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.

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



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

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.

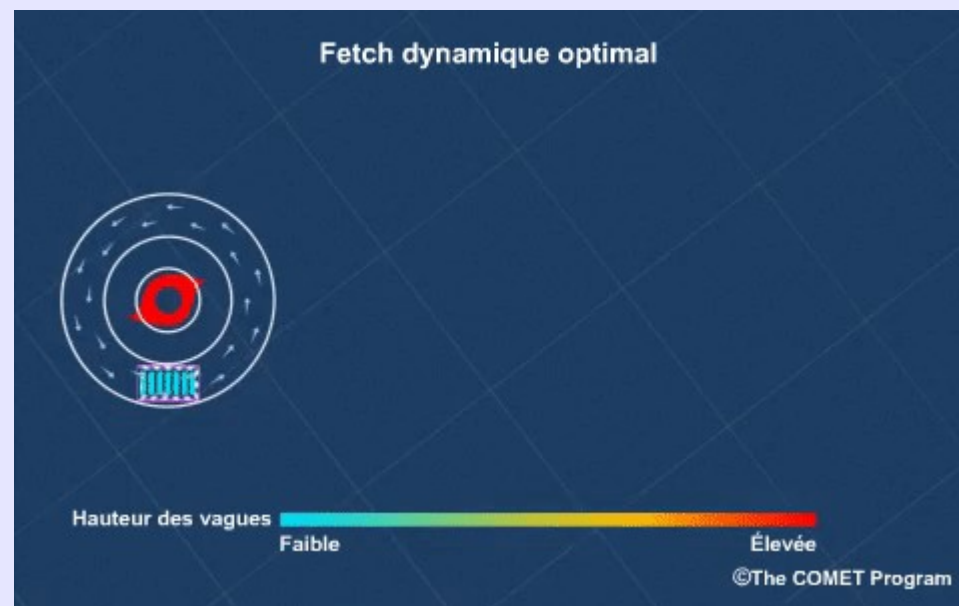
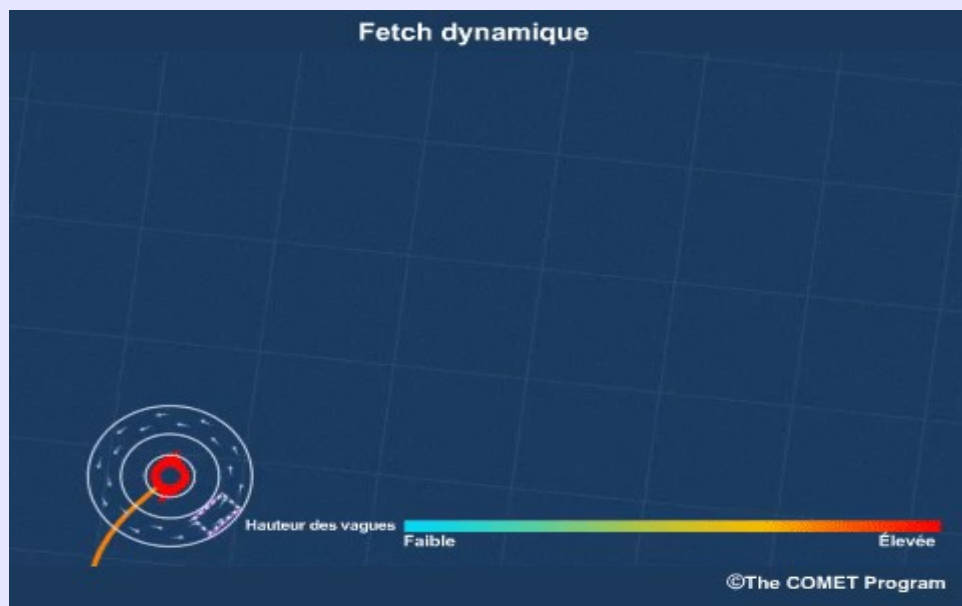
Quick track : northerly winds quickly become southerly winds et do not have time to generate swell able to reach point A.

