


# **Les énergies renouvelables marines**

An aerial view of Earth from space, showing the curvature of the planet, the deep blue of the oceans, and scattered white clouds. The text is overlaid on this image.

**Une introduction**

**Jacques Ruer**

**Club des Argonautes**

**IDEES – 8 mars 2016**

# Energies Renouvelables Marines

## Sommaire

- Définitions
- Ressources
- Eolien offshore
- Hydrolien
- Energie des vagues
- Ordres de grandeur des forces
- Energie thermique des mers
- Généralités

# Energies Renouvelables Marines

## définitions

- Energies renouvelables disponibles dans les masses d'eau marines :  
marémotrice – hydrolienne – houlomotrice

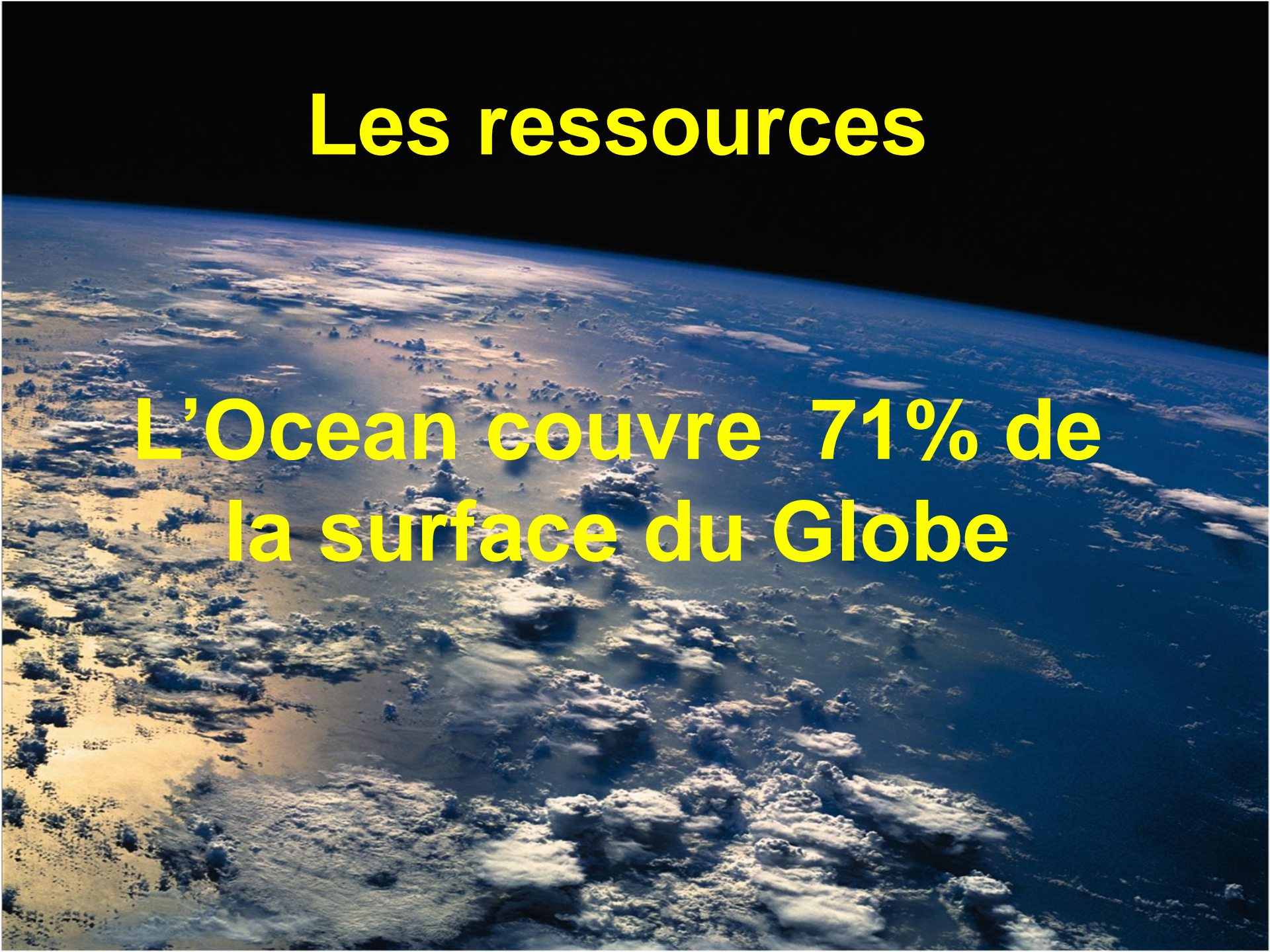
OU

- Energies renouvelables disponibles dans le domaine maritime :  
marémotrice – hydrolienne – houlomotrice –  
éolien offshore (posé, flottant) – *osmotique* – *PV flottant* –  
*biomasse*



# Les ressources

L'Océan couvre 71% de  
la surface du Globe





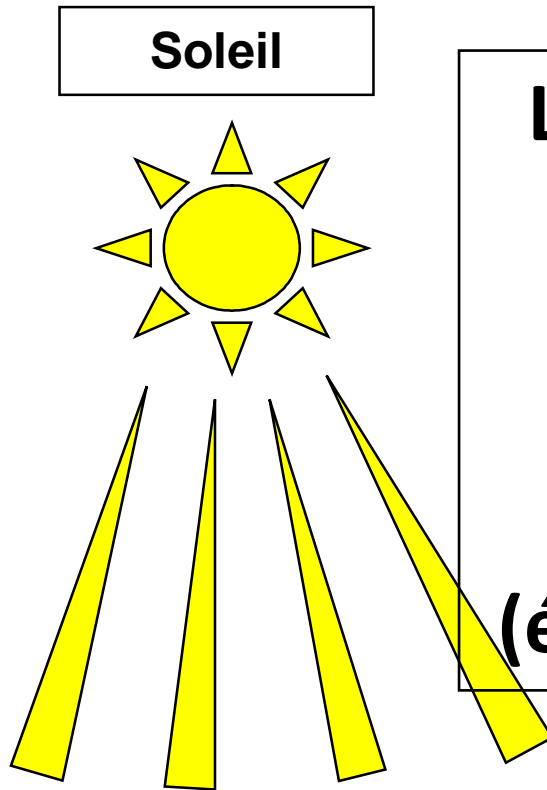
# Les principaux flux d'énergie en mer

**Energies renouvelables marines :  
Les ressources**

**La mer couvre 71% de la surface du Globe**

**Surface des océans = 360 millions km<sup>2</sup>**

# Les principaux flux d'énergie en mer



**Le principal flux provient du  
Soleil**

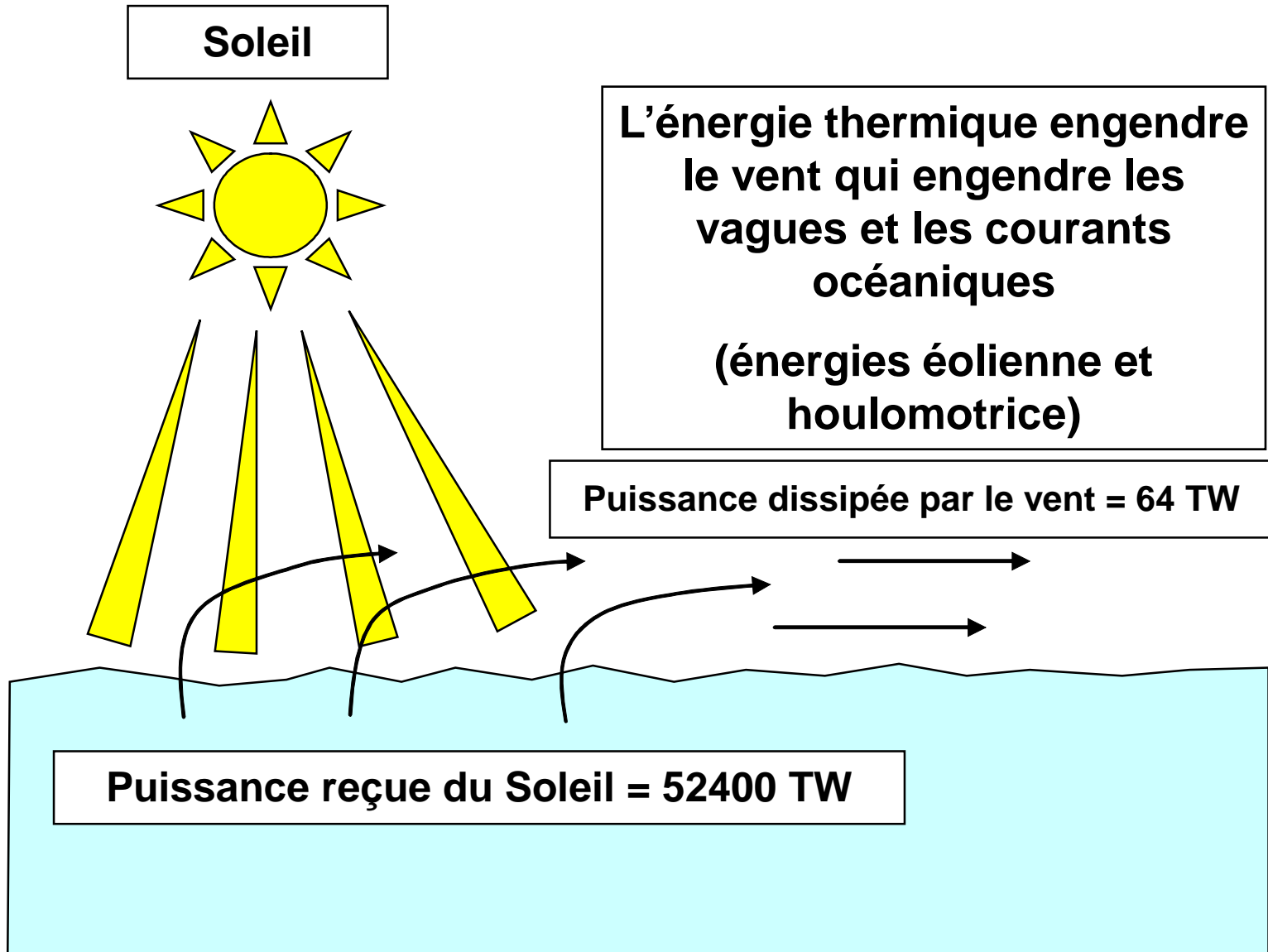
**3000 fois toute l'énergie  
primaire de l'humanité**

**(énergie thermique des mers)**

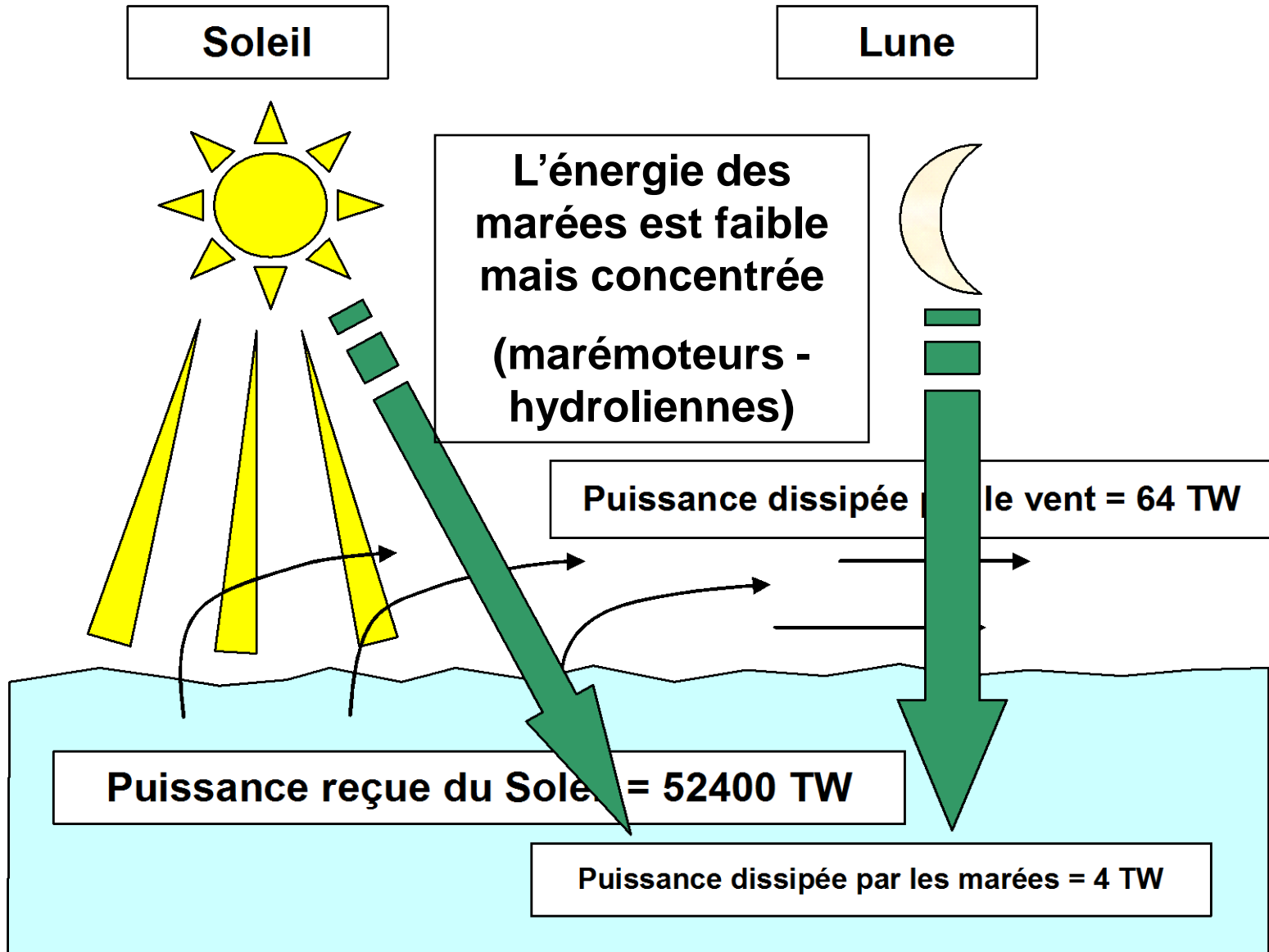
**Puissance reçue du Soleil = 52400 TW**



# Les principaux flux d'énergie en mer



# Les principaux flux d'énergie en mer





# L'éolien offshore



# **L'éolien posé est une énergie marine:**

- **Les équipements doivent être adaptés à l'environnement marin**
- **Les structures supports, les fondations, le câblage électrique sont spécifiques aux conditions marines**
- **Les travaux d'installation et de maintenance sont dominés par les contraintes océano-météo**
- **Les moyens de travail sont spécifiques**



# L'éolien posé est une énergie marine:

- Les moyens de travail sont spécifiques





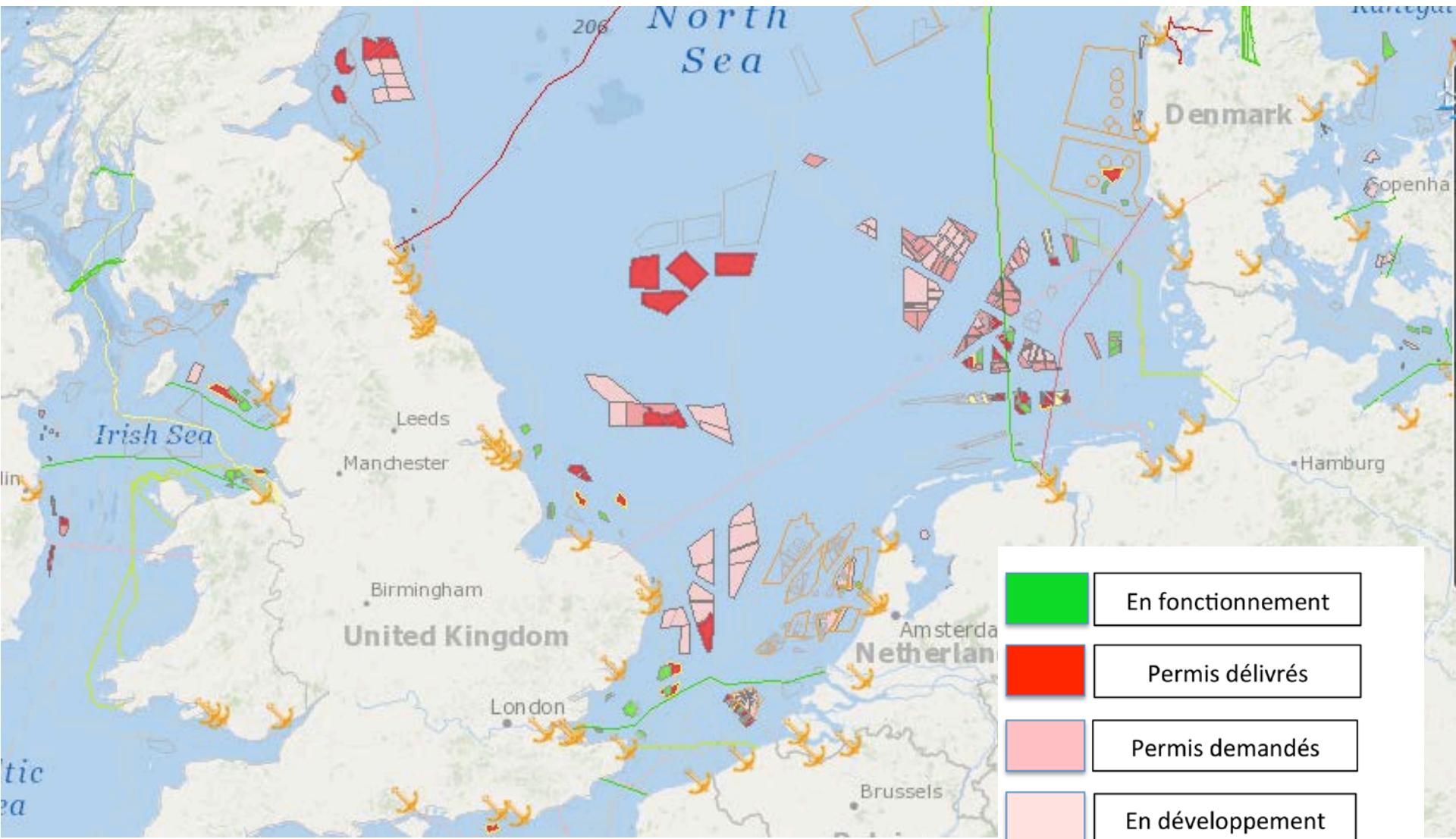
**Eolienne offshore 5MW (*prototype à terre*)**  
**Environ 1000 t et 130m de hauteur (selon le site)**

**Plateforme transformateur DC**  
**(Helwin alpha – 500MW)**  
**10000t**





# L'éolien offshore posé: 10000 MW en Europe



# L'éolien offshore en France

ROYAUME-UNI

Objectif 2030 : 33 à 40 GW

ALLEMAGNE

Objectif 2030 : 25 GW

Tréport

Fécamp

Courseulles-sur-Mer

Saint-Brieuc

Saint-Nazaire





Noirmoutier

Objectif 2030 :  
21 GW d'éolien en mer  
(15 GW posés + 6 GW flottants)

## Zones Eoliennes en mer

-  Zones 1er appel d'offres
-  Zones 2nd appel d'offres (lancé en mars 2013)
-  Potentiel technique posé de 80 GW
-  Potentiel technique flottant de 122 GW

## Limites Administratives

-  Mer territoriale (12 MN)
-  Zone Economique Exclusive
-  Zone de Protection Ecologique
-  Iles Anglaises



# Eolien flottant: Accès à une plus grande ressource



Eolienne flottante Hywind  
(Norvège)



Fukushima  
Mitsubishi  
(Japon)

