
Introduction à l'Énergie des vagues

Aurélien Babarit

Laboratoire d'Hydrodynamique, d'Énergétique et d'Environnement
Atmosphérique (LHEEA)
CNRS UMR 6598

Ecole Centrale de Nantes

Plan de l'exposé

- > Le gisement « Énergie des vagues »
- > Éléments de marché
- > Systèmes de Récupération de l'Énergie des vagues (Houlomoteurs ou Houlogénérateurs)
- > Éléments de rendements hydrodynamiques
- > Les nouvelles tendances

Le gisement Énergie des vagues

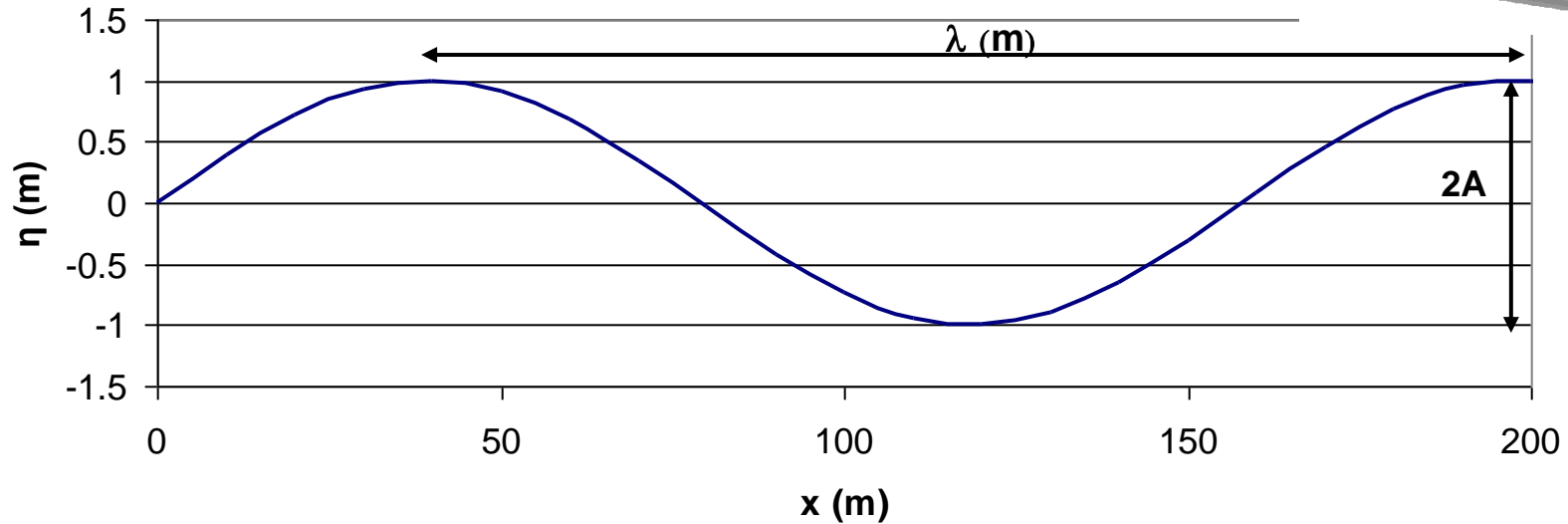
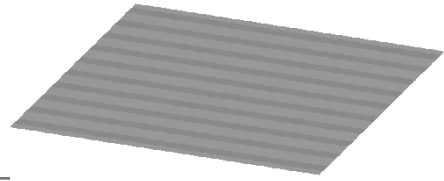


Physique des vagues océaniques



- > Ondes de gravité se propageant à la surface des océans
- > Effets de compressibilité et de viscosité du fluide sont négligeables → propagation sur de longues distances (10^2 - 3 kms)
 - Vrai tant que la profondeur est constante et que les vagues ne déferlent pas
- > Écoulement irrotationnel (pas de tourbillons, pas de turbulence)

Houle d'Airy (en profondeur infinie)



> Solution élémentaire du problème de la propagation d'une onde régulière η à la surface d'un fluide (profondeur infinie) :

$$\eta(x,t) = -\frac{1}{g} \frac{\partial \phi}{\partial t} \Big|_{z=0} \quad \phi(M,t) = \Im\left(\frac{ig}{\omega} A e^{k(z-ix)} e^{i\omega t}\right)$$