Le cas des cyclones tropicaux

Tropical cyclones

*Houle
Swell*

Le fetch « dynamique » *Dynamic fetch*

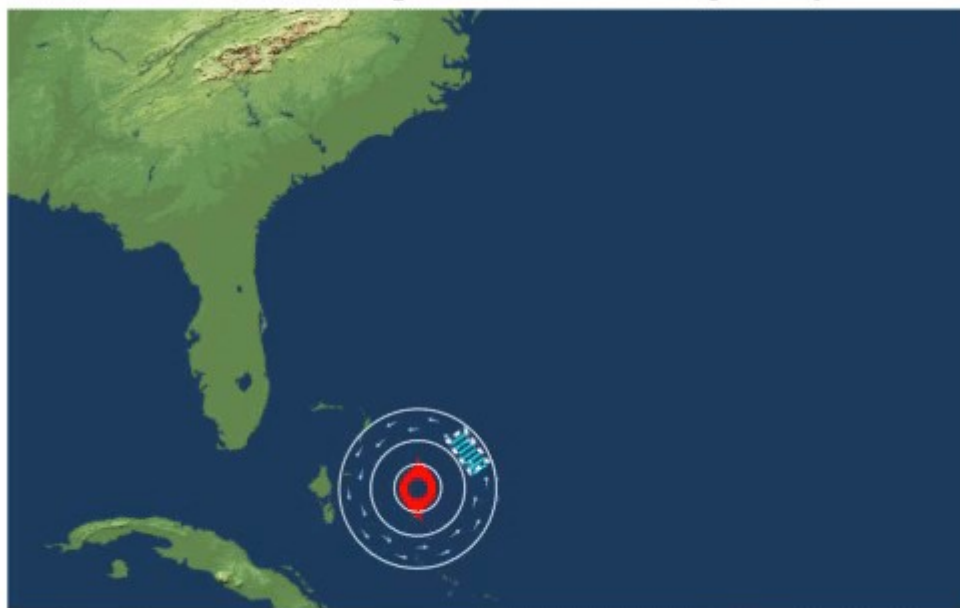


Le cas des cyclones tropicaux

Tropical cyclones

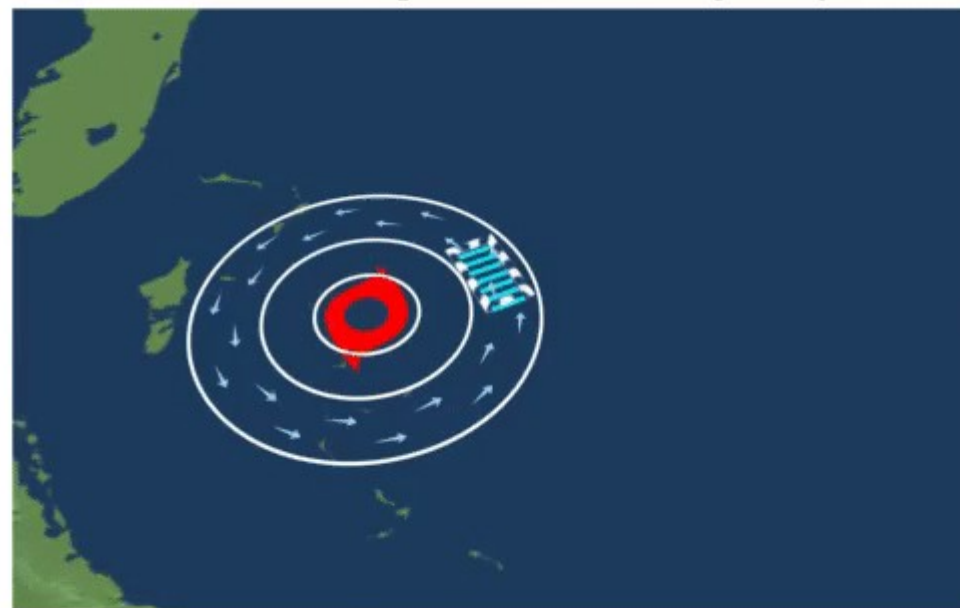
**Houle
Swell**

Croissance des vagues dans un fetch dynamique



Hauteur des vagues Faible Élevée
©The COMET Program

Croissance des vagues dans un fetch dynamique

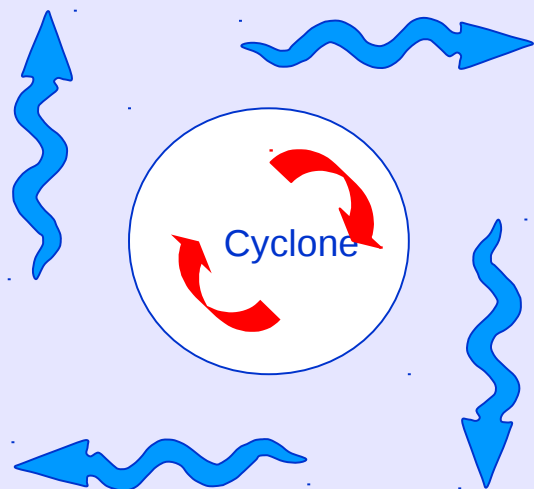


Hauteur des vagues Faible Élevée
©The COMET Program

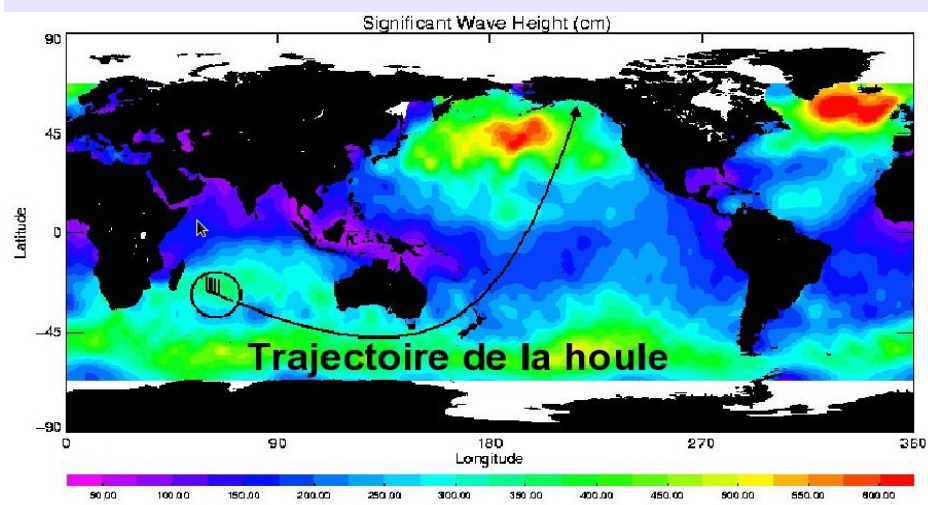
Le cas des cyclones tropicaux

Tropical cyclones

**Houle
Swell**



- 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