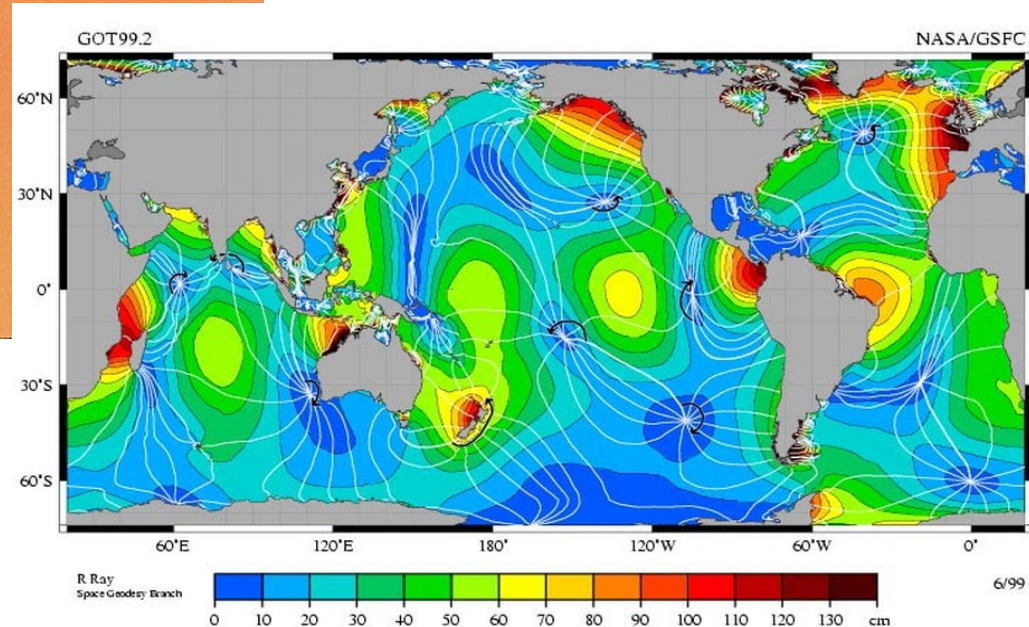
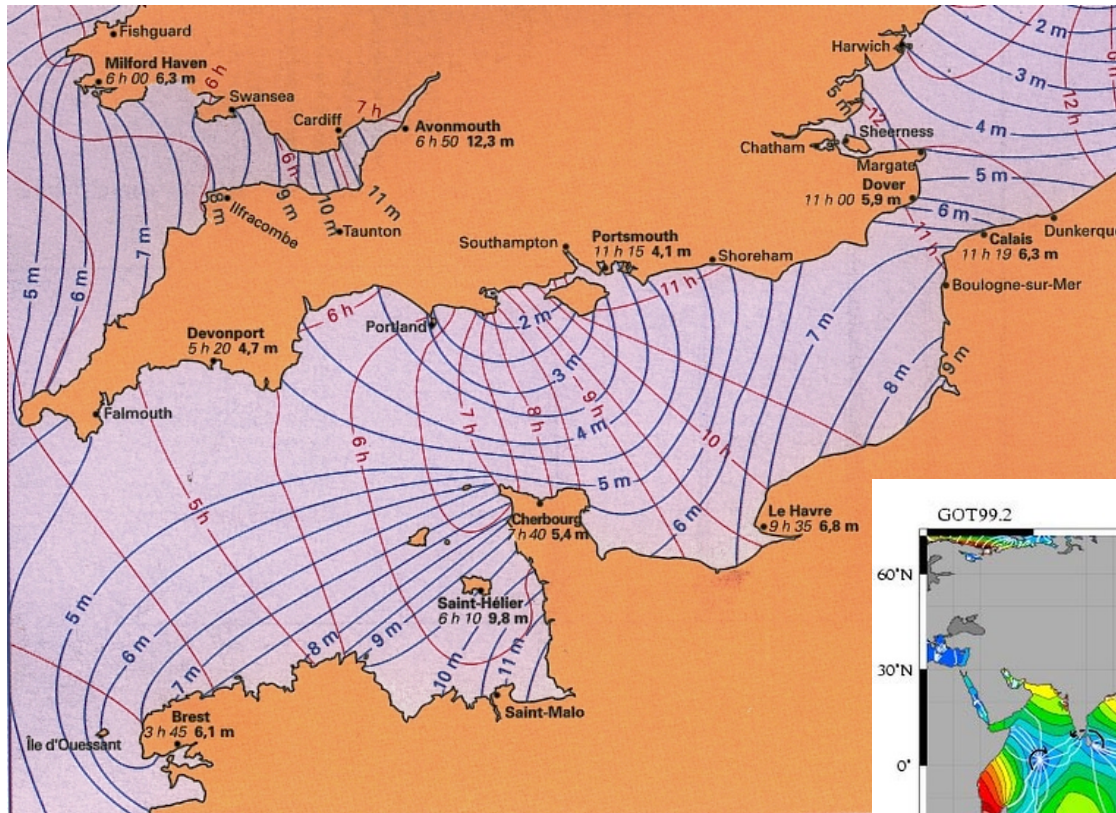
Principle Power  
(Portugal)





# Energie des marées et des courants de marée

Marées et courants  
de marée :  
Particulièrement  
forts sur nos côtes



Marées dans le monde:  
50cm à 70cm sauf exceptions...

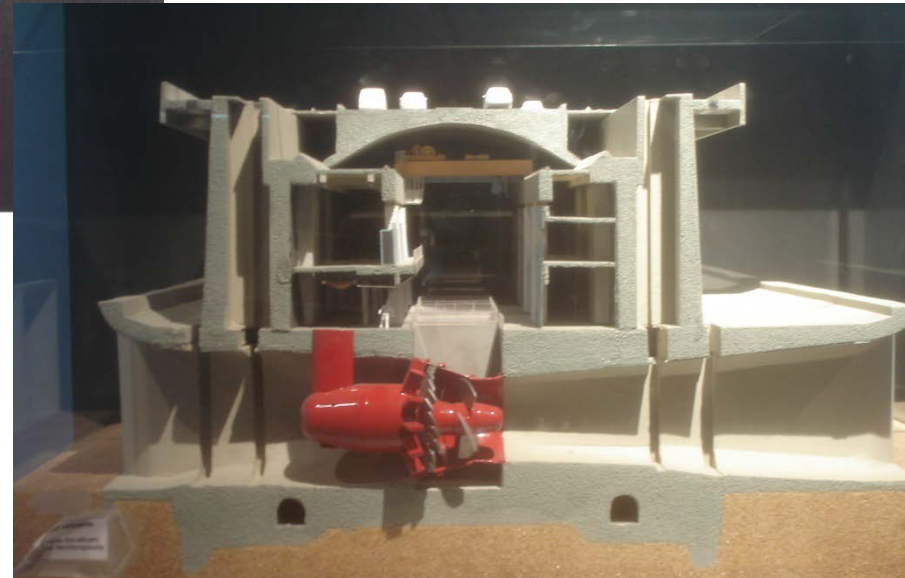


# L'énergie marémotrice



**La Rance :  
240 MW  
Inaugurée  
en 1966**

**Ce projet ne serait  
probablement plus faisable  
pour des raisons  
environnementales**



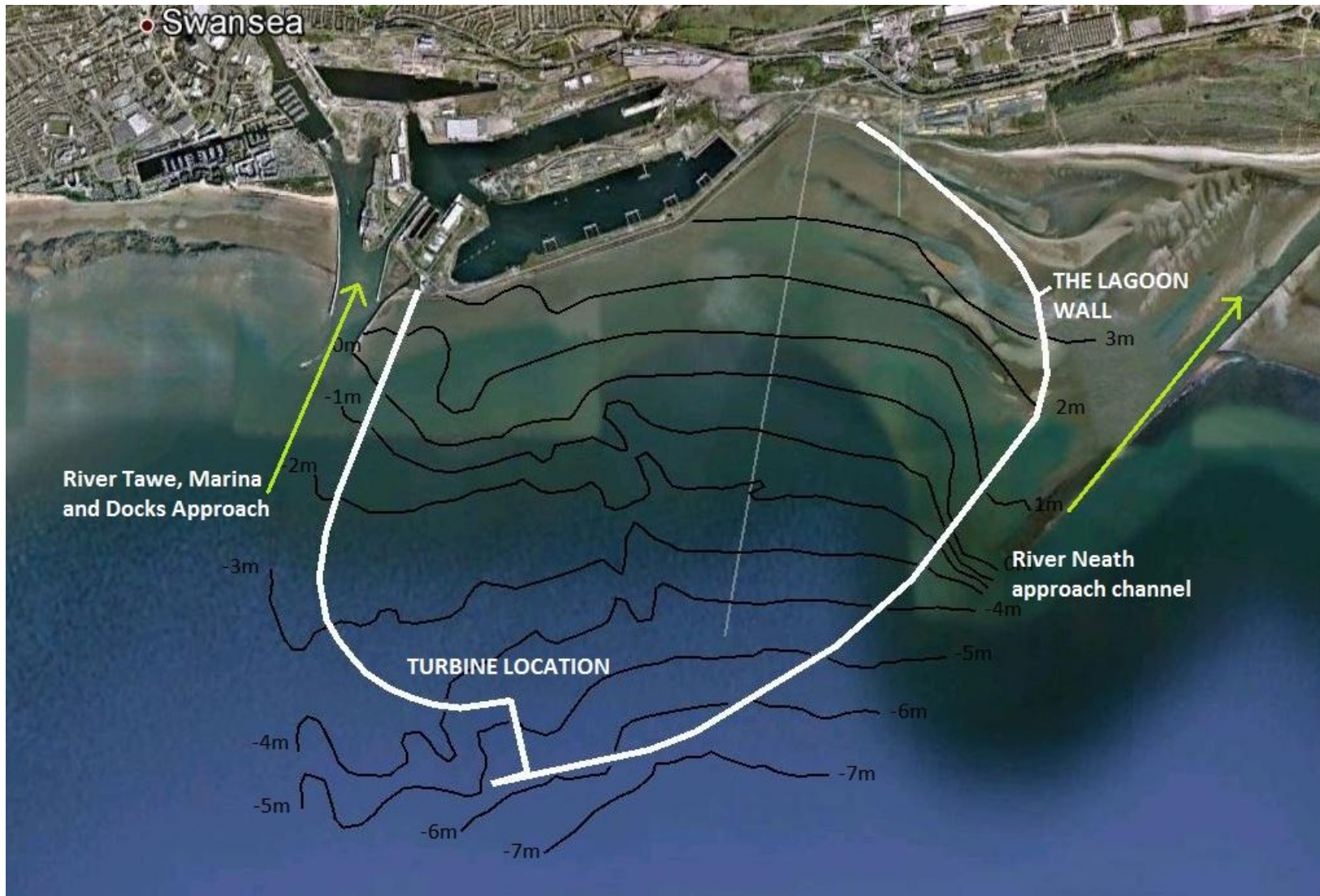
# La plus puissante usine marémotrice: Sihwa Lake : 254MW – Corée du sud





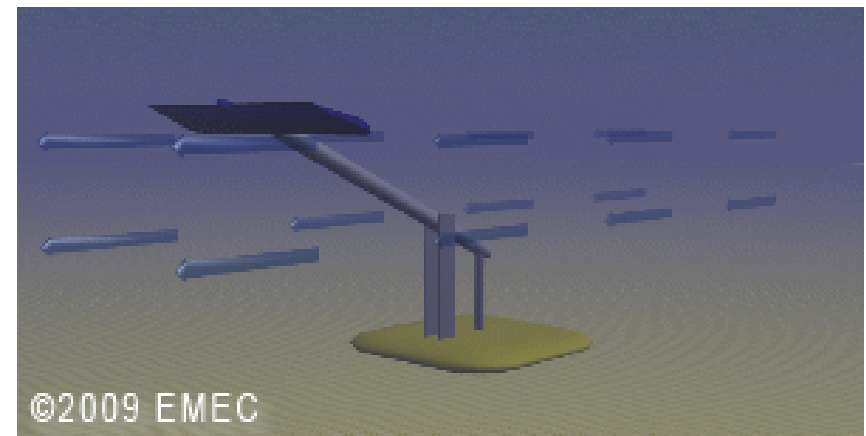
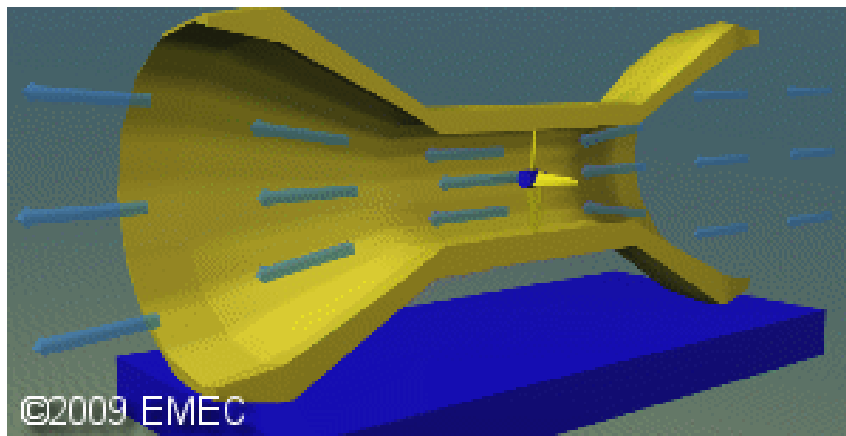
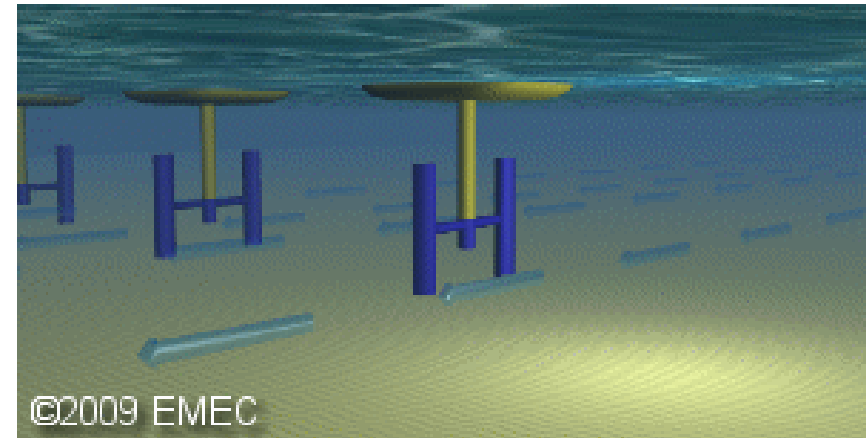
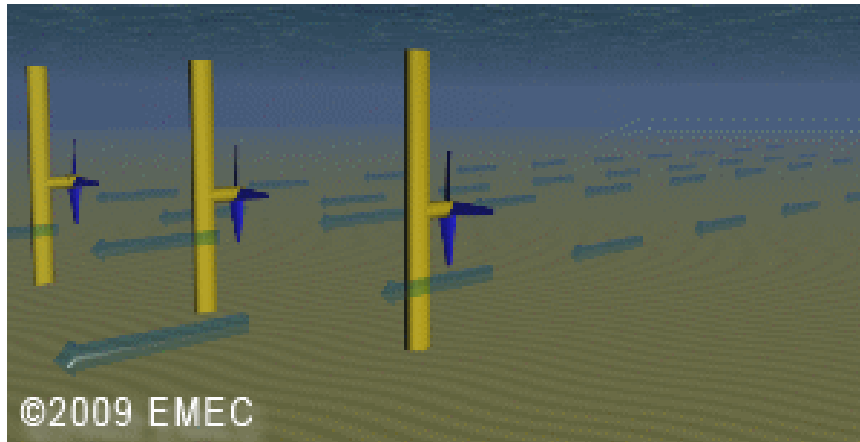
# Projet de Swansea : 320MW

## Digue de 9,5km – bassin de 11,5 km<sup>2</sup>



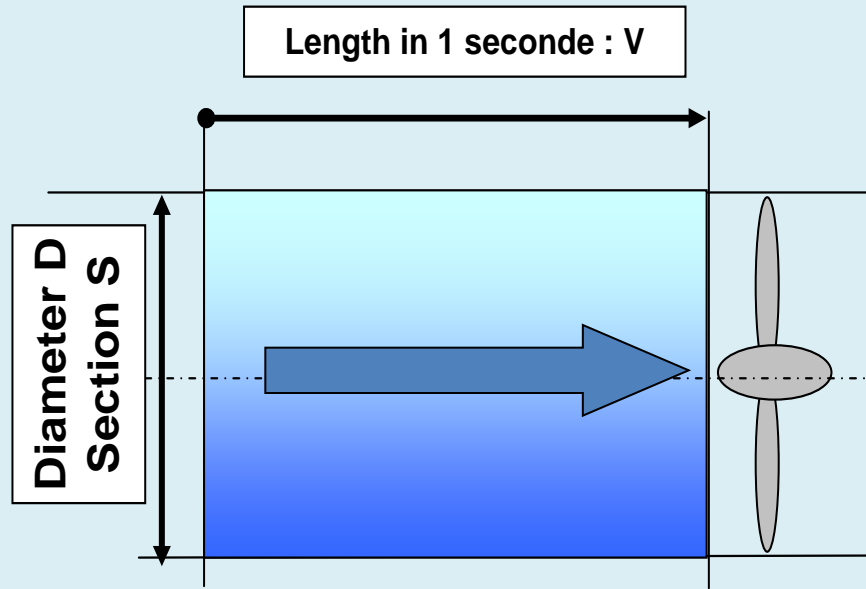
# L'énergie des courants de marée

## Principales technologies d'hydroliennes





# Principe d'une hydrolienne



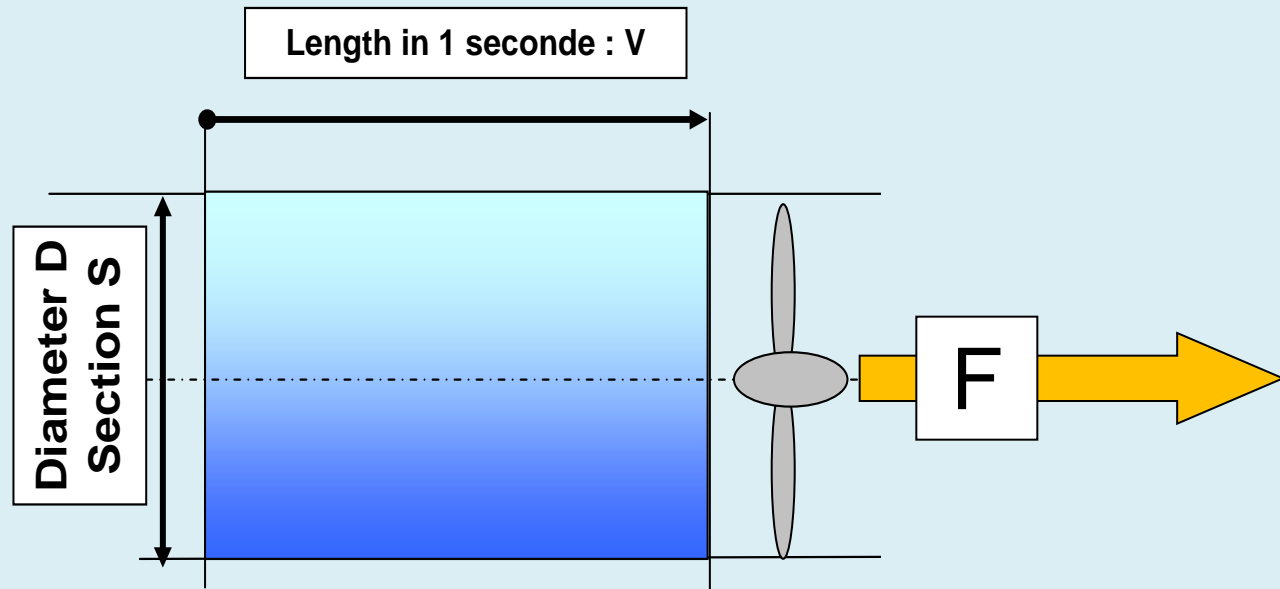
Débit de masse à travers le rotor par seconde :  $M = \rho \cdot S \cdot V$

Energie cinétique =  $\frac{1}{2} \cdot M \cdot V^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3$

Puissance =  $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_p \cdot S \cdot V^3$

**A retenir :  $P = k \cdot S \cdot V^3$**

# Principe d'une hydrolienne



Force axiale sur le rotor :  $F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_F \cdot S \cdot V^2$

Puissance =  $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_p \cdot S \cdot V^3$

**A retenir :  $P = k \cdot S \cdot V^3$  -  $F = k' \cdot S \cdot V^2$**

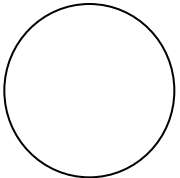
# La dimension d'une hydrolienne dépend surtout du courant