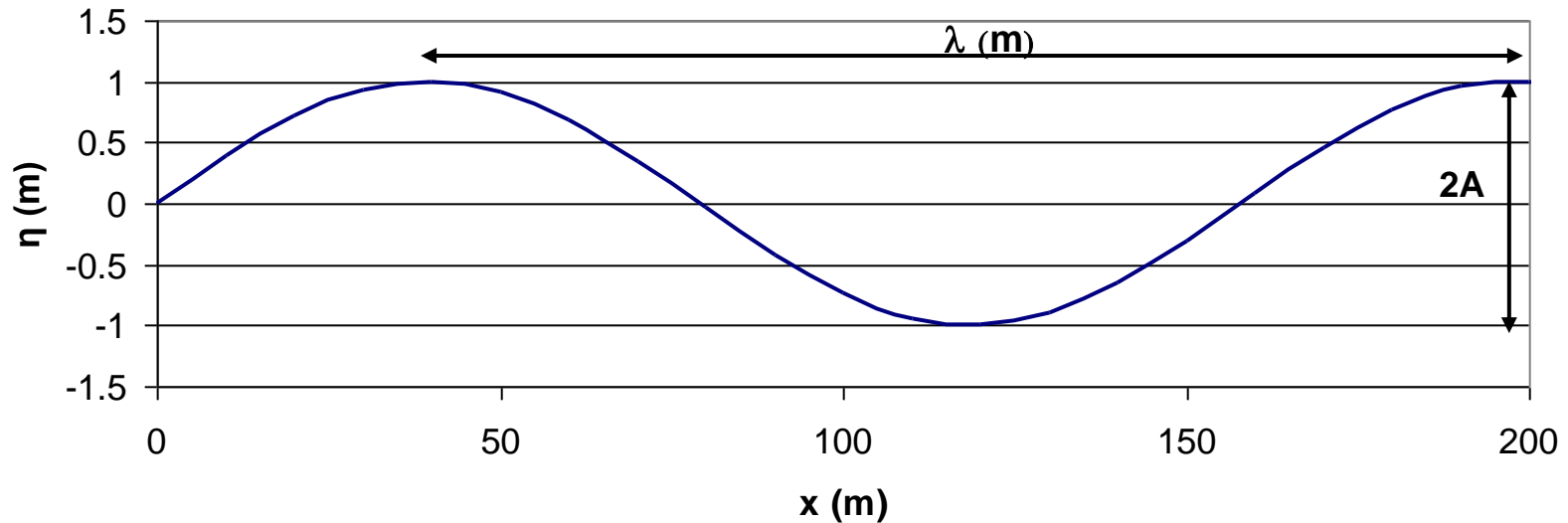
> Relation entre période temporelle et période spatiale (longueur d'onde)

- Relation de dispersion
- Imposée par les conditions de surface libre (linéarisées):

Ordres de grandeur pour T?
pour λ ?

$$kg = \frac{2\pi g}{\lambda} = \omega^2 \quad \Rightarrow \quad \lambda = 1.56T^2$$

Houle d'Airy (en profondeur infinie)