- *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..*

Le cas des cyclones tropicaux

Tropical cyclones

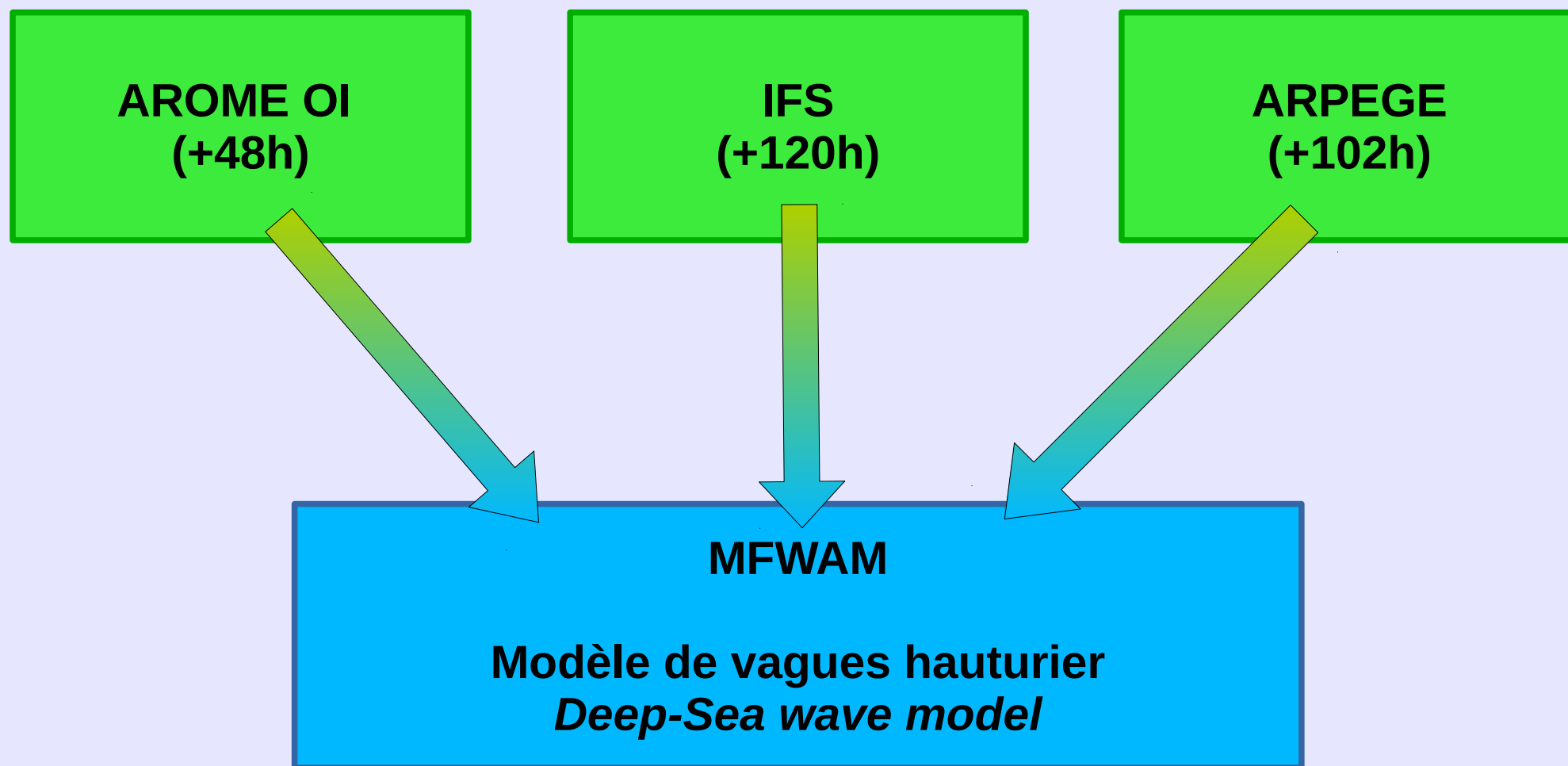
**Houle
Swell**

- **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.*

Prévision numérique

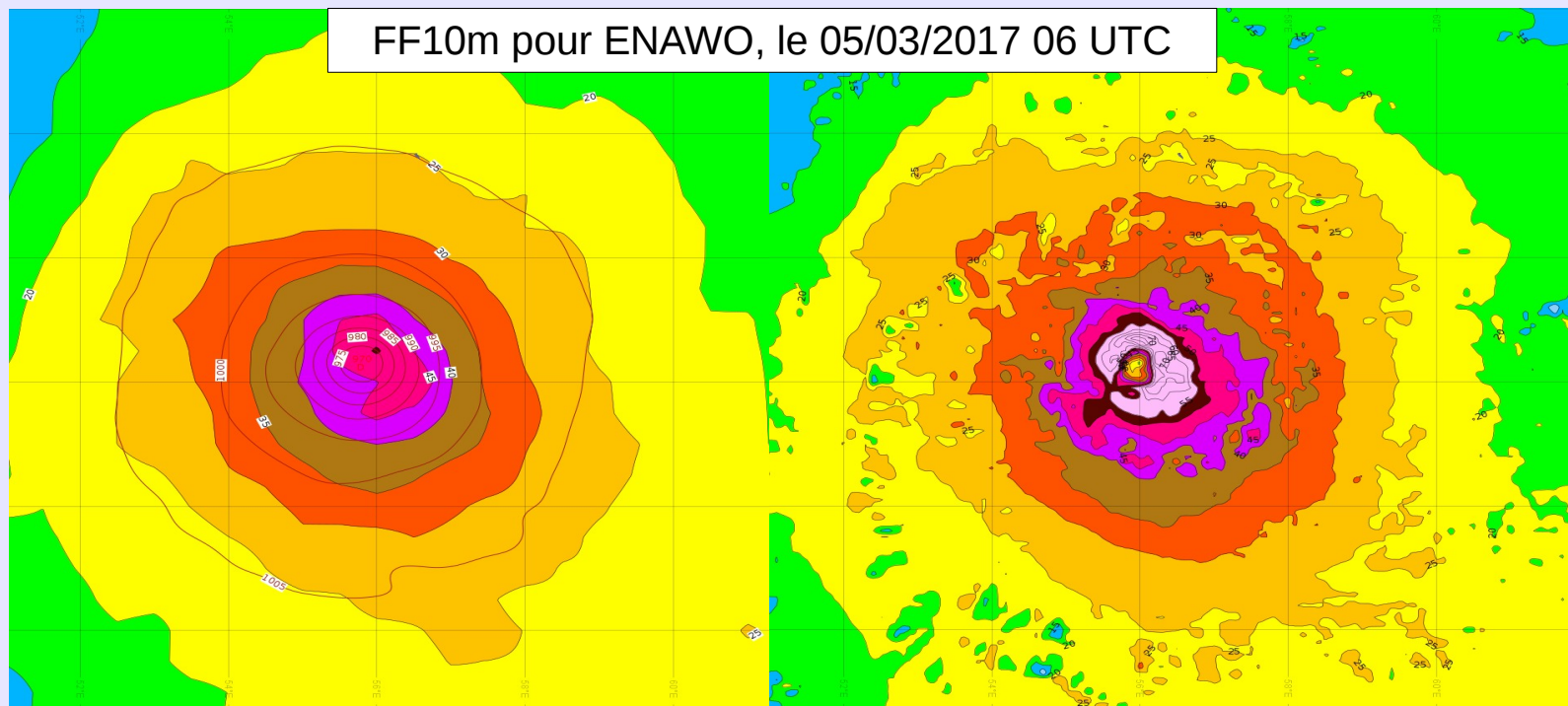
Numerical forecast

*Houle
Swell*



Prévision numérique *Numerical forecast*

**Houle
Swell**



Le choix modèle se base sur la meilleure représentation des rayons de vents, ce qui est plus important que l'intensité max.
Model choice based on the best representation of the winds radii in the cyclone > Intensity

Prévision numérique

Numerical forecast

**Houle
Swell**

Les paramètres à surveiller dans le modèle sont :