Diamètre du rotor pour une puissance de 200 kW

**Courant : 4 m/s**

**Diamètre : 4,7 m**

**Poussée : 194 kN**



# La dimension d'une hydrolienne dépend surtout du courant

Diamètre du rotor pour une puissance de 200 kW

**Courant : 3 m/s**

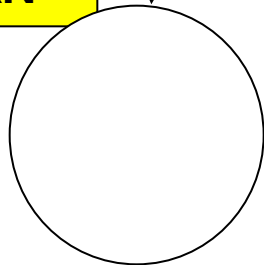
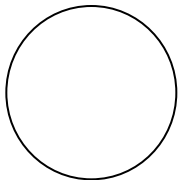
**Diamètre : 7,3 m**

**Poussée : 263 kN**

**Courant : 4 m/s**

**Diamètre : 4,7 m**

**Poussée : 194 kN**



# La dimension d'une hydrolienne dépend surtout du courant

Diamètre du rotor pour une puissance de 200 kW

**Courant : 2 m/s**

**Diamètre : 13,3 m**

**Poussée : 389 kN**

**Courant : 3 m/s**

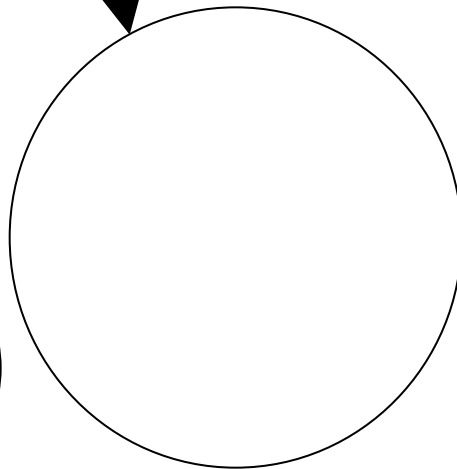
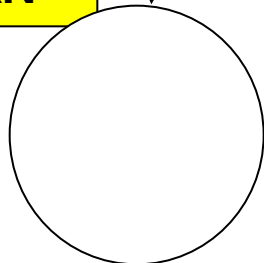
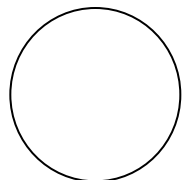
**Diamètre : 7,3 m**

**Poussée : 263 kN**

**Courant : 4 m/s**

**Diamètre : 4,7 m**

**Poussée : 194 kN**





# La dimension d'une pale dépend surtout

Diamètre du rotor pour

Courant : 2 m/s

Diamètre : 13,3 m

Poussée : 389 kN

Courant : 3 m/s

Diamètre : 7,3 m

Poussée : 263 kN

Courant : 4 m/s

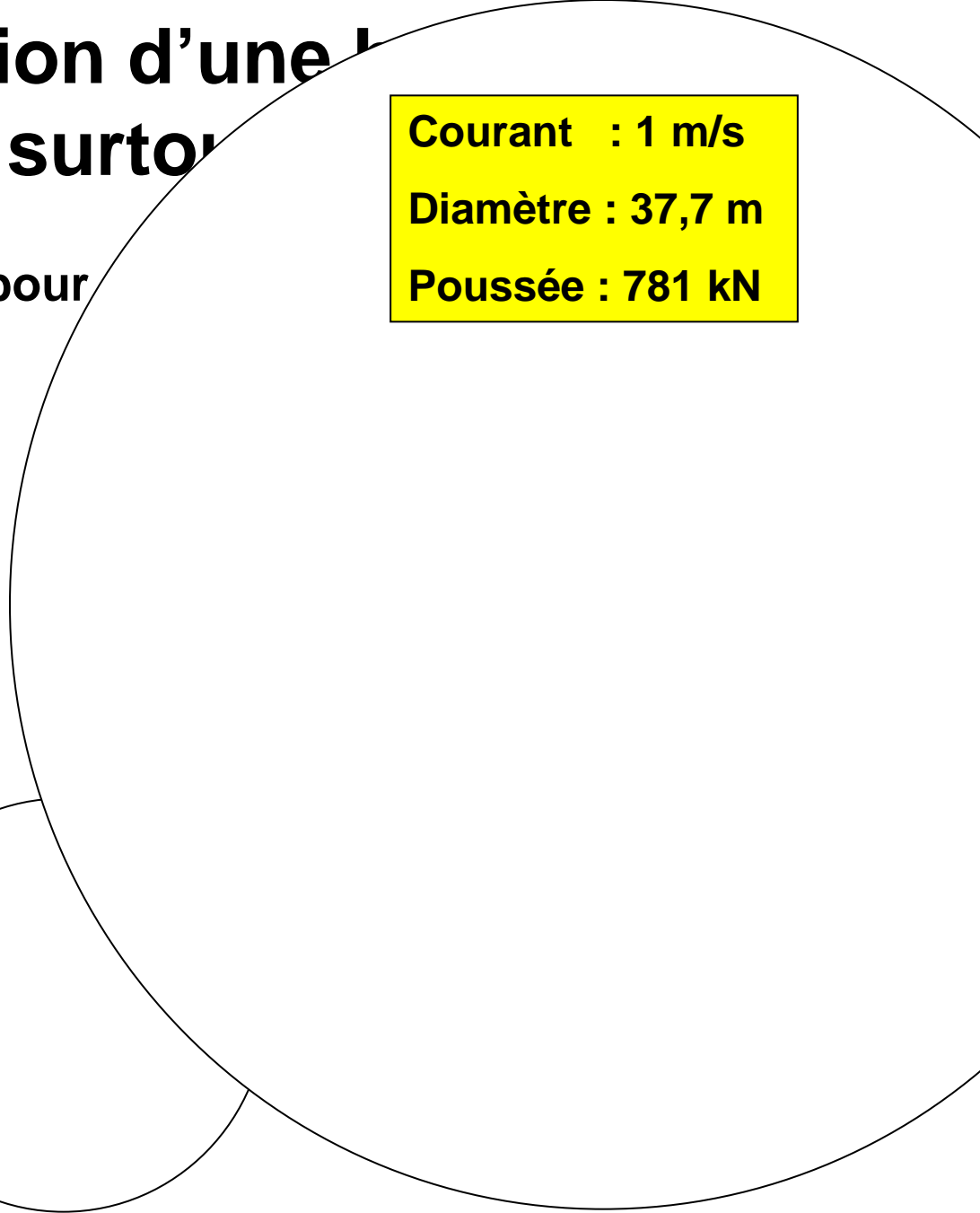
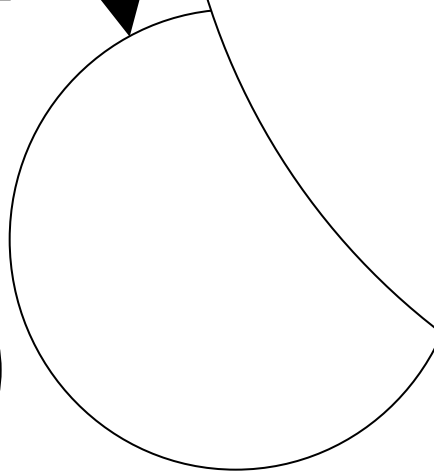
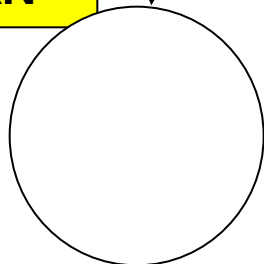
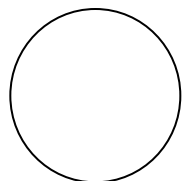
Diamètre : 4,7 m

Poussée : 194 kN

Courant : 1 m/s

Diamètre : 37,7 m

Poussée : 781 kN



# La dimension d'une éolienne dépend surtout

Diamètre du rotor pour

Courant : 2 m/s

Diamètre : 13,3 m

Poussée : 389 kN

Courant : 3 m/s

Diamètre : 7,3 m

Poussée : 263 kN

Courant : 4 m/s

Diamètre : 4,7 m

Poussée : 194 kN

Courant : 1 m/s

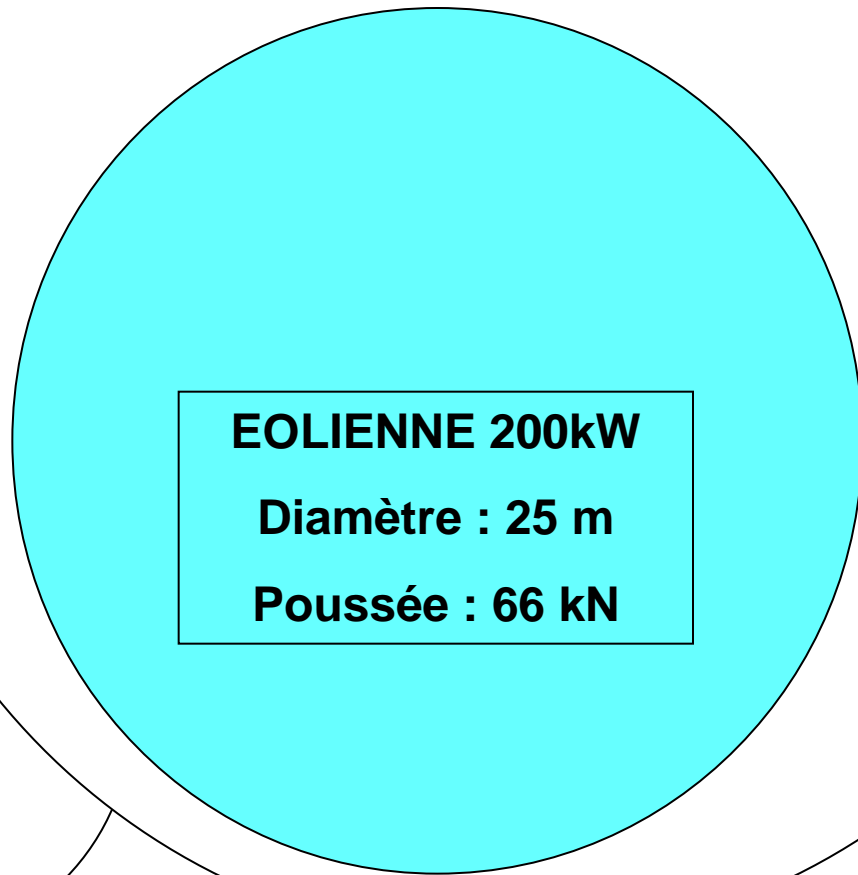
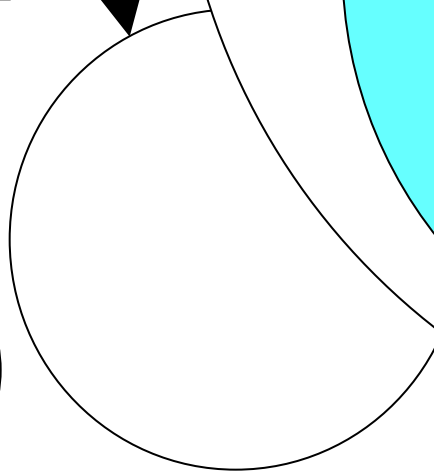
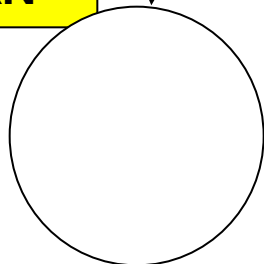
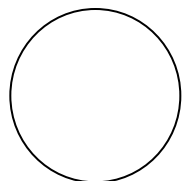
Diamètre : 37,7 m

Poussée : 781 kN

**EOLIENNE 200kW**

Diamètre : 25 m

Poussée : 66 kN



# La dimension d'une hydrolienne dépend surtout

Diamètre du rotor pour

Courant : 2 m/s  
Diamètre : 13,3 m  
Poussée : 389 kN

Courant : 3 m/s  
Diamètre : 7,3 m  
Poussée : 263 kN

Courant : 4 m/s  
Diamètre : 4,7 m  
Poussée : 194 kN

Courant : 1 m/s  
Diamètre : 37,7 m  
Poussée : 781 kN

EOLIENNE 200kW  
Diamètre : 25 m  
Poussée : 66 kN

Une hydrolienne est plus petite qu'une éolienne si le courant est très rapide (supérieur à 1,5 m/s)

# La dimension d'une hydrolienne dépend surtout

Diamètre du rotor pour

Courant : 2 m/s  
Diamètre : 13,3 m  
Poussée : 389 kN

Courant : 3 m/s  
Diamètre : 7,3 m  
Poussée : 263 kN

Courant : 4 m/s  
Diamètre : 4,7 m  
Poussée : 194 kN

Courant : 1 m/s  
Diamètre : 37,7 m  
Poussée : 781 kN

**EOLIENNE 200kW**  
Diamètre : 25 m  
Poussée : 66 kN

**La poussée sur une hydrolienne est plus forte que sur une éolienne**



# La dimension d'une turbine dépend surtout

Diamètre du rotor pour

Courant : 2 m/s

Diamètre : 13,3 m

Poussée : 389 kN

Courant : 3 m/s

Diamètre : 7,3 m

Poussée : 263 kN

Courant : 4 m/s

Diamètre : 4,7 m

Poussée : 194 kN

Courant : 1 m/s

Diamètre : 37,7 m

Poussée : 781 kN

Pour des courants modestes,  
une hydrolienne n'est pas  
économiquement viable

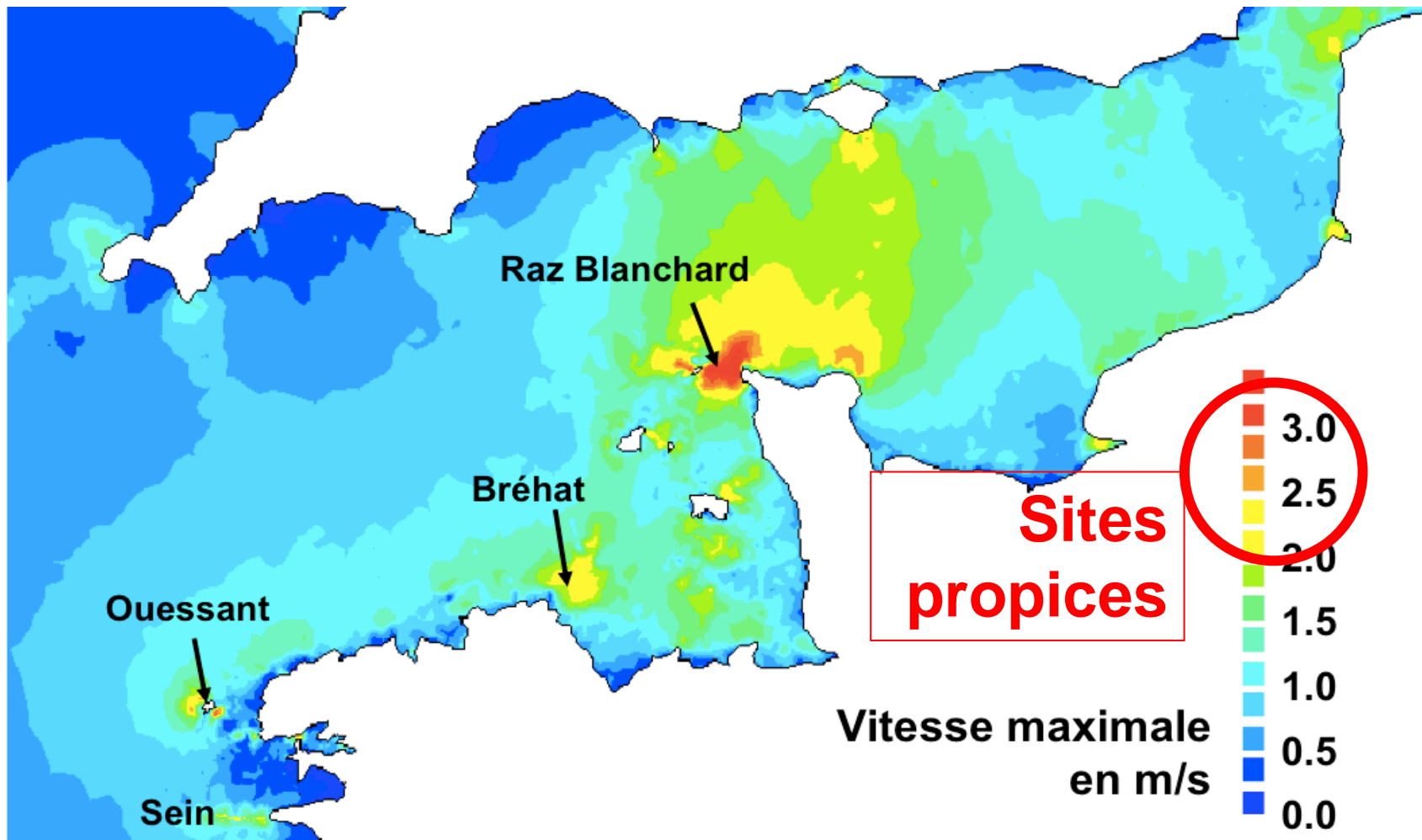
EOLIENNE 200kW

Diamètre : 25 m

Poussée : 66 kN

Et aucune technologie ne peut changer cette réalité physique

# Sites favorables dans la Manche



# L'hydrolienne Sabella

**Diamètre 10m – 450t – 500kW**



# L'hydrolienne OpenHydro

**Diamètre 16m – 1000t – 1000kW**





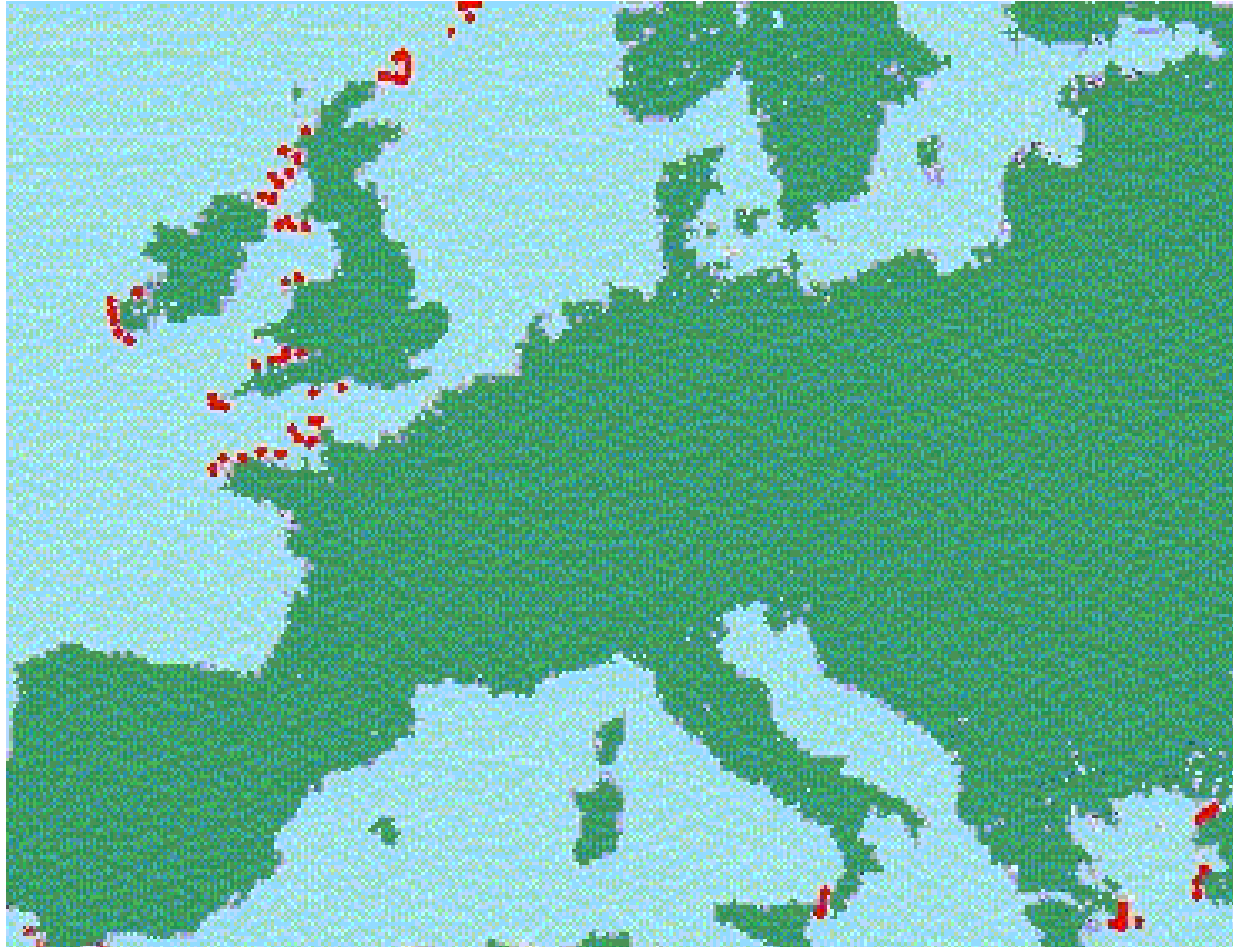
# Besoin de navires adaptés pour l'installation et la maintenance des hydroliennes

Navires capables de tenir une position stable dans un fort courant et de lever des charges lourdes



**Le potentiel en Europe est important : 30 000 MW (théorique)**

Sites avec un courant supérieur à 2 m/s ( 4 nœuds )



**Potentiel estimé en France : 6000 MW**



# Ressource hydrolienne en France

La ressource hydrolienne est limitée, mais elle est :

- Prévisible à long terme
- Abondante sur nos côtes
- Sans impact important
- Exploitable par l'industrie nationale

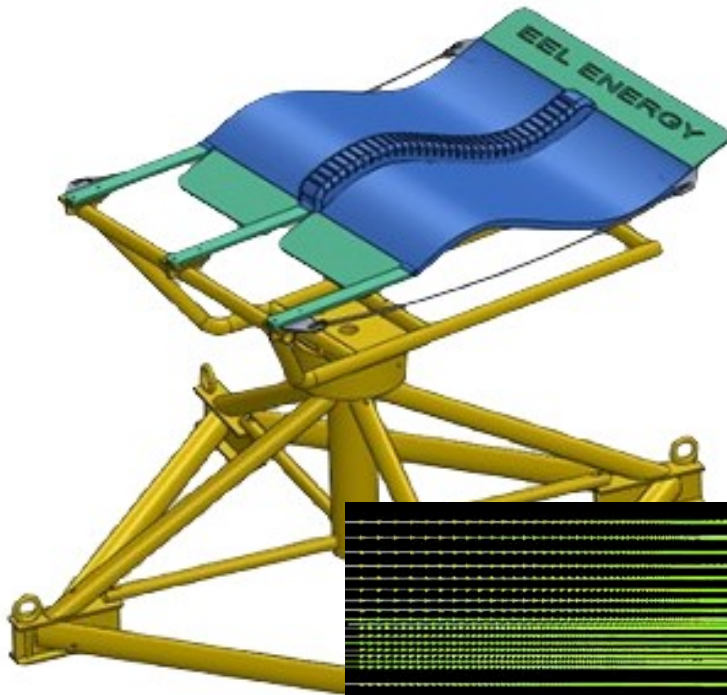
Il faut considérer l'hydrolien comme l'équivalent marin de l'hydroélectricité au fil de l'eau.