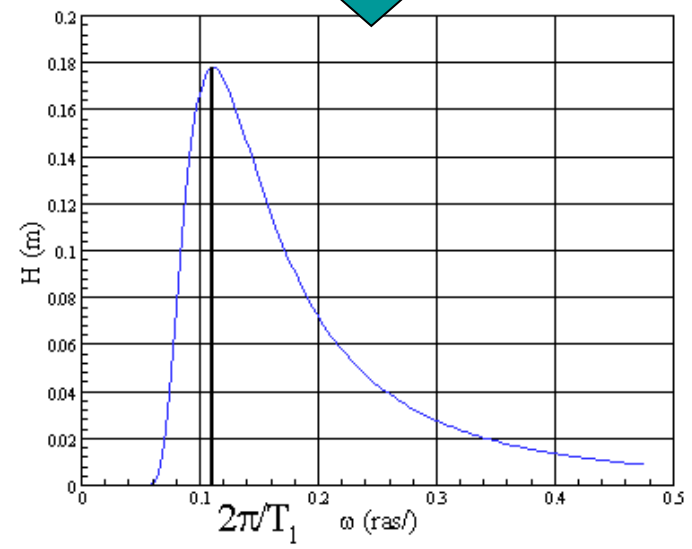
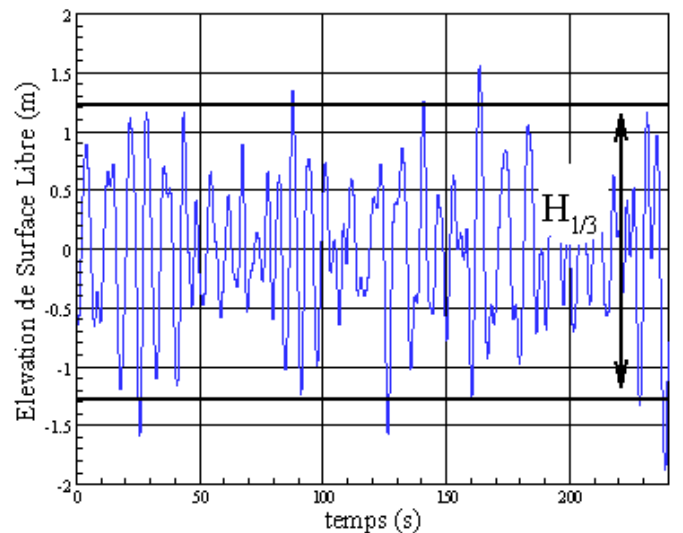


> Flux moyen d'énergie par mètre de front d'onde :

- Unité: kW/m de front d'onde
- Proportionnel au carré de la hauteur de vagues
- Proportionnel à la période

$$P = \frac{1}{8\pi} \rho g^2 A^2 T$$

Modélisation de la houle en mer

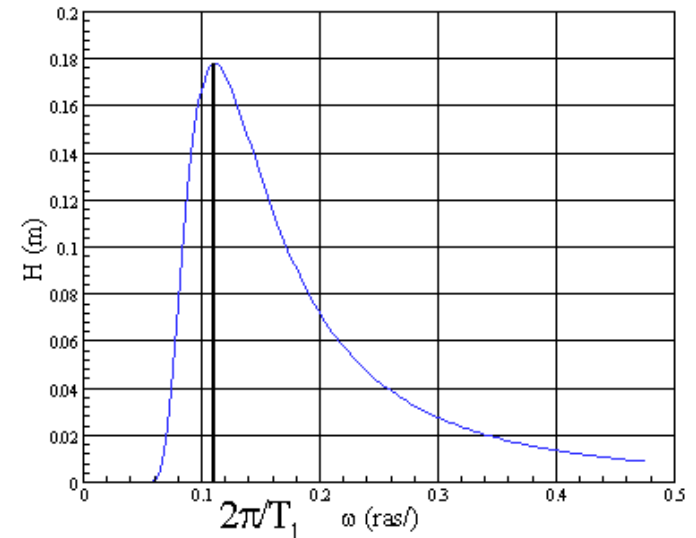
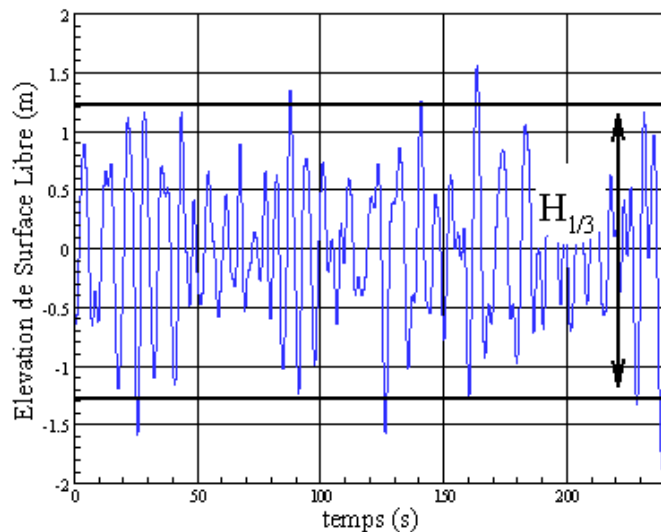