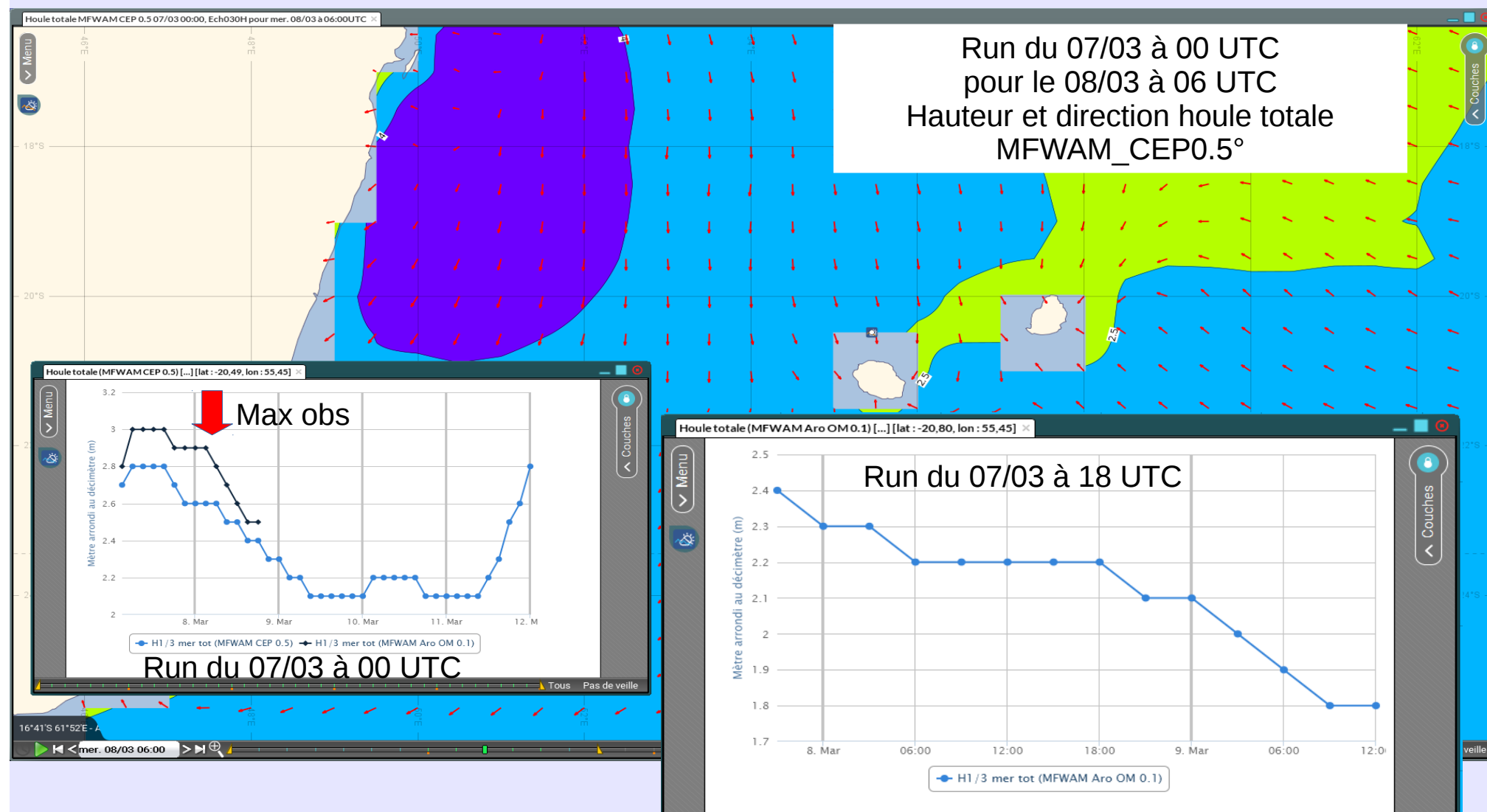
- La hauteur de la houle (son énergie)
- La direction de la houle -> déterminer les zones côtières les plus exposées, penser aux processus côtiers
- La période la houle -> le levage est d'autant plus important

Model parameters to monitor :

- *the swell height (energy)*
- *the swell direction -> to assess where the risk is the most important, while taking into account the coastline processes*
- *the swell period -> amplitude of shoaling*