La ressource existe, elle est intéressante en certains endroits, elle sera exploitée



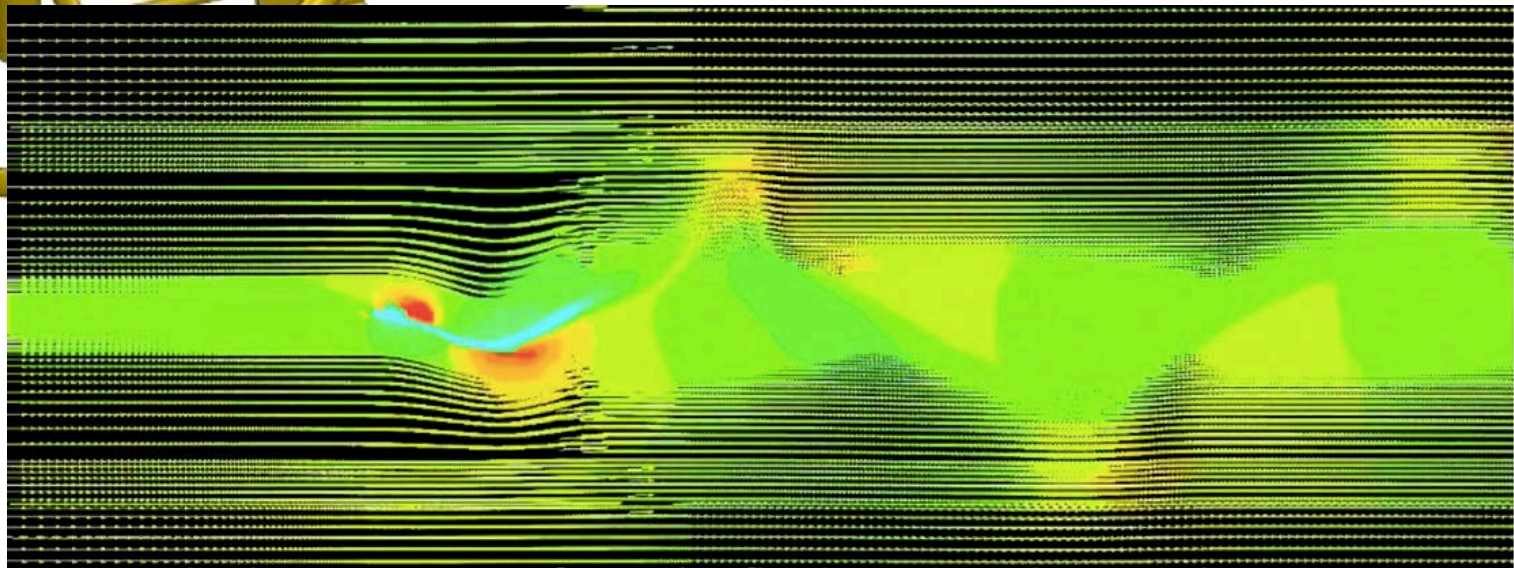
# Nouvelles hydroliennes

## Exemple : L'hydrolienne EEL Energy



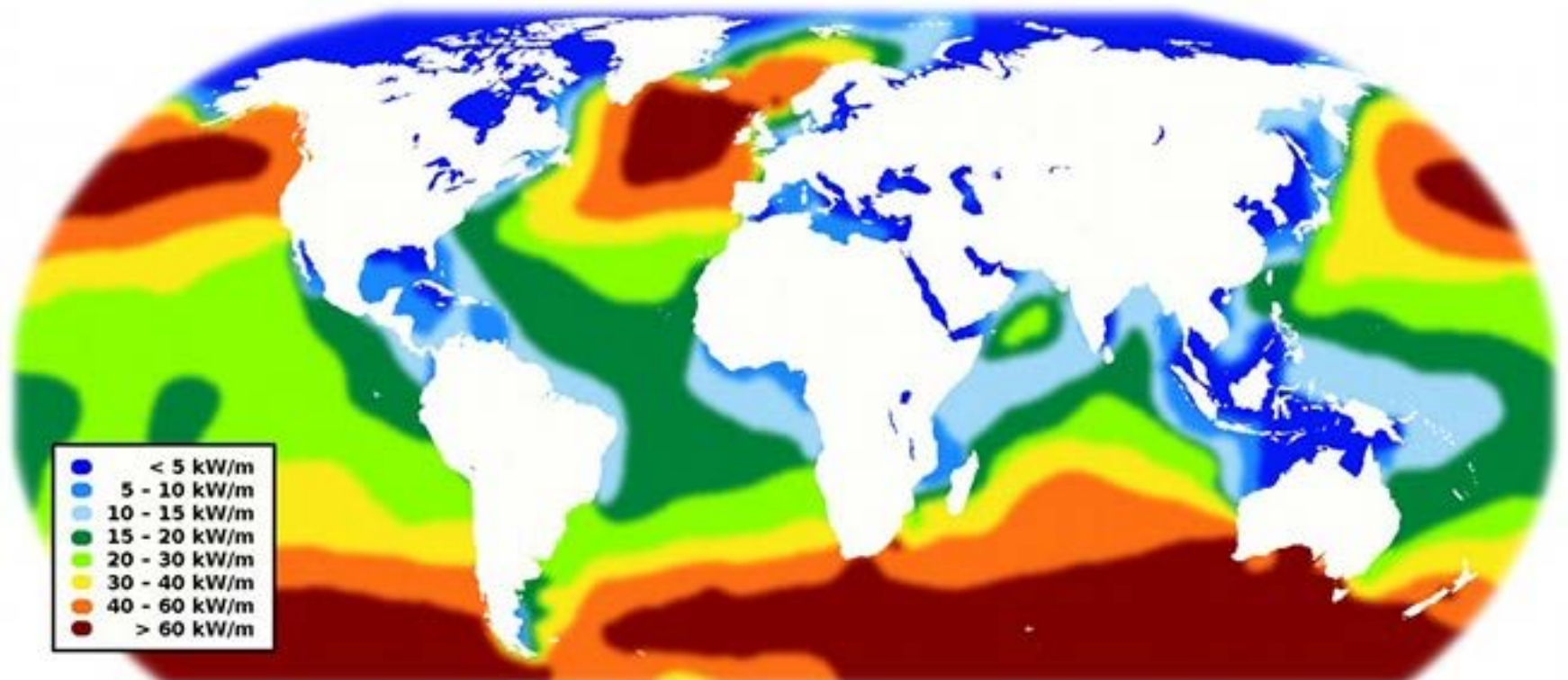
**Membrane ondulante**

**Chaine de nombreux  
générateurs linéaires ayant  
chacun une faible course**



# L'énergie des vagues

**Ressource mesurée en kW/m  
importante dans les zones tempérées**



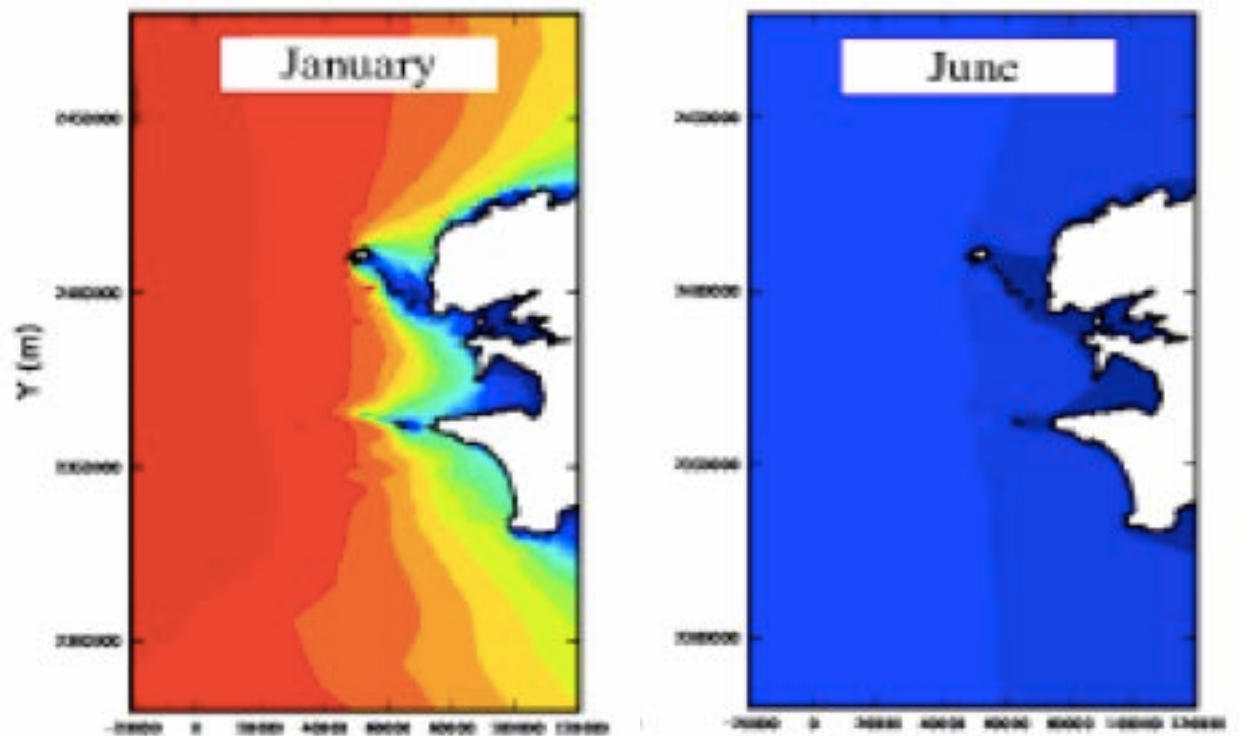


# L'énergie des vagues

## La ressource est forte au large

## Et très variable selon les saisons

Puissance  
moyenne des  
vagues sur le mois  
en Mer d'Iroise



# L'énergie des vagues peut être énorme durant une tempête

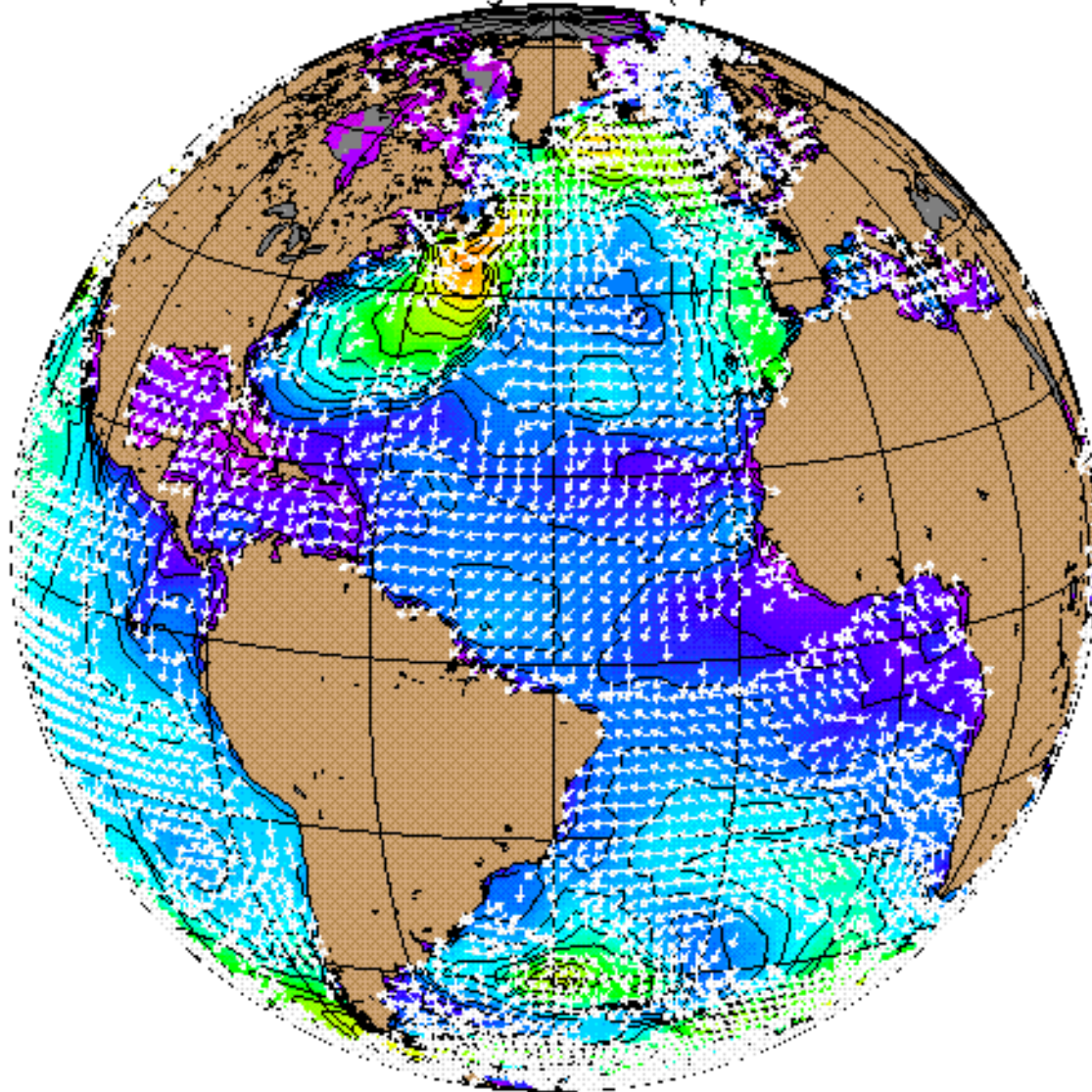
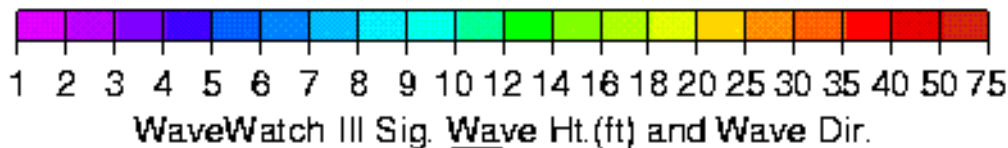
$$E = 0,5 \cdot H_s^2 \cdot T \quad (\text{kW/m})$$

Houle de 2m et de période 4s : 8 kW/m

Houle de 3m et de période 6s : 27 kW/m

Houle de 10m et de période 14s : 700 kW/m

NOAA/NCEP Mar 06 2016 00z 00 hr fcst



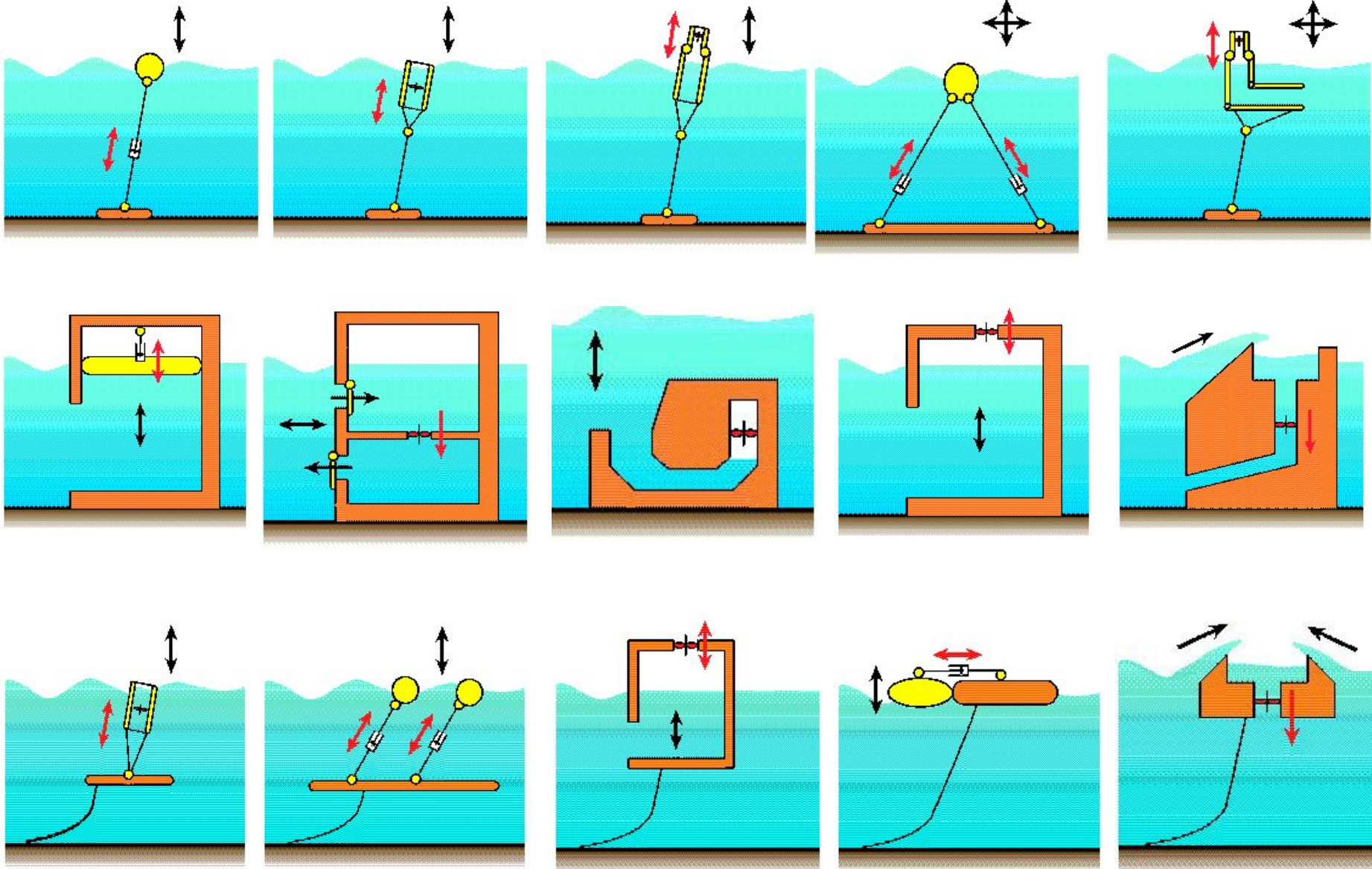
**L'énergie des  
vagues  
est prévisible  
quelques jours  
à l'avance**