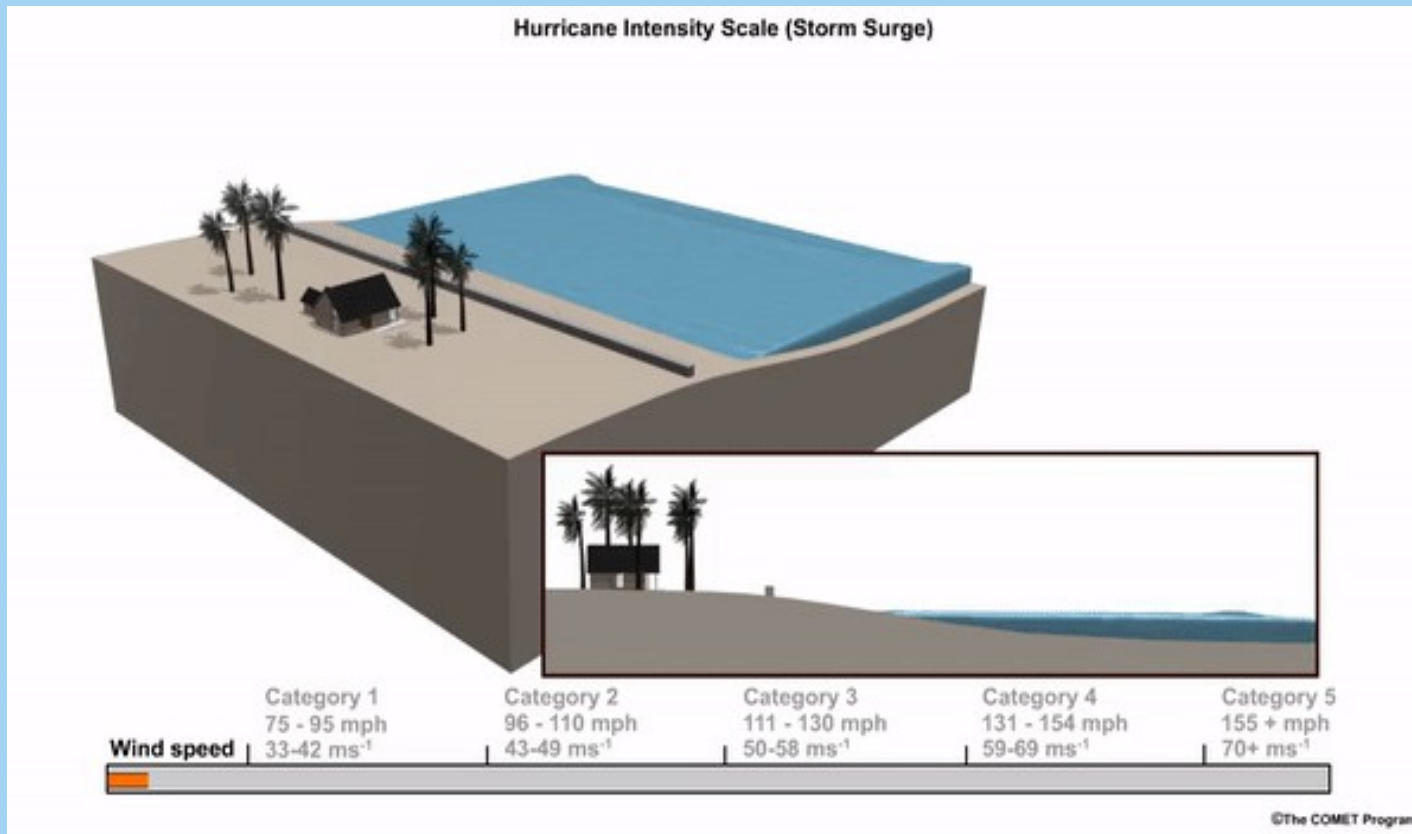
Prévision numérique Numerical forecast

Houle
Swell



Onde de tempête

Storm surge



From the MetEd website, credits : The COMET Program

Définition

Definition

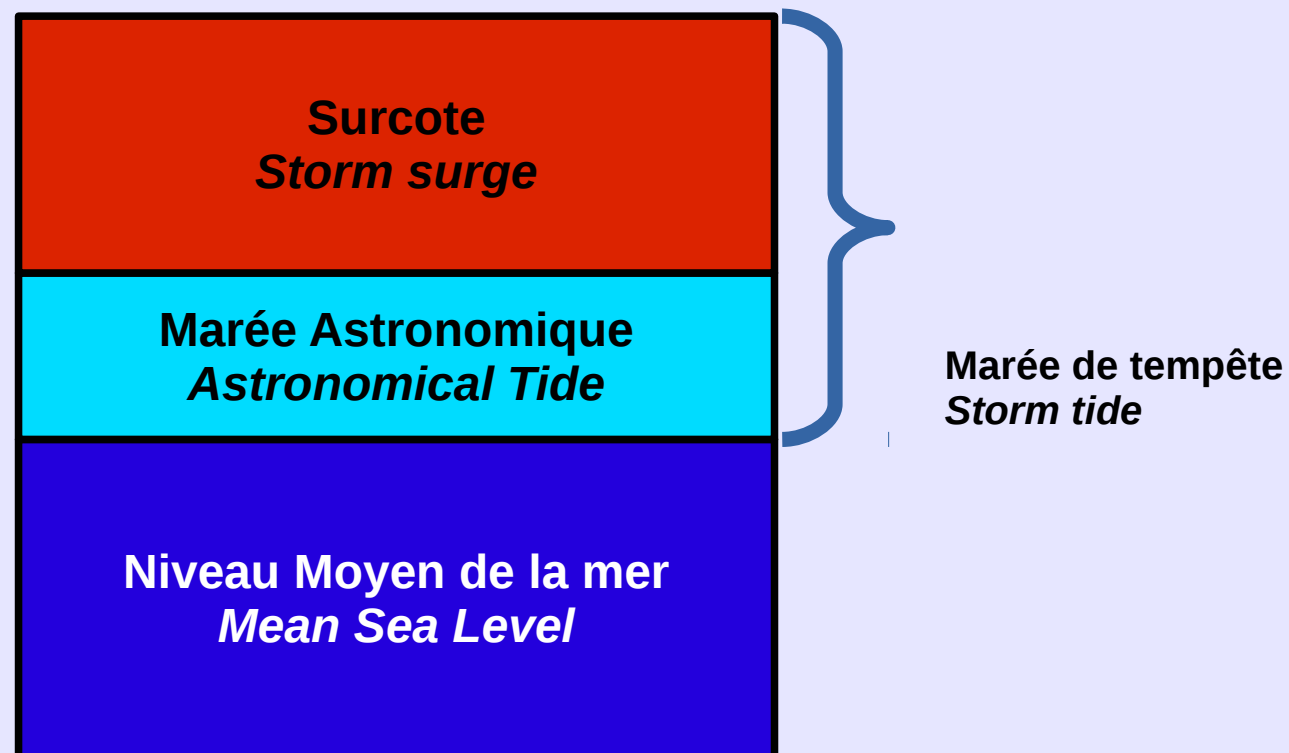
Onde de Tempête
Storm Surge

Marée Astronomique
Astronomical Tide

Niveau Moyen de la mer
Mean Sea Level

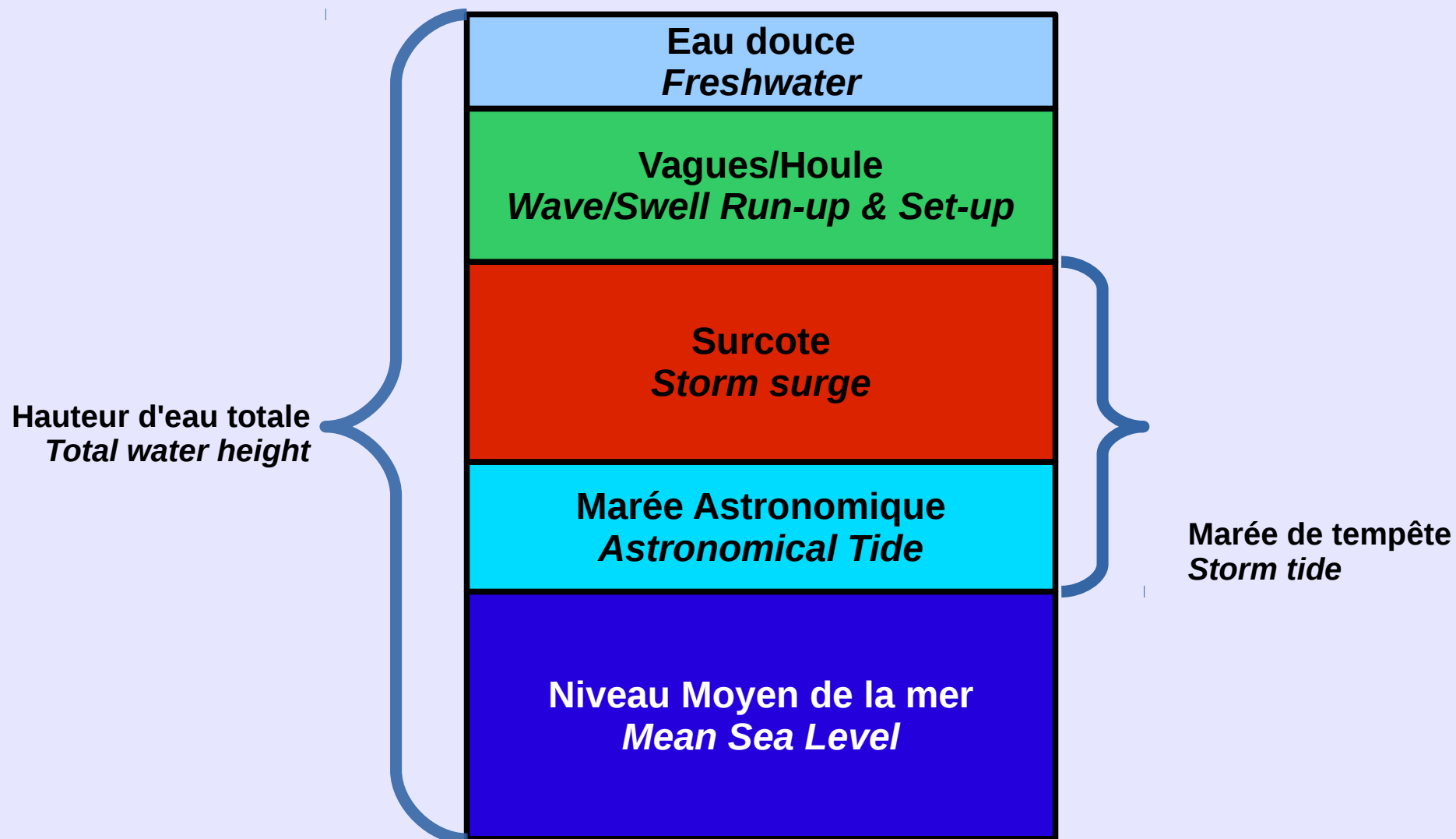
Définition *Definition*