**Prévisions du  
6 au 13 mars 2016**

<http://www.lajollasurf.org/gblpac.html>



**D'innombrables solutions ont été imaginées  
(toutes ne sont pas illustrées ici !)**



# Exemple : PELAMIS

**Flotteur articulé - Les mouvements relatifs des articulations des segments sont utilisés pour récupérer l'énergie**

**Pelamis P2 : 750 kW – longueur: 180m – diamètre : 4m – 1350t**

*La société Pelamis Wave Power a été suspendue*

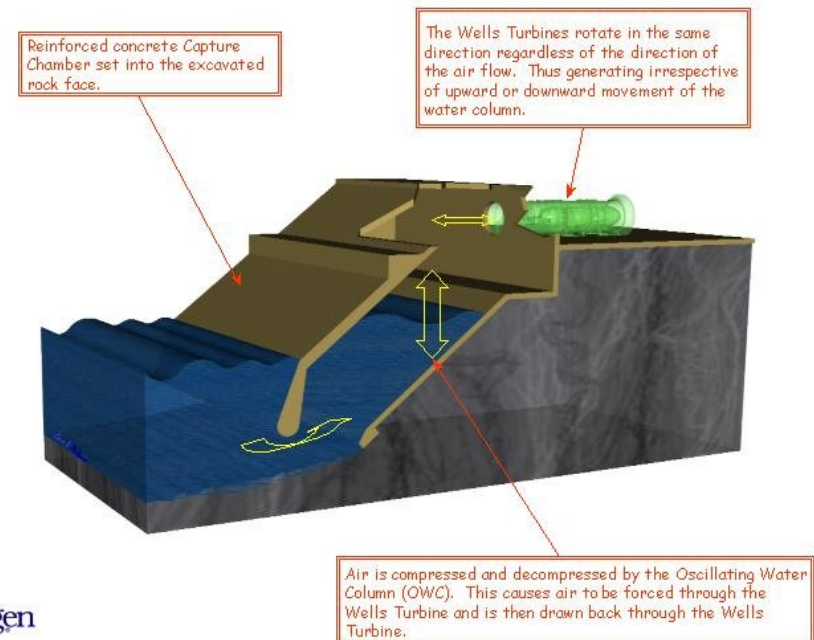




# Exemple : Colonne d'eau oscillante (OWC)

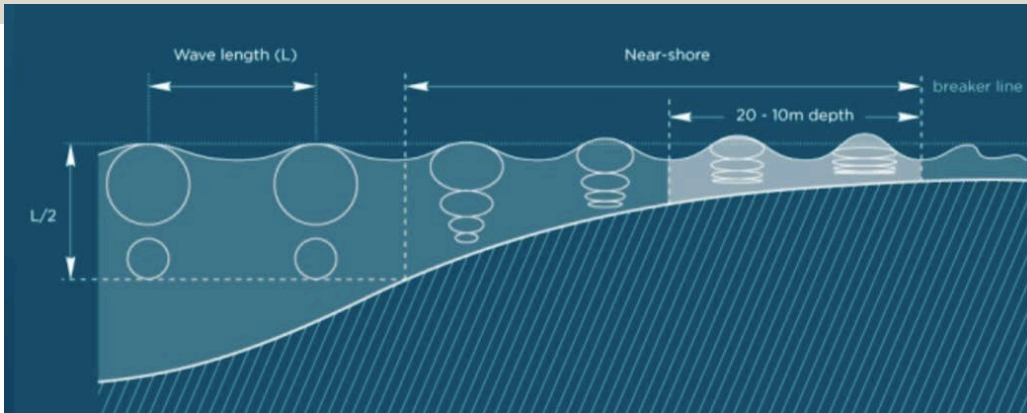
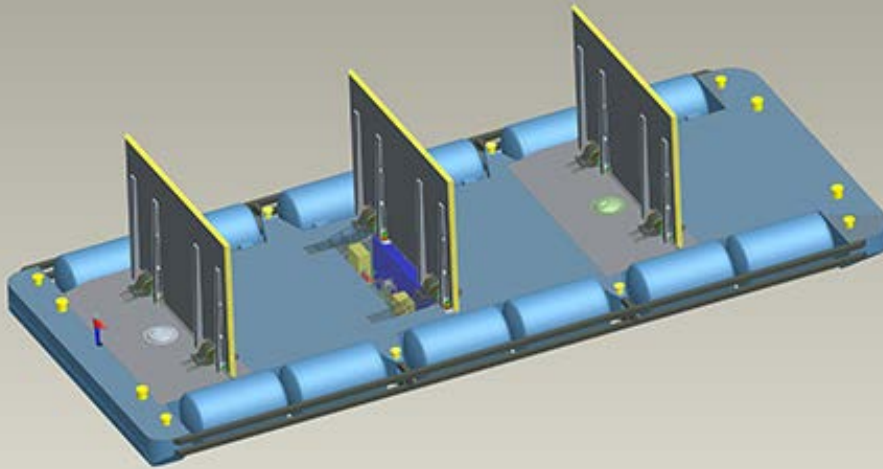
Le mouvement des vagues provoque l'expulsion et l'entrée alternative de l'air dans une chambre connectée à une turbine aérienne

**OWC 296 kW** intégré à la nouvelle digue du port de Mutriku (Pays basque espagnol)



# Exemple : Waveroller

Projet DCNS – Fortum en Baie d’Audierne  
1,5MW avec 3 à 5 machines



Exploitation du mouvement horizontal  
des vagues en faible profondeur d'eau

# Ordres de grandeur des forces

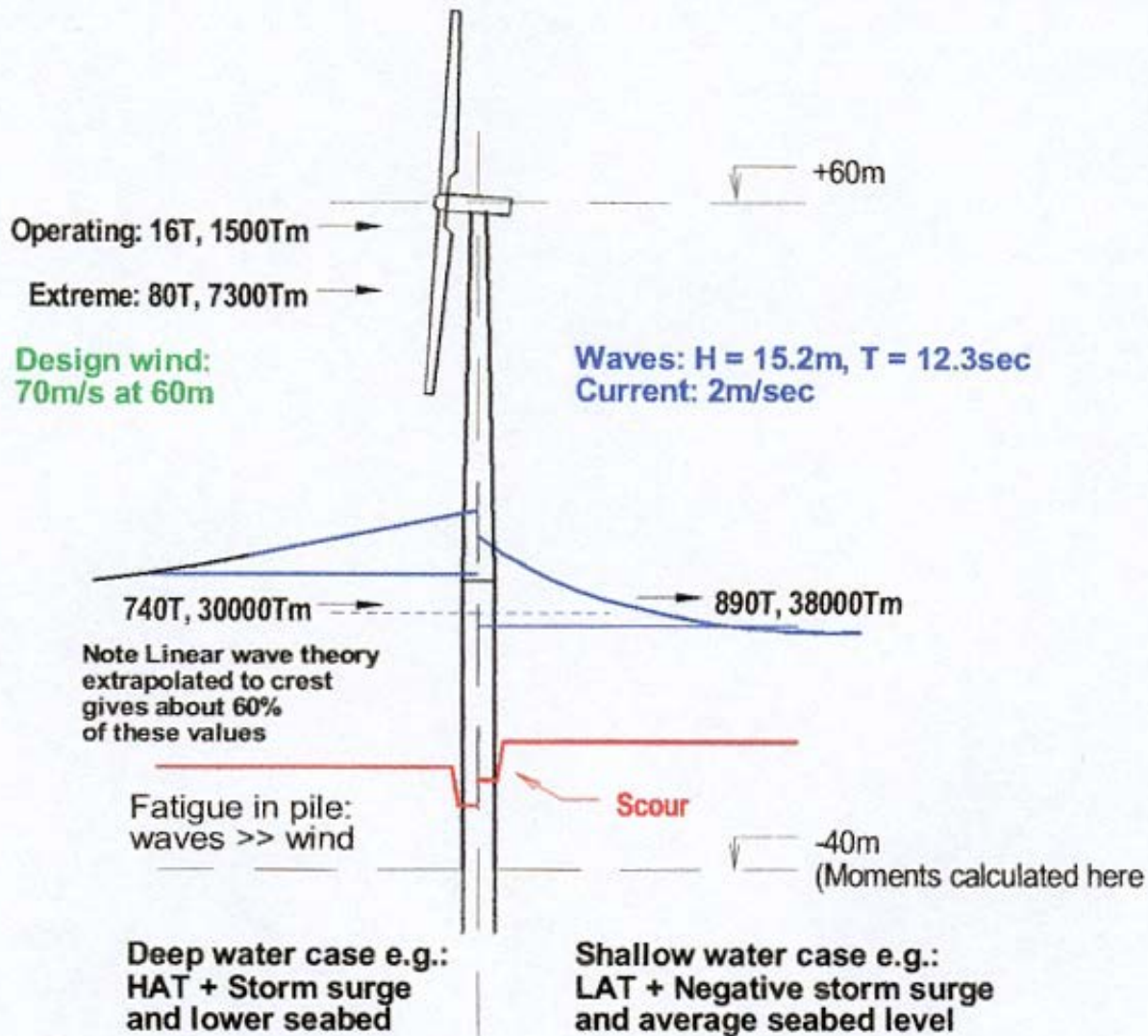
La puissance est donnée par la formule (simplifiée) :

$$\textit{Puissance extraite du fluide (W) = Force exercée sur le fluide (N) x Vitesse (m/s)}$$

- **Soit une installation produisant 1MW:**
- Eolien :  $V = 14\text{m/s} \rightarrow F = 72 \text{ kN}$
- Hydrolien :  $V = 2,5\text{m/s} \rightarrow F = 400 \text{ kN}$
- Houlomoteur:  $V = 0,4\text{m/s} \rightarrow F = 2500 \text{ kN}$

Or, le coût des structures est dicté par les forces  
On voit ainsi une hiérarchie des coûts entre ces énergies

# Ordres de grandeur des forces



1MW Turbine in 20m (LAT) water  
Forces, Moments about -40m

Exemple pour une « petite » éolienne de 1MW

Les forces hydrodynamiques excèdent largement les forces aérodynamiques

Extrêmes en cas de déferlement

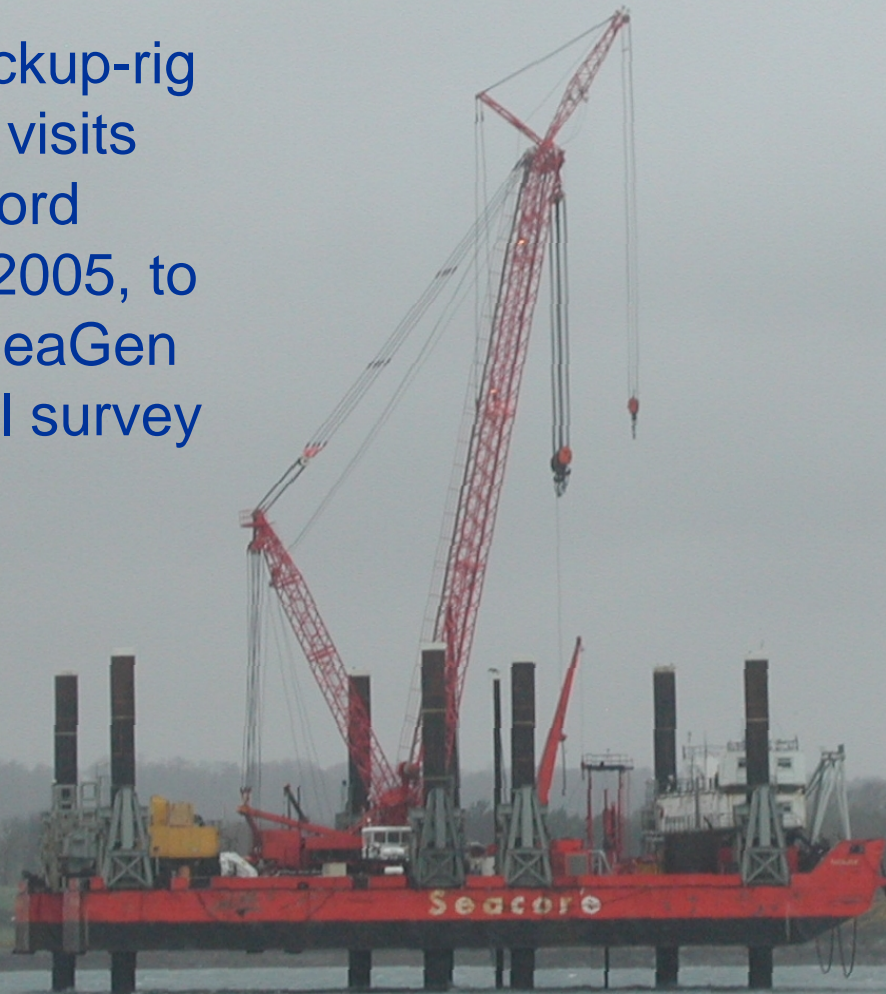
La fatigue est le facteur dimensionnant

La nature du sol intervient dans les calculs



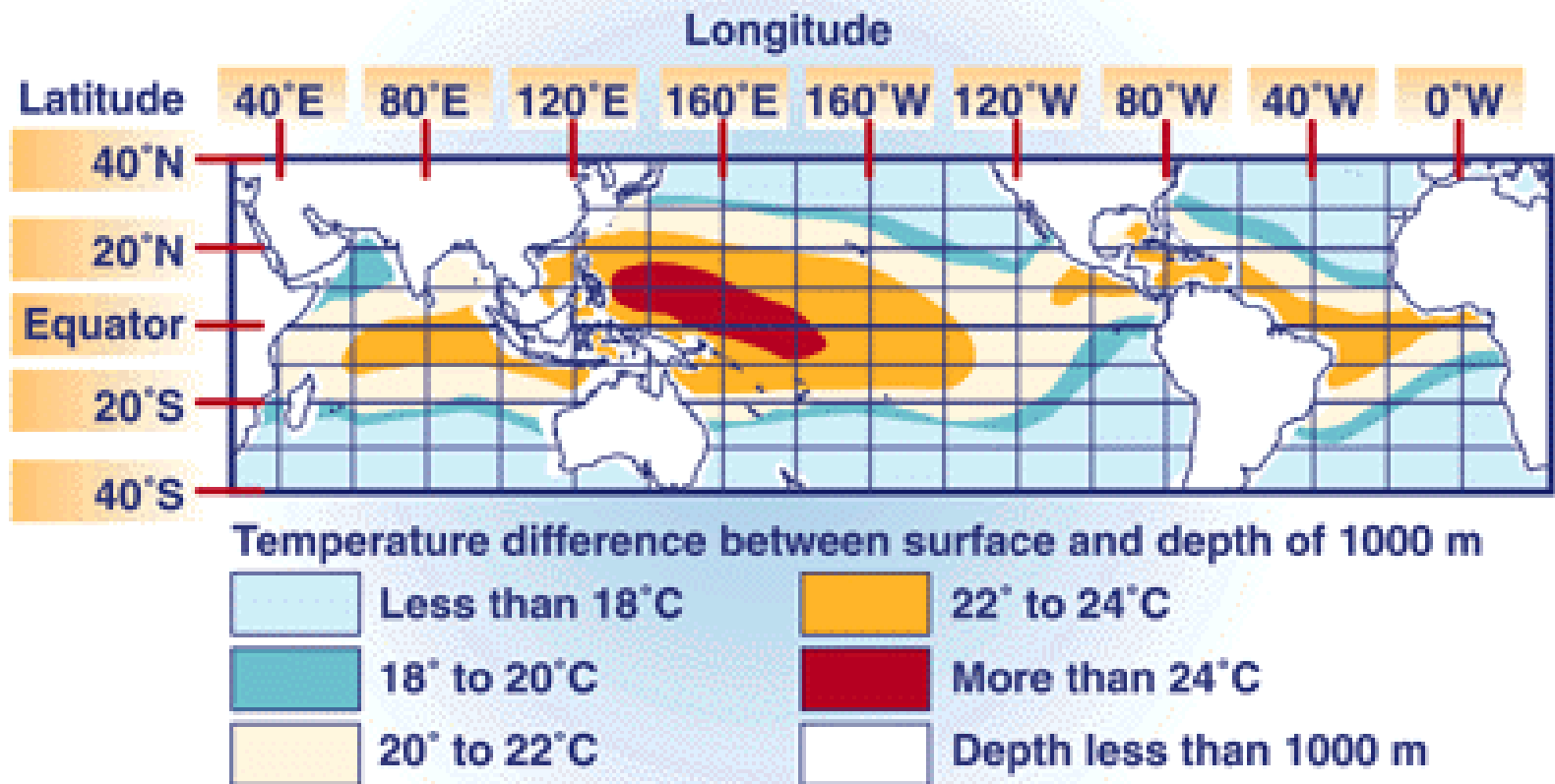
# Les caractéristiques du sol sont primordiales mais les études de sol sont couteuses

Seacore Jackup-rig  
Excalibur visits  
Strangford  
16-19 April 2005, to  
complete SeaGen  
geotechnical survey

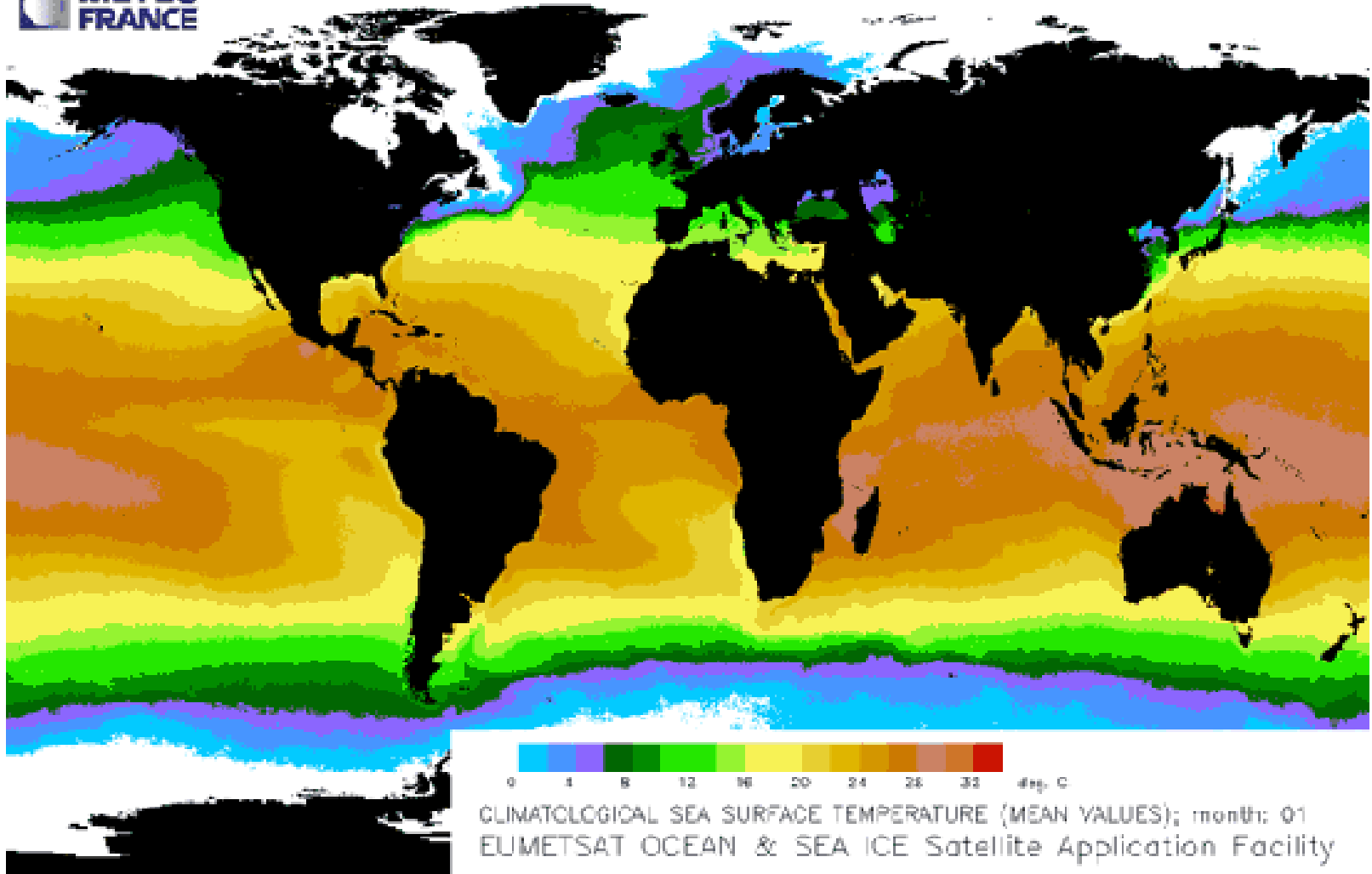


# Energie Thermique des Mers

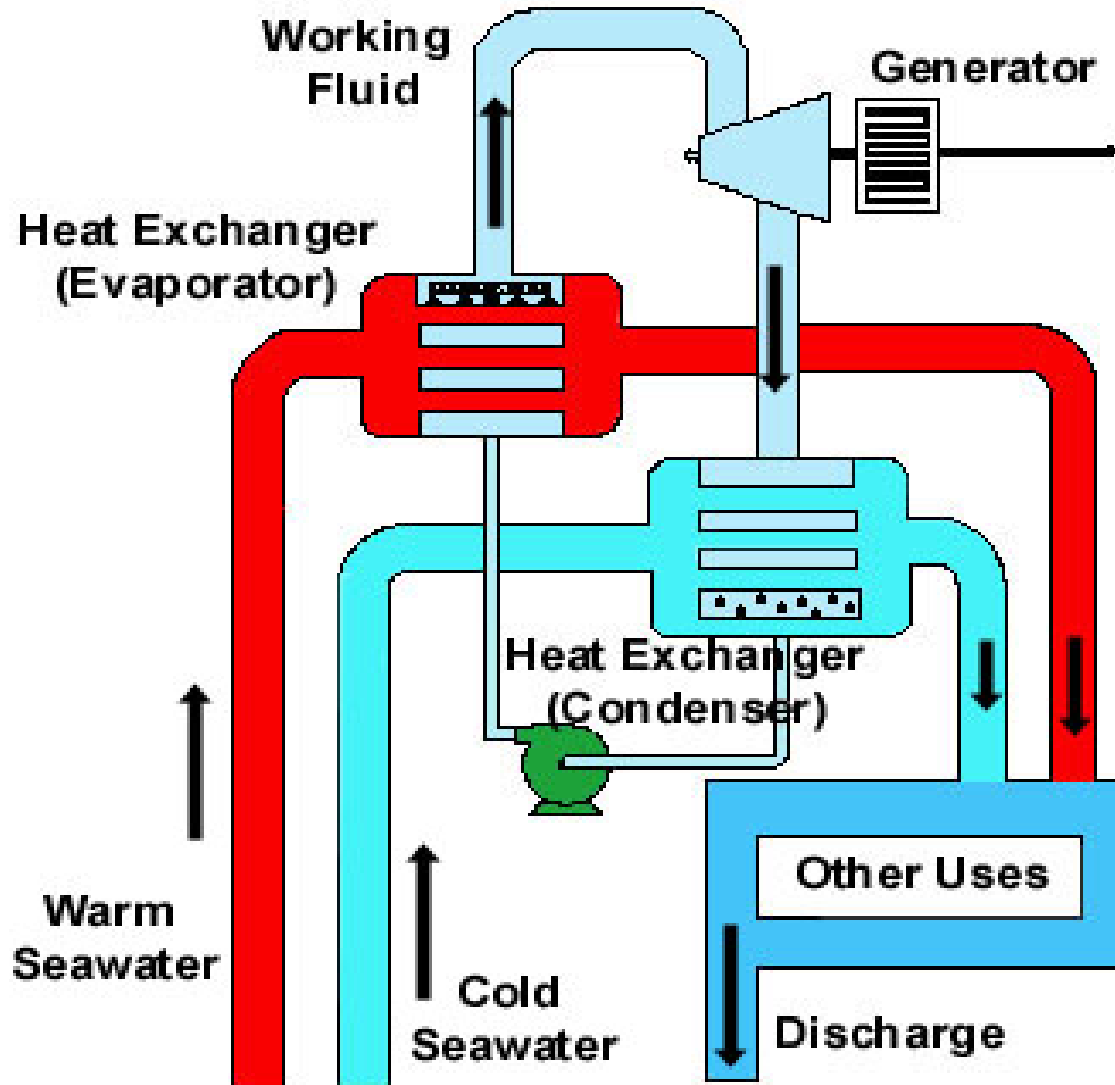
Dans la zone intertropicale la différence de température entre la surface (20°C et plus) et les abysses (4°C) permet de faire fonctionner une machine thermique



# L'ETM est disponible en permanence en toute saison



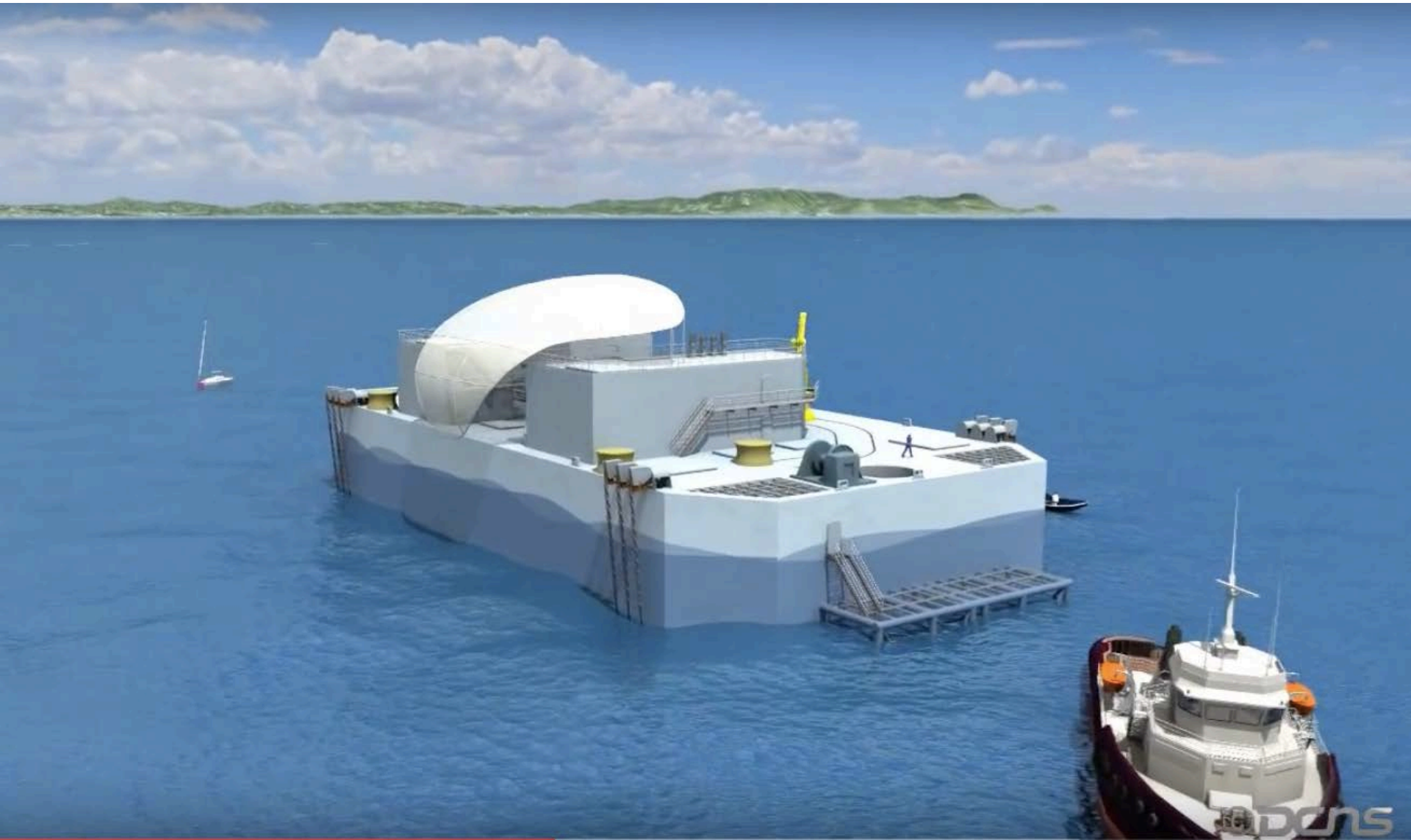
# Ocean Thermal Energy





# L'énergie thermique des mers

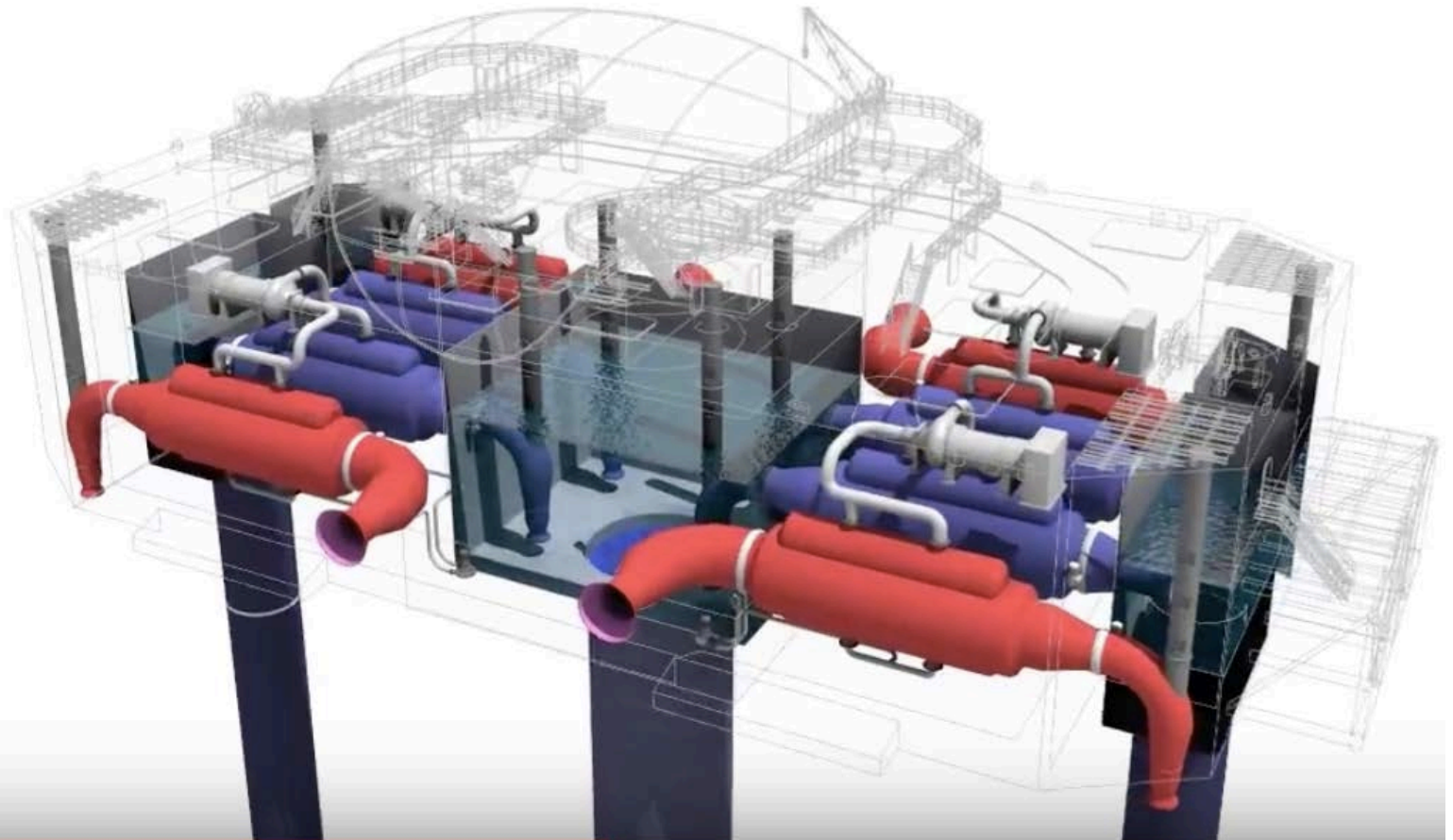
Projet NEMO à La Martinique (2020) – DCNS-Akuo Energy -



# L'énergie thermique des mers

Eau chaude : 25°C – Eau froide : 5°C à 1000m

Puissance brute: 16MW – Puissance nette: 10,7MW





# Climatisation par eau froide



# Quelques généralités communes aux ERMs



# Equipements électriques spéciaux





# Environnement

**Les salissures marines doivent être prise en compte dans le dimensionnement des structures**

**Une protection anti-salissures peut être indispensable – Ex: rotor d'hydrolienne**

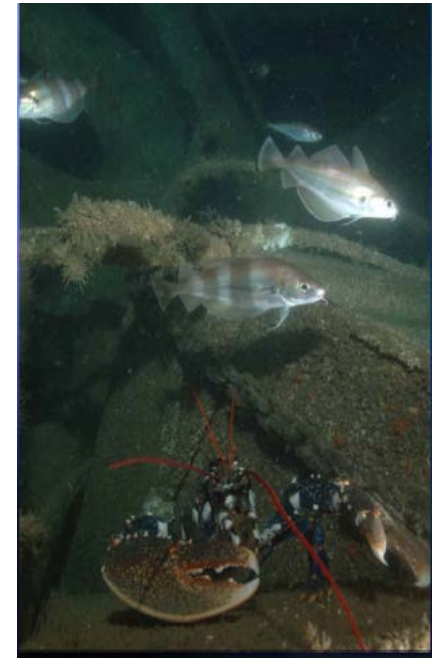


# Environnement

Les structures peuvent être conçues pour jouer le rôle de récifs artificiels

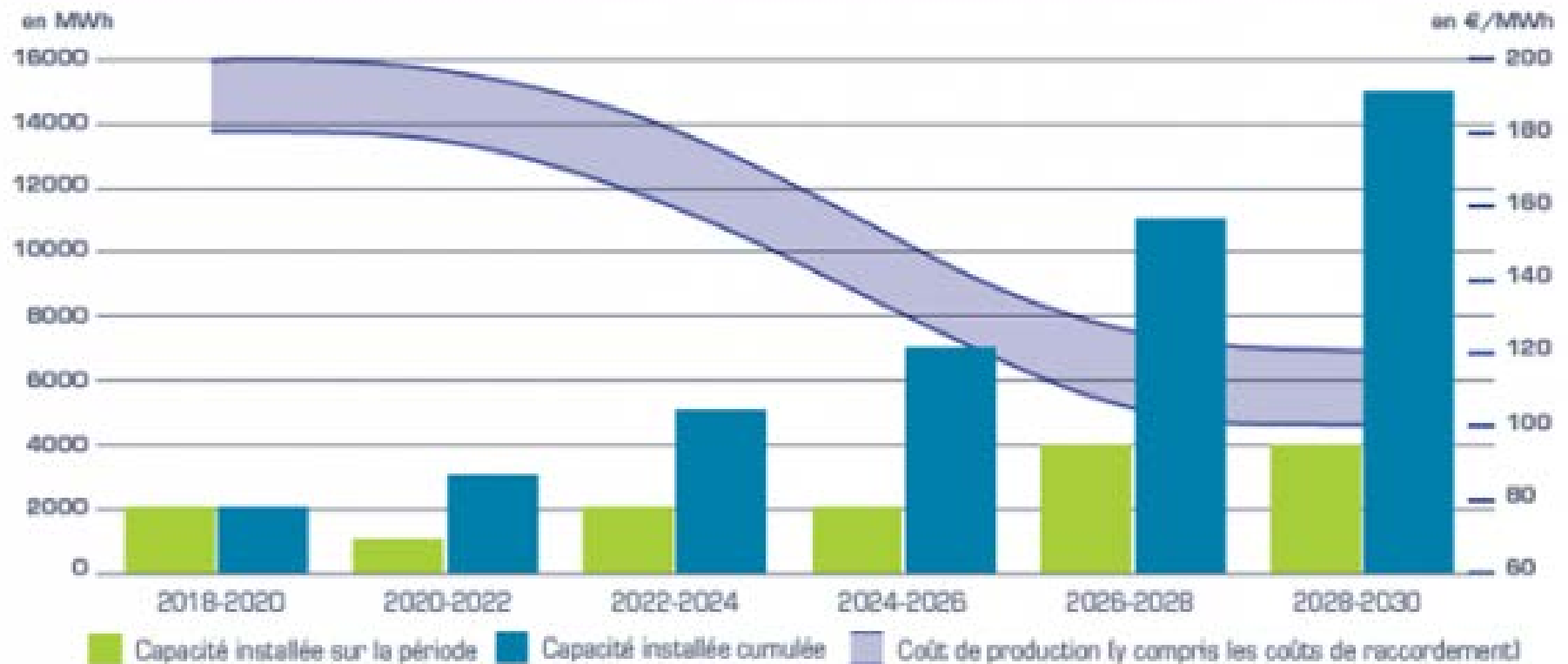


Exemple de récif installé devant Fécamp et poissons réfugiés à l'intérieur



# Les coûts : exemple éolien offshore

## PERSPECTIVE D'ÉVOLUTION DE LA CAPACITÉ INSTALLÉE ET DU COÛT DE PRODUCTION DE L'ÉOLIEN EN MER POSÉ EN FRANCE SUR LA PÉRIODE 2018-2030



Source : « Définition de zones propices à l'implantation d'éoliennes en mer, Contribution du Syndicat des Energies Renouvelables », SER 2015



# Beaucoup de concertation est indispensable

La pêche est une activité en crise – Concertation indispensable



Source :

Pour la Science  
N° 357

**N'oubliez pas que la mer appartient à tous**



# La sécurité est un souci primordial



Travail en mer (installation – maintenance) seulement possible par beau temps – Accès difficile à la mauvaise saison – Une bonne fiabilité des installations est indispensable – Télémaintenance systématique







En mer, tout doit être dimensionné pour résister aux tempêtes



Le phare de Kéréon – un jour de tempête

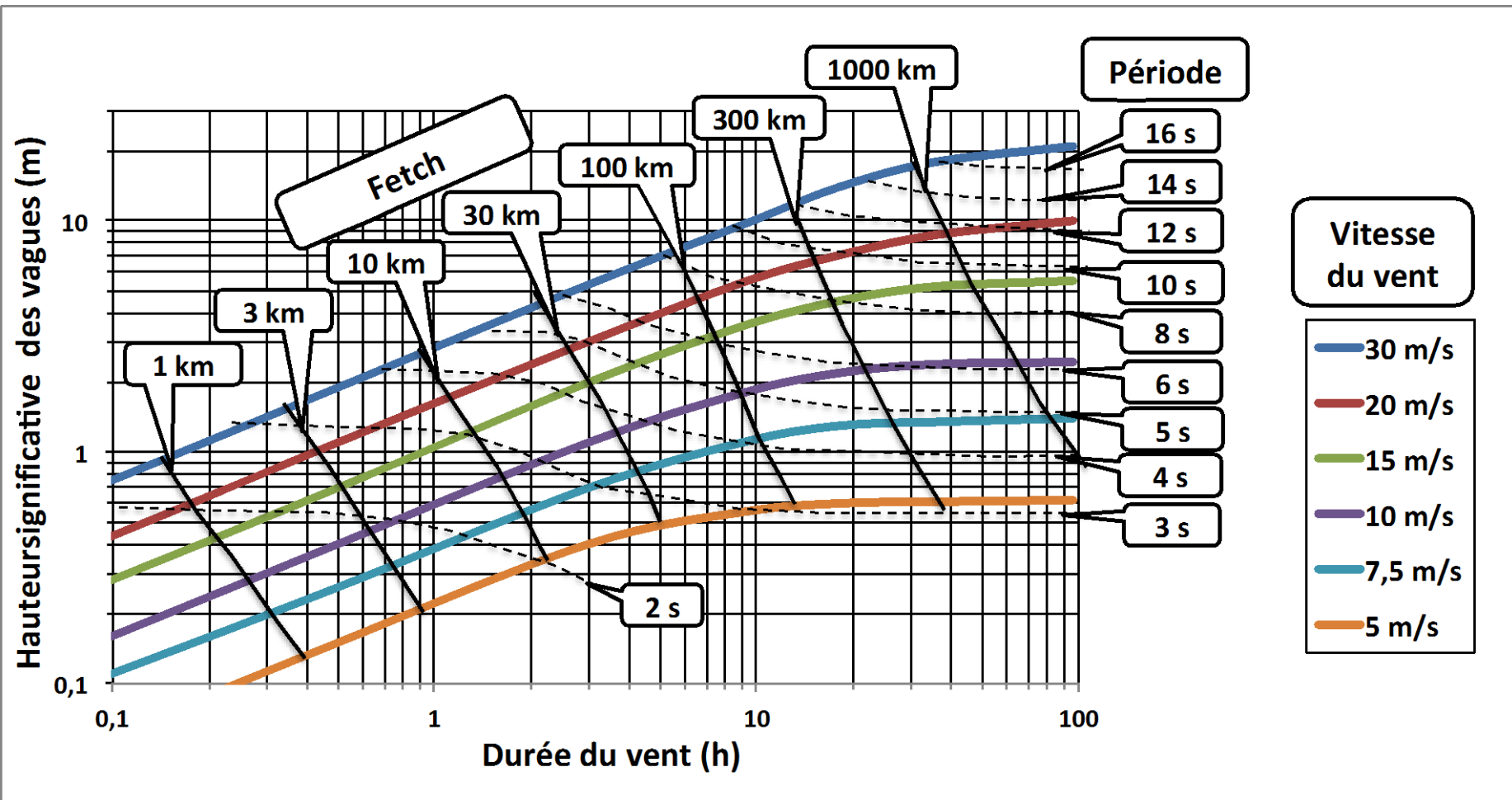
# Les contraintes communes aux énergies marines