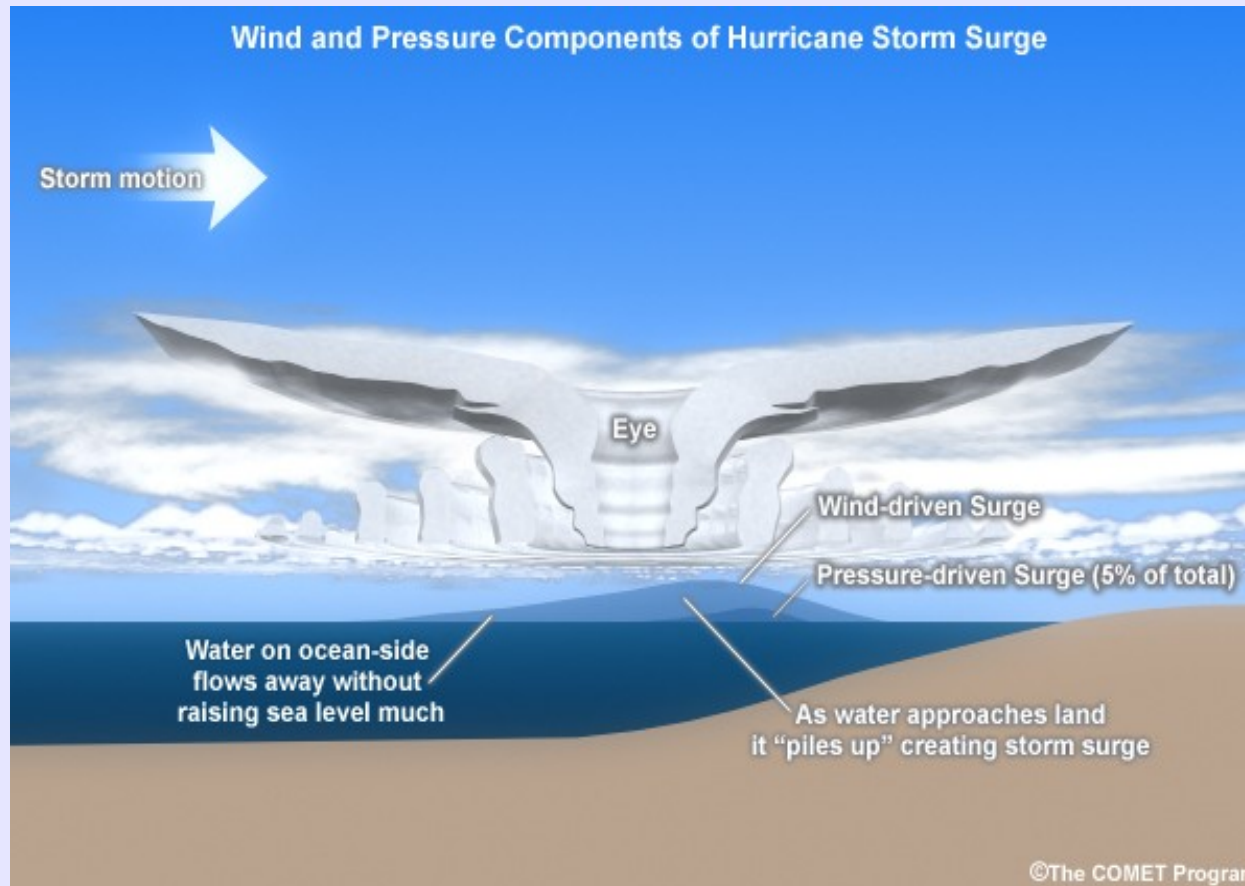
Onde de Tempête
Storm Surge



Définition *Definition*

Onde de Tempête *Storm Surge*





Surcote = Contribution du vent + Contribution de la basse pression atmosphérique
Storm surge = Wind effects + Atmospheric low pressure effects

Effet barométrique inverse

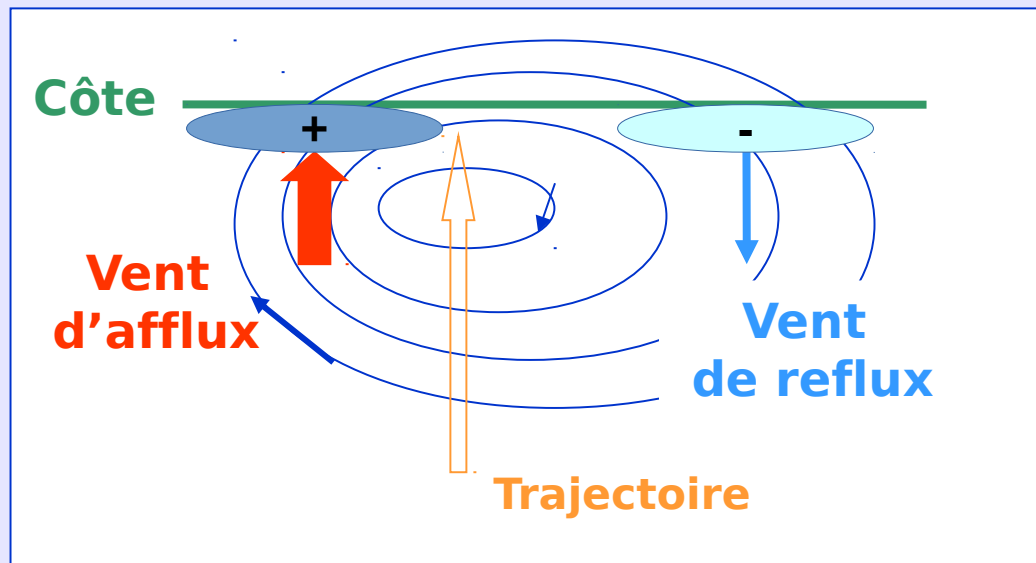
L'élévation de la mer due à de faibles pressions est appelé effet barométrique inverse.