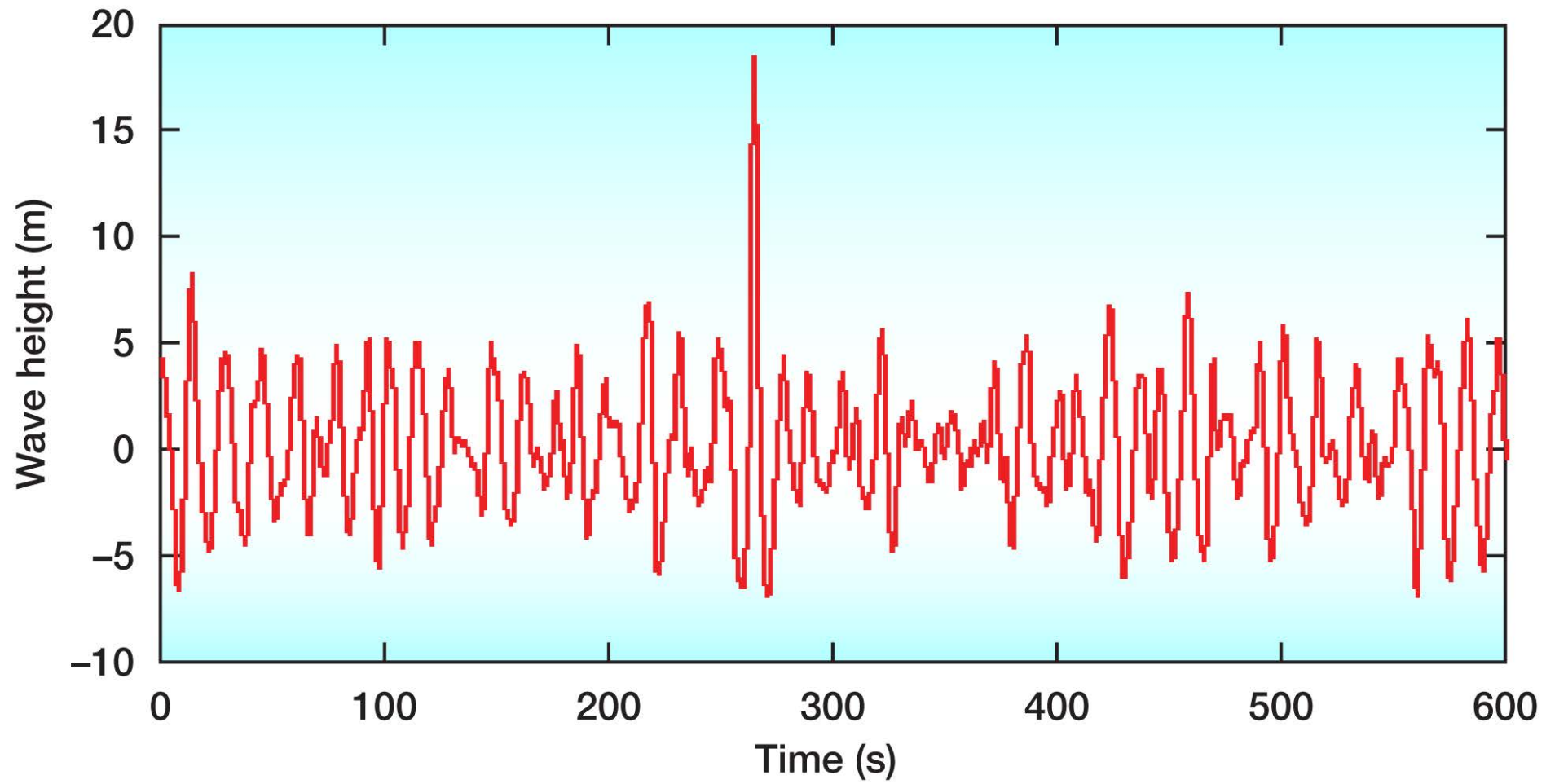
- **Sécurité** des biens et des personnes: Souci primordial
- **Ressource et conditions de site:** Variables d'un site à l'autre – pas d'équipement standard
- **Gros efforts hydrodynamiques:** infrastructures lourdes
- **Installation:** Possible seulement par beau temps – Moyens navals spécialisés, offre réduite, surtout en France
- **Maintenance en mer:** Accès aux installations difficile - fiabilité essentielle – peu de navires adaptés
- **Sols variés:** Etudes de sol coûteuses (navires spécialisés) – Fondations de grandes masses/dimensions à construire et à installer
- **Salissures marines:** Impact à prendre en compte – protection antifouling
- **Electricité :** Câbles spéciaux – beaucoup d'électronique de puissance (offshore et onshore) – Les connecteurs de puissance pour les installations sous-marines nécessitent des développements pour baisser les coûts

# Conclusions

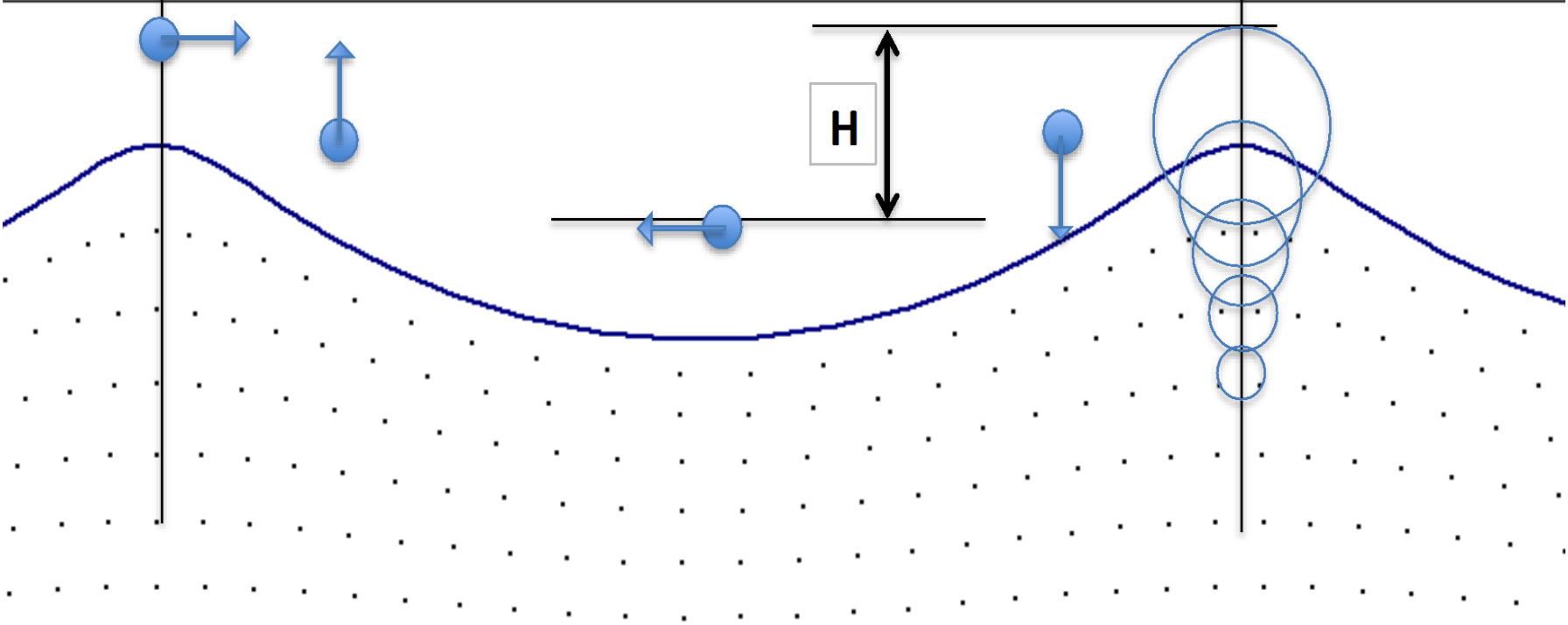
- Ressources ERM abondantes en France:
  - Eolien posé et flottant
  - Fortes marées et courants dans la Manche
  - Houle au large façade Atlantique et DOM-TOM
  - ETM dans les DOM-TOM
- Acteurs français présents
- Besoin de soutien à la R&D pour lever certains verrous technologiques et faire baisser les coûts

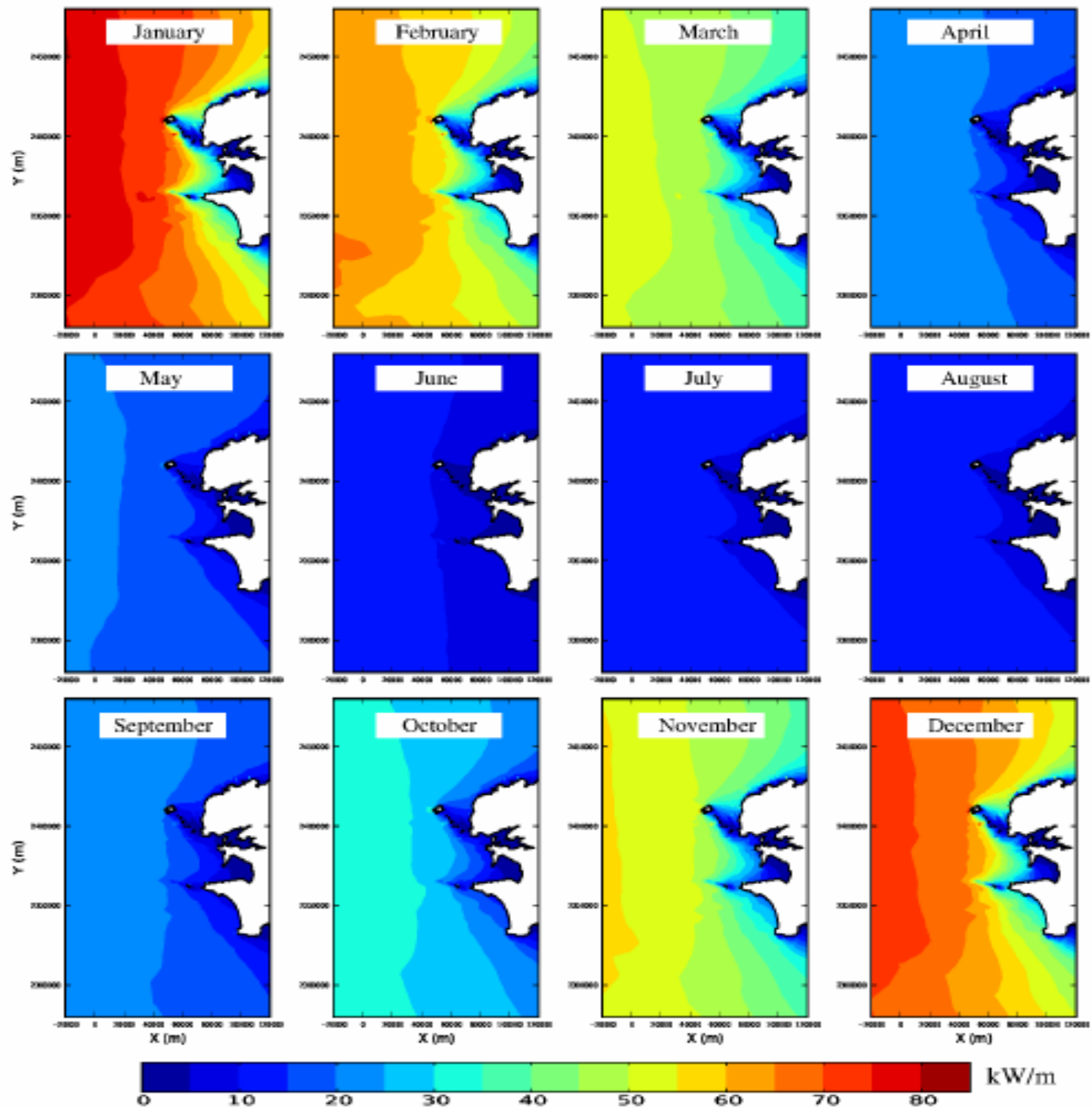




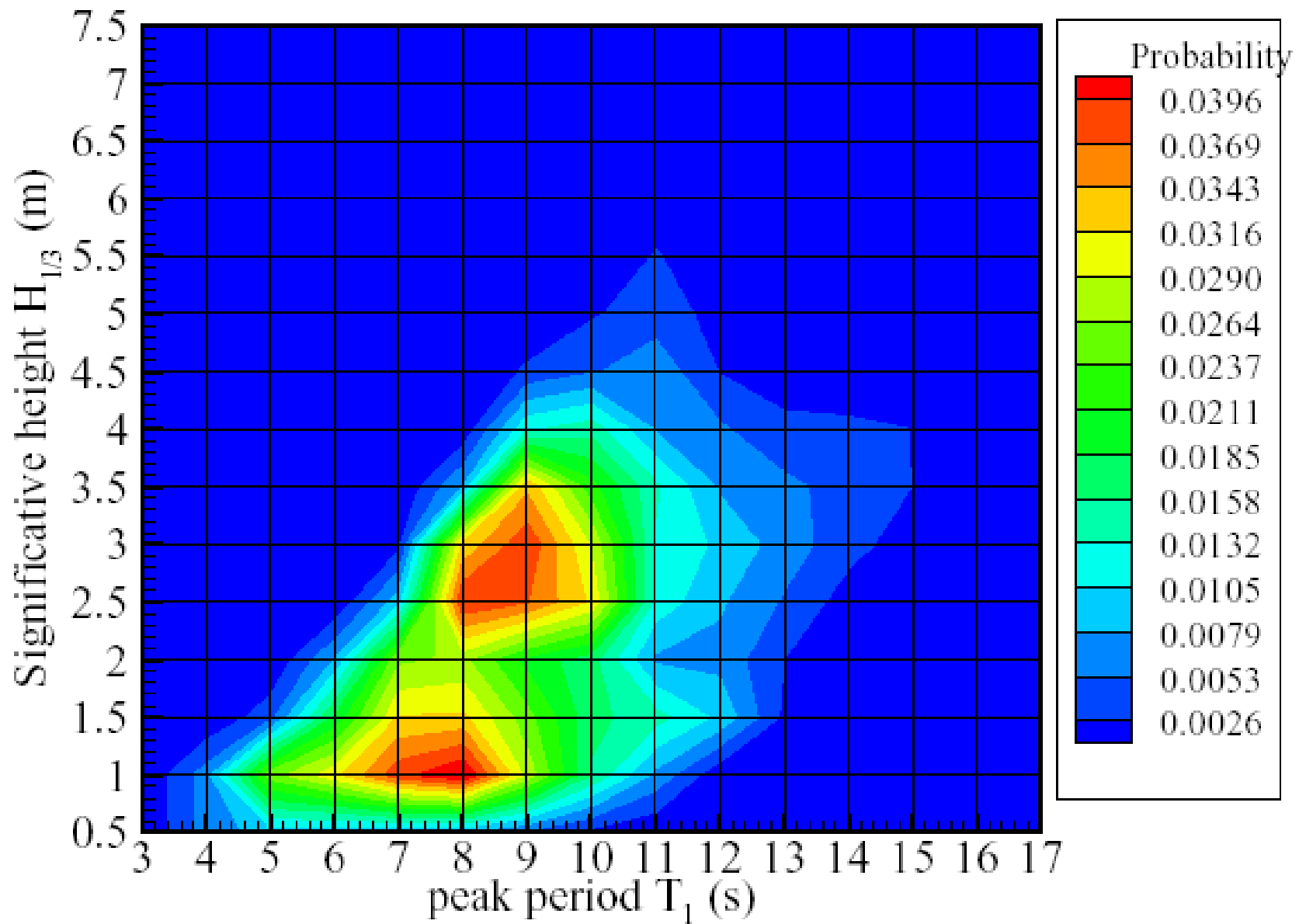


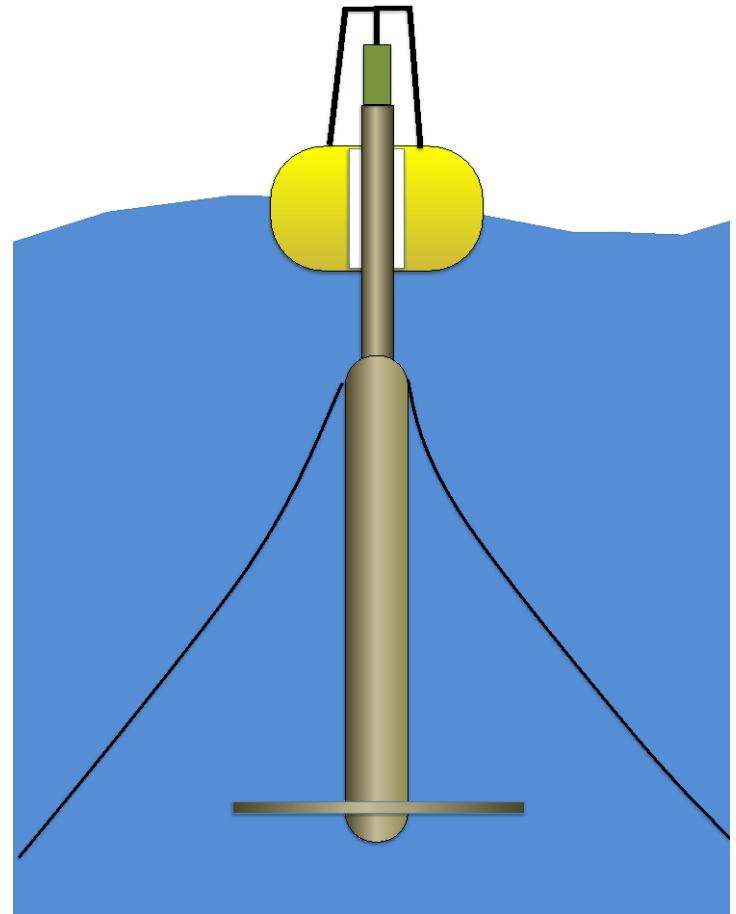
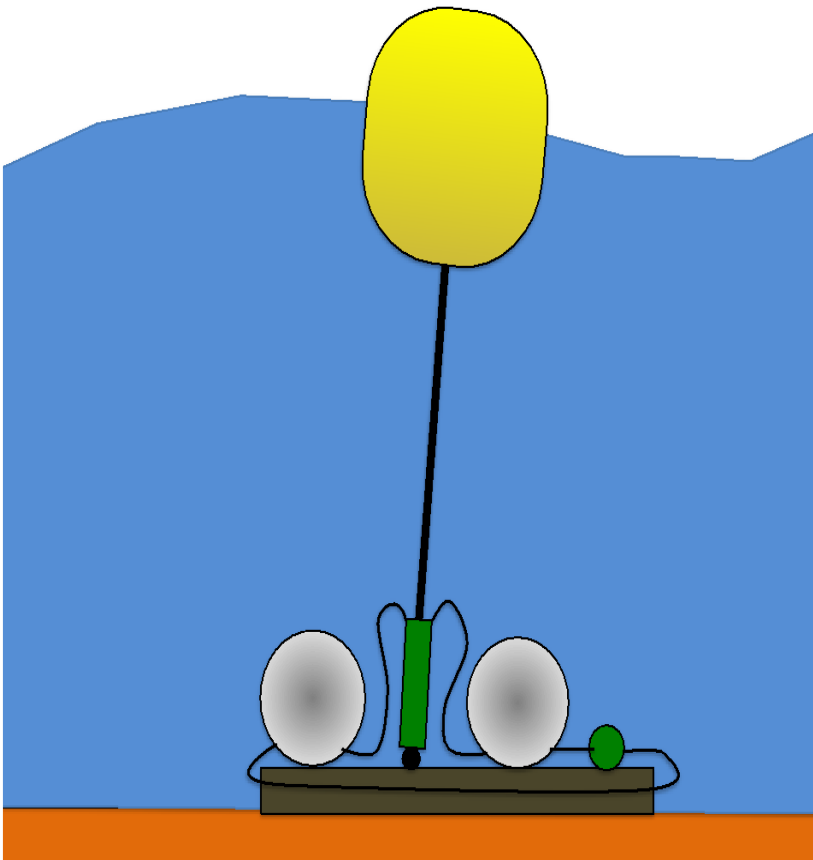
Affichage Insertion Format Outils Dia **Longueur d'onde  $\lambda$**  Tapez

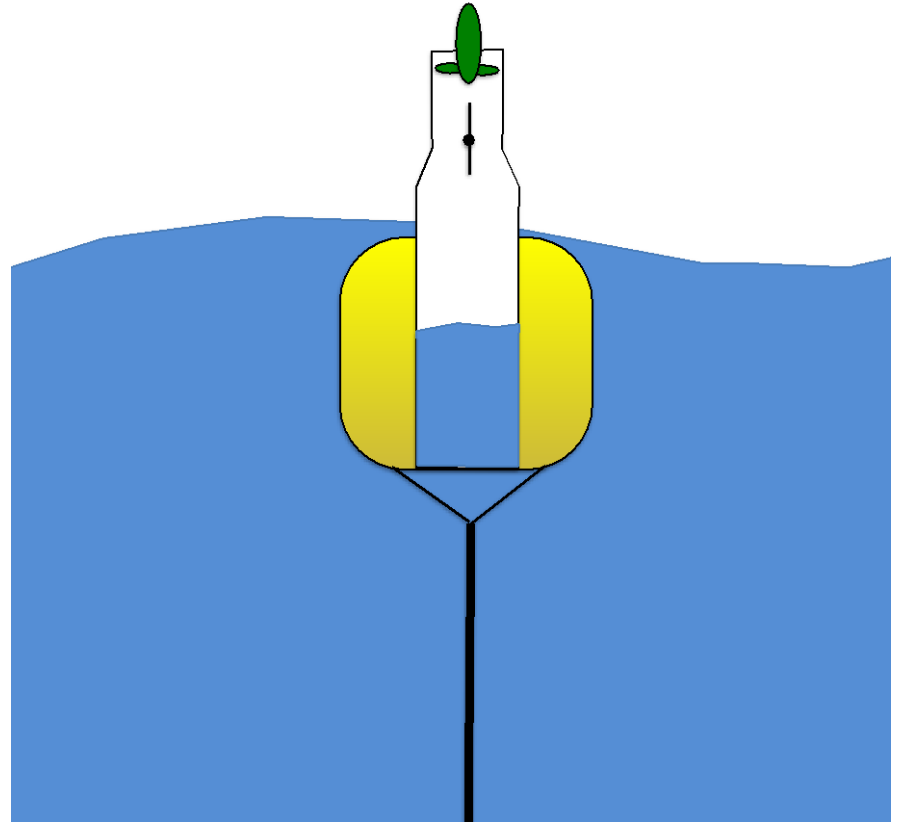
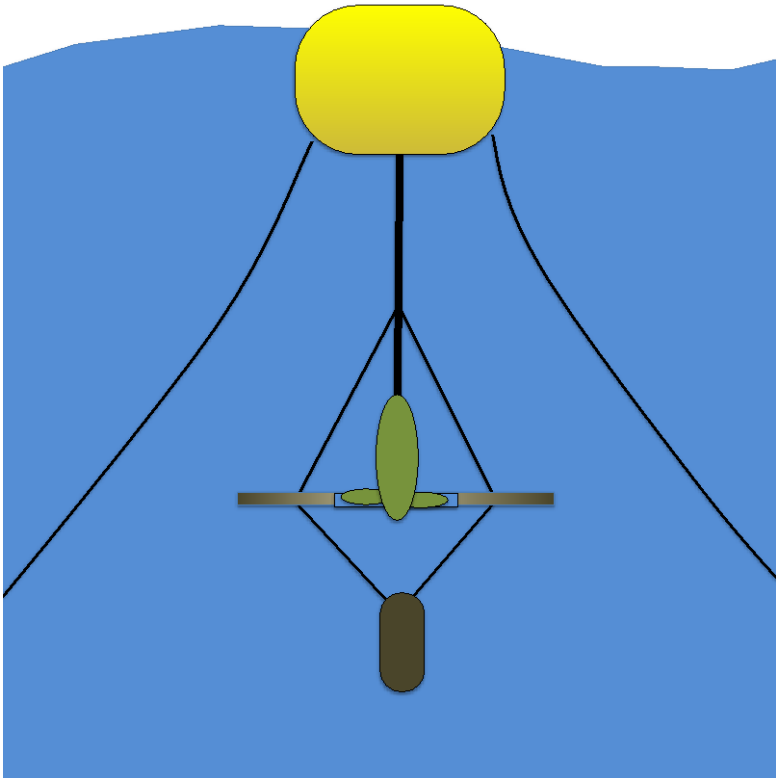


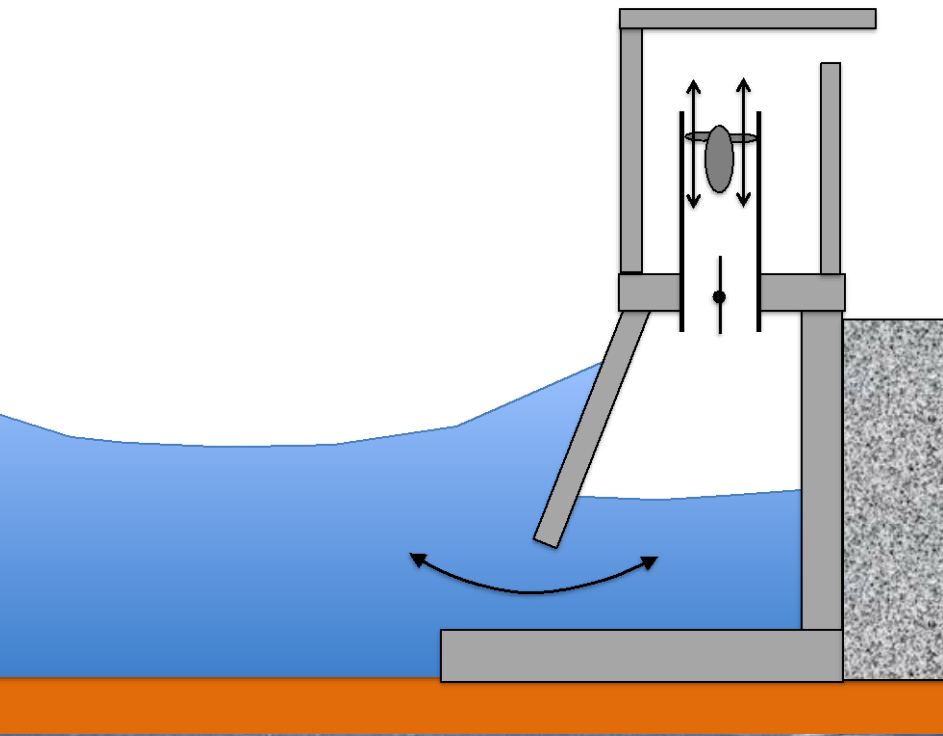




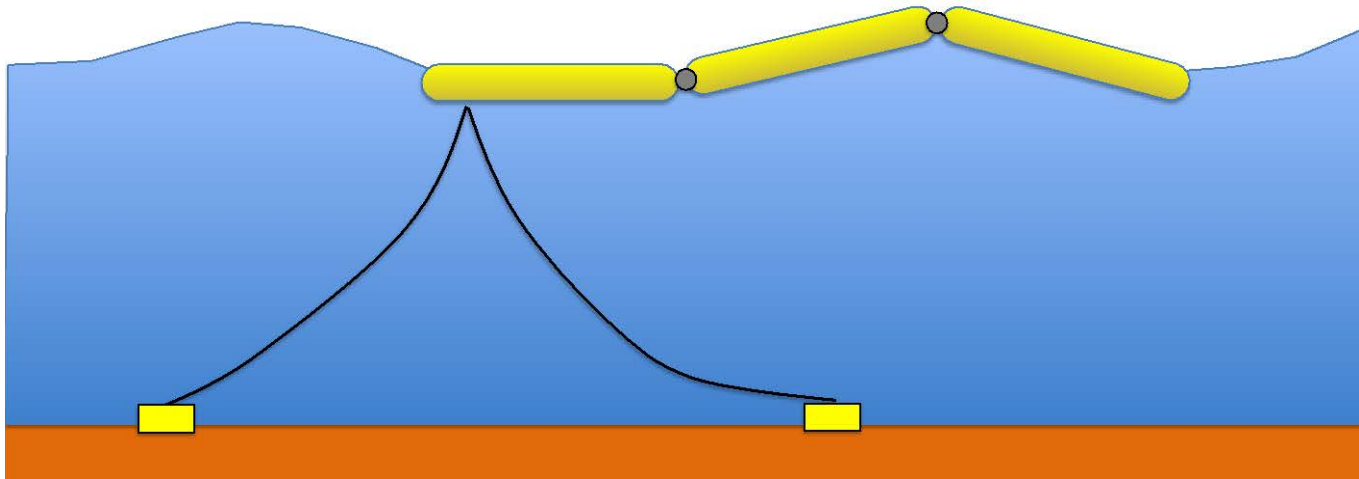
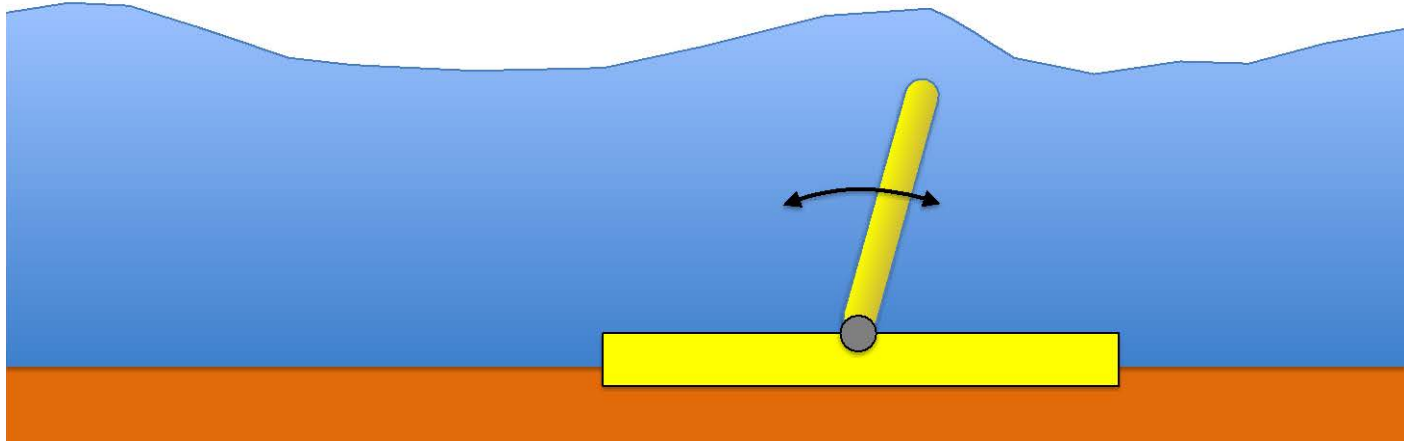


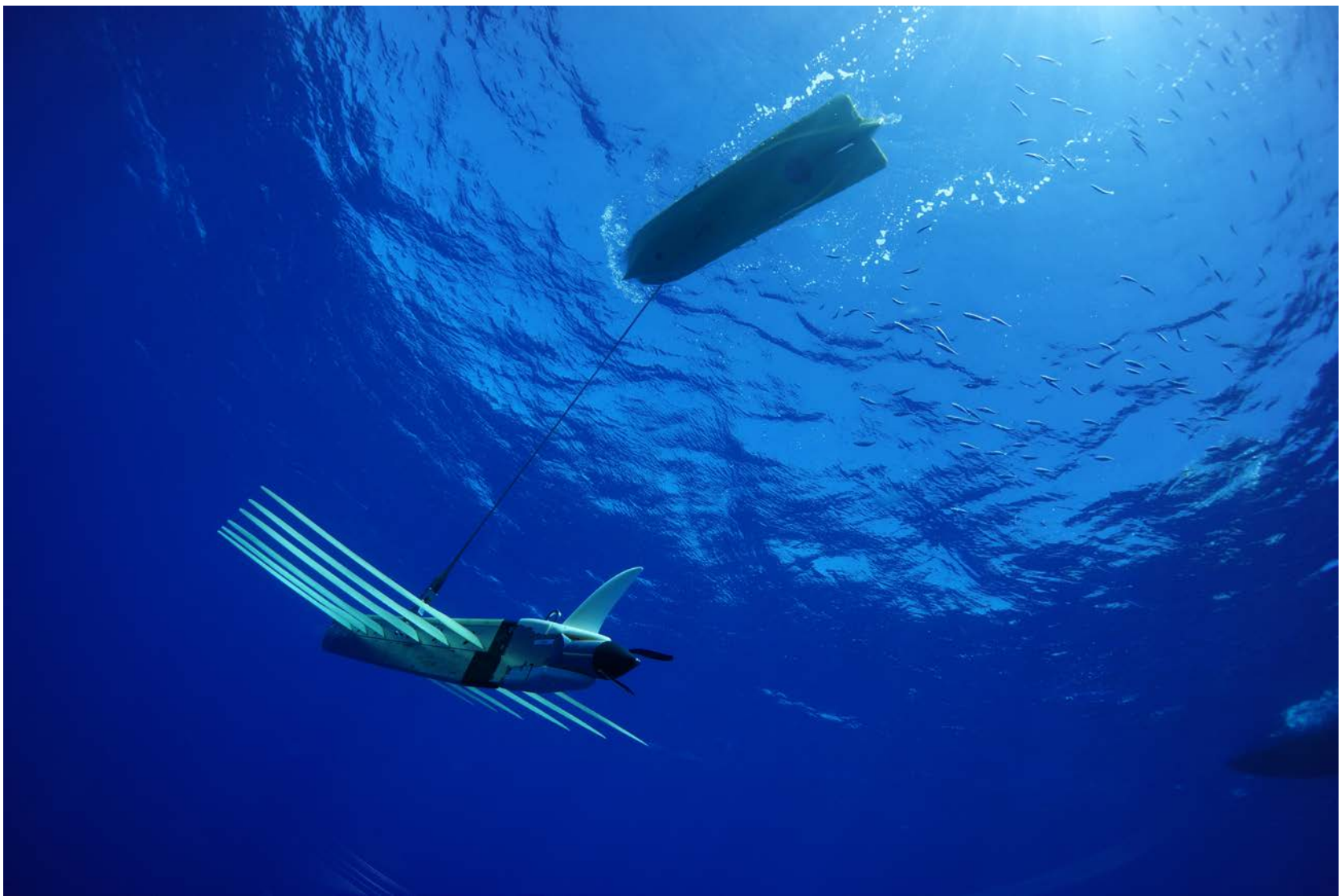




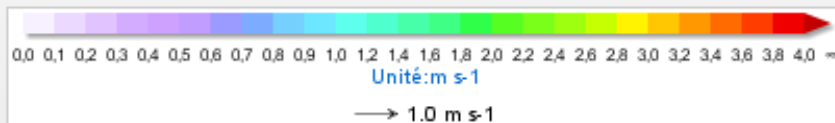
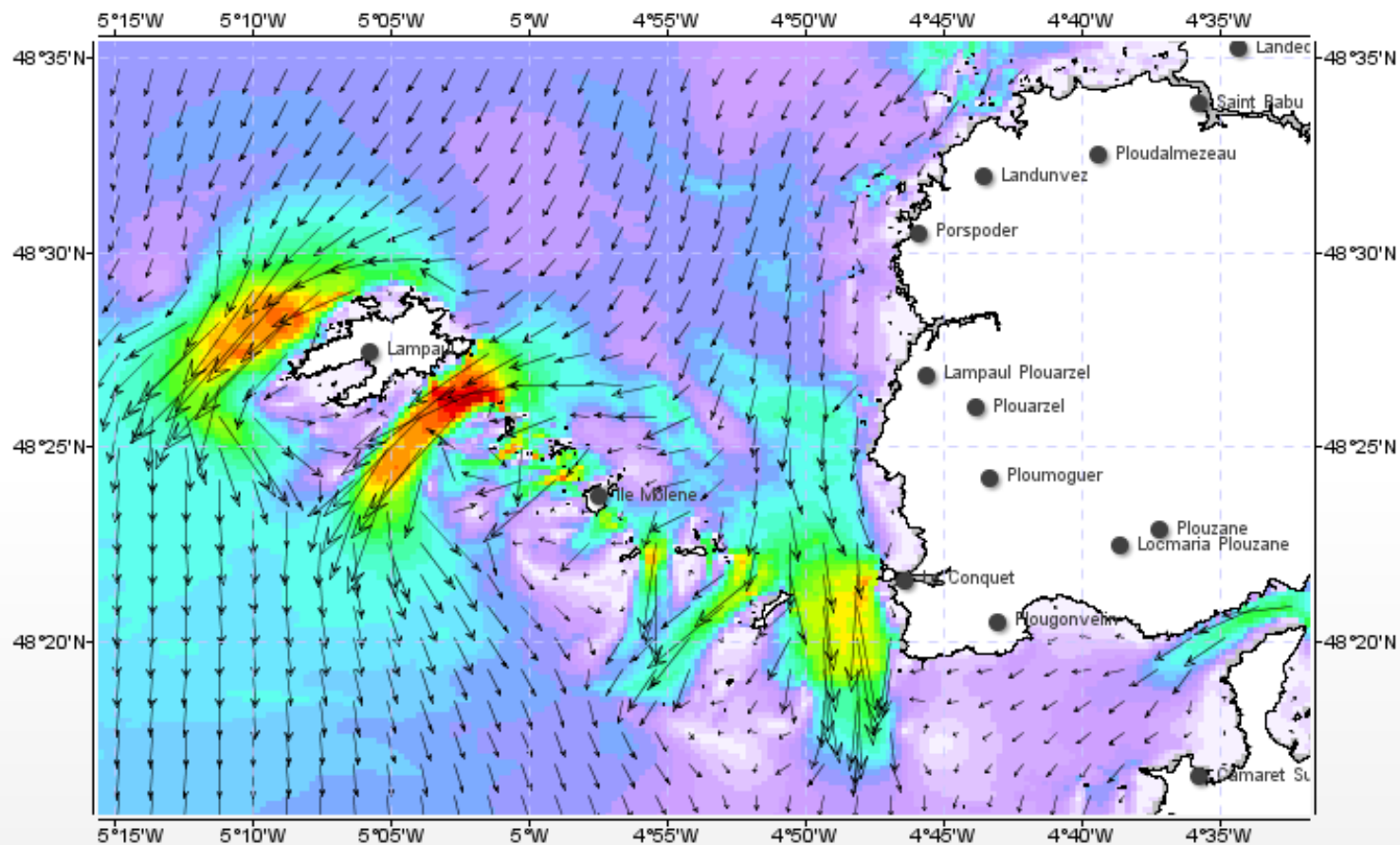








**Direction et intensité des courants moyens sur  
la verticale le 12/02/2016 10:30** (heure légale) mise à jour du 12/02/2016 11h59



Moy. : 0,86 m s<sup>-1</sup> · Min. : 0,00 m s<sup>-1</sup> / Max. : 4,27 m s<sup>-1</sup>

VITESSE ET DIRECTION DES  
COURANTS DE MAREE (V.E Surface)  
SH550

0 2 4 Noeuds