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.

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.

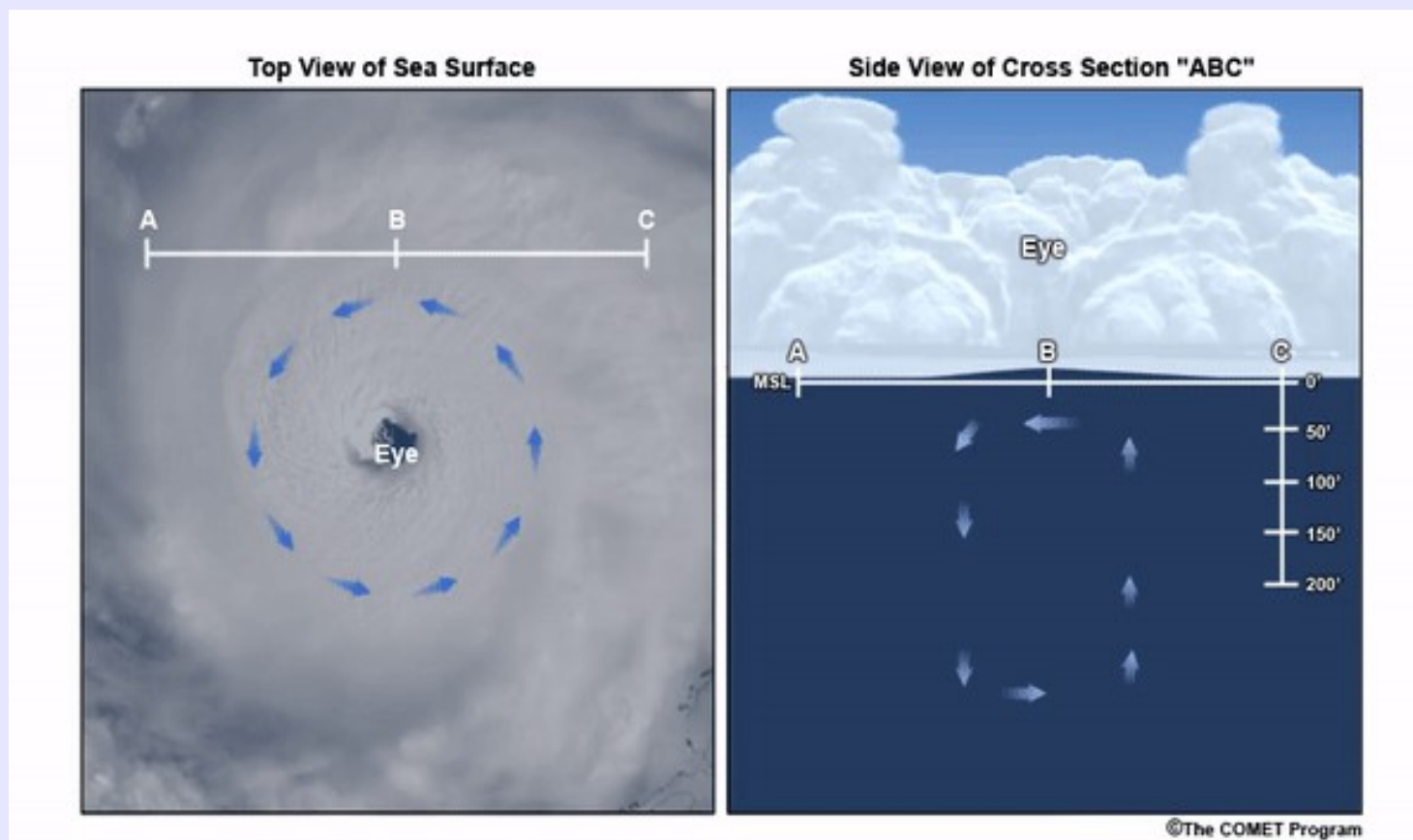


En revanche, à l'approche d'une côte, ce courant conduit à une accumulation des eaux dans le quadrant avant. Les eaux provoquent alors une surélévation du niveau de la mer.

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.

Processus Processes

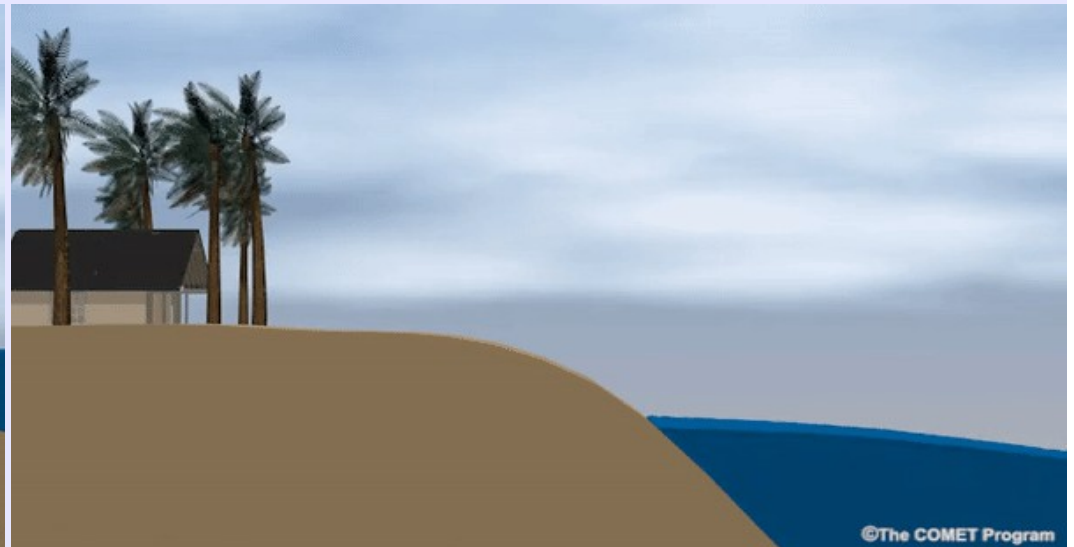
Onde de Tempête Storm Surge



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

- la configuration de la côte
- la topographie du fond.

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



Cas célèbres

Sample cases

Onde de Tempête Storm Surge

- 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 Katrina en 2005 à Pass Christian, MS : 8.5 mètres (hauteur totale d'eau à Biloxi, MS : 10,5m). Cette surcote est rentrée de 10–19 km dans les terres (\$108 milliards).
- 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 Katrina in 2005 in Pass Christian, MS : 8.5 meters (Max water mark at 10,5m in Biloxi, MS). This surge flooded 10–19 km inland. (\$108 billion)*
- *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.*

Prévision *Forecast*

Plusieurs facteurs à considérer pour la prévision de la surcote :

- Pression centrale
- Intensité des vents
- Vitesse du système
- Taille du système (RVM)
- Angle d'impact sur la côte
- Spécificités géographiques de la côte : bathymétrie, lignes de côtes (caps, baies, rivières, îles)

Several factors to consider in forecasting storm surge :

- *Central pressure*
- *Winds Intensity*
- *Forward speed*
- *Système size (MWR)*
- *Angle of approach to the coastline*
- *Local geographical features : bathymtrie, the concavity of coastlines/bays/rivers/islands?*

ATLAS

Prévisions au CMRS

RSMC Forecasts

Onde de Tempête Storm Surge

Trajectoire officielle Prévüe
par le CMRS

Jeu de trajectoires proches
(« Enveloppe »)

Forçages atmosphériques
(Modèle de Hollande)

Modèle de surcote
(P.Daniel)

Official RSMC Track
forecast

Set of close Tracks
(« Enveloppe »)

Forçages atmosphériques
(Modèle de Hollande)

Modèle de surcote
(P.Daniel)

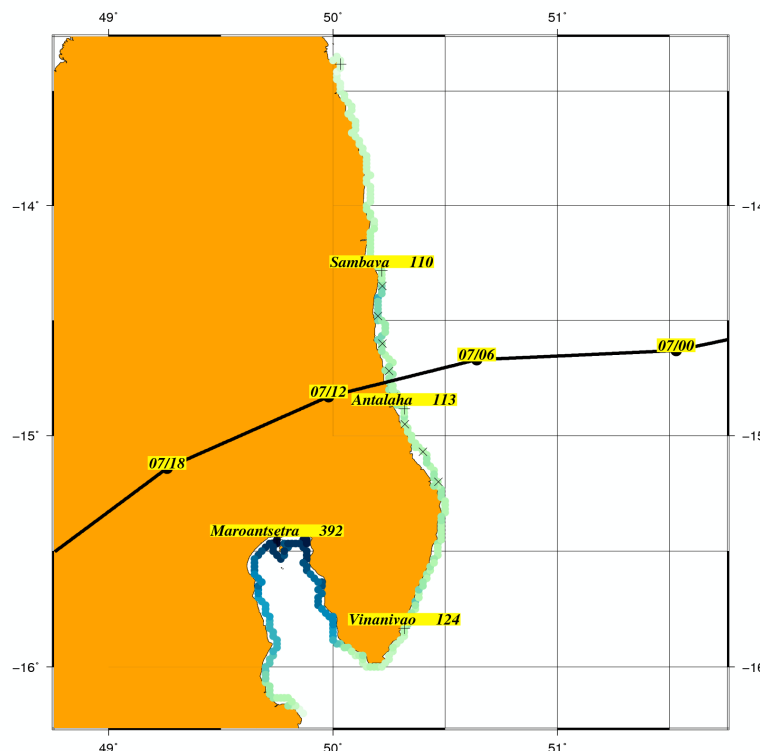
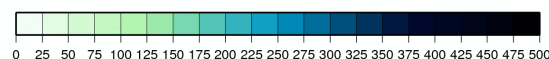
Prévisions au CMRS RSMC Forecasts

Onde de Tempête Storm Surge

Exemple de sortie :
Carte d'extrema pour
ENAWO

Output example :
Extrema map for
ENAWO

Système ENAWO (Réseau 07/03/2017/0600Z)
Estimation entre le 07/03/2017 à 06h et le 07/03/2017 à 12h
Vmax 100->120 Kts, Rvmax 5->15 MN, Ec. pc -15->0 hPa
Dir. 220->340 degrés, Vit. 5->15 Kts, 8 points d'impact
Surcote en cm – maximum: 392 cm



« LA BAIE D'ANTONGIL EST A PRIORI LA PLUS MENACEE PAR LE RISQUE DE SURCOTE. ELLE EST PREVUE ATTEINDRE ENVIRON 3 À 4 METRES A MAROANTSETRA ET DEVRAIT RESTER PROCHE DE 1 METRE AU SUD D'ANTALAHA ET A ANTANAMBE. (MAIS ATTENTION L'EFFET DE LA HOULE ET DE LA MAREE N'EST PAS INCLUS DANS CETTE ESTIMATION)»

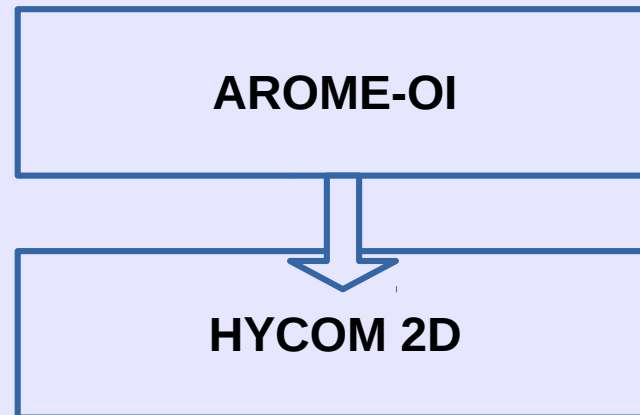
« ANTONGIL BAY IS MORE LIKELY TO UNDERGO SIGNIFICANT STORM SURGE. IT IS EXPECTED TO REACH 3-4 METERS NEAR MAROANTSETRA BUT CLOSER TO 1 METER SOUTH OF ANTALAHA AND NEAR ANTANAMBE. (BEWARE THAT THIS VALUE DOES NOT TAKE INTO ACCOUNT THE TIDE AND THE WAVE SET UP) »

Prévisions au CMRS

RSMC Forecasts

Onde de Tempête
Storm Surge

Nouvelle chaine opérationnelle
New operationnal model chain



Prévisions au CMRS

RSMC Forecasts

Onde de Tempête
Storm Surge



Météo-France

adrien.colomb@meteo.fr

www.meteofrance. | @meteofrance