- > La houle d'Airy est un modèle simplifiée
- > La **houle en mer** est complexe et **irrégulière**
- > Hypothèse: houle irrégulière = superposition d'ondes régulières (houle d'Airy)
- > Observation: spectre d'énergie est ~ stationnaire sur des durées de l'ordre de l'heure, et il présente une forme caractéristique



Modélisation du contenu spectral et non des réalisations temporelles

Caractérisation du spectre de houle



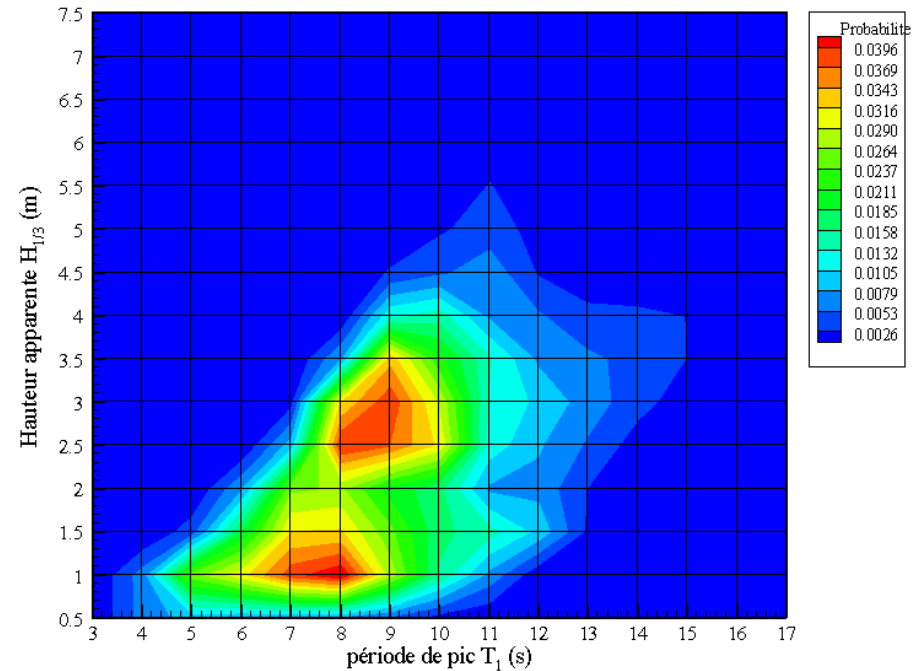
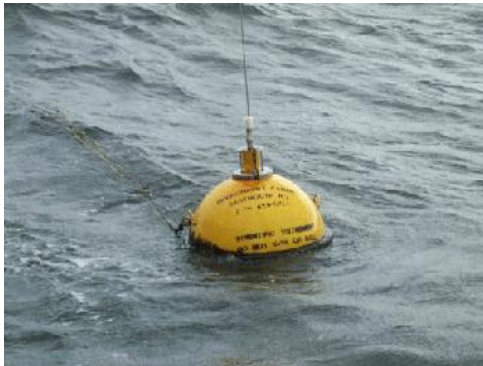
> Paramètres de caractérisation du spectre

- Hauteur significative (m) : $H_{1/3}$, $4m_0^{1/2}$, ...
- Période significative (s) : T_p , T_z , T_e , ...
- Forme de spectre S : Pierson-Moskowitz, Bretschneider, Jonswap, dépendants éventuellement de paramètres supplémentaires

> Le couple période et hauteur (H, T) définit un **état de mer** (un contenu spectral)

Caractérisation de la houle sur un site

- > Caractérisation de la ressource
- > Matrices de probabilités des états de mer (**scatter diagrams**)
- > Obtenues à partir de :
 - Modèles océano-météo
 - *Base de données: ANEMOC, HOMERE, ...*
 - *Modèles Wavewatch III, TOMAWAC, ...*
 - A partir de mesures sur site



Corrélogramme Houlographe Yeu ($46^{\circ}41.45' N$,
 $2^{\circ}25.65' W$)

Energie transportée par la houle en mer

- > Flux moyen d'énergie par mètre de front d'onde (largeur de crête de vague):

$$P \sim 0.4H_s^2 T_p$$

- > Force 4 $\rightarrow H_s \sim 1 \text{ m} - T_p \sim 6 \text{ s} \rightarrow P \sim 2.4 \text{ kW/m}$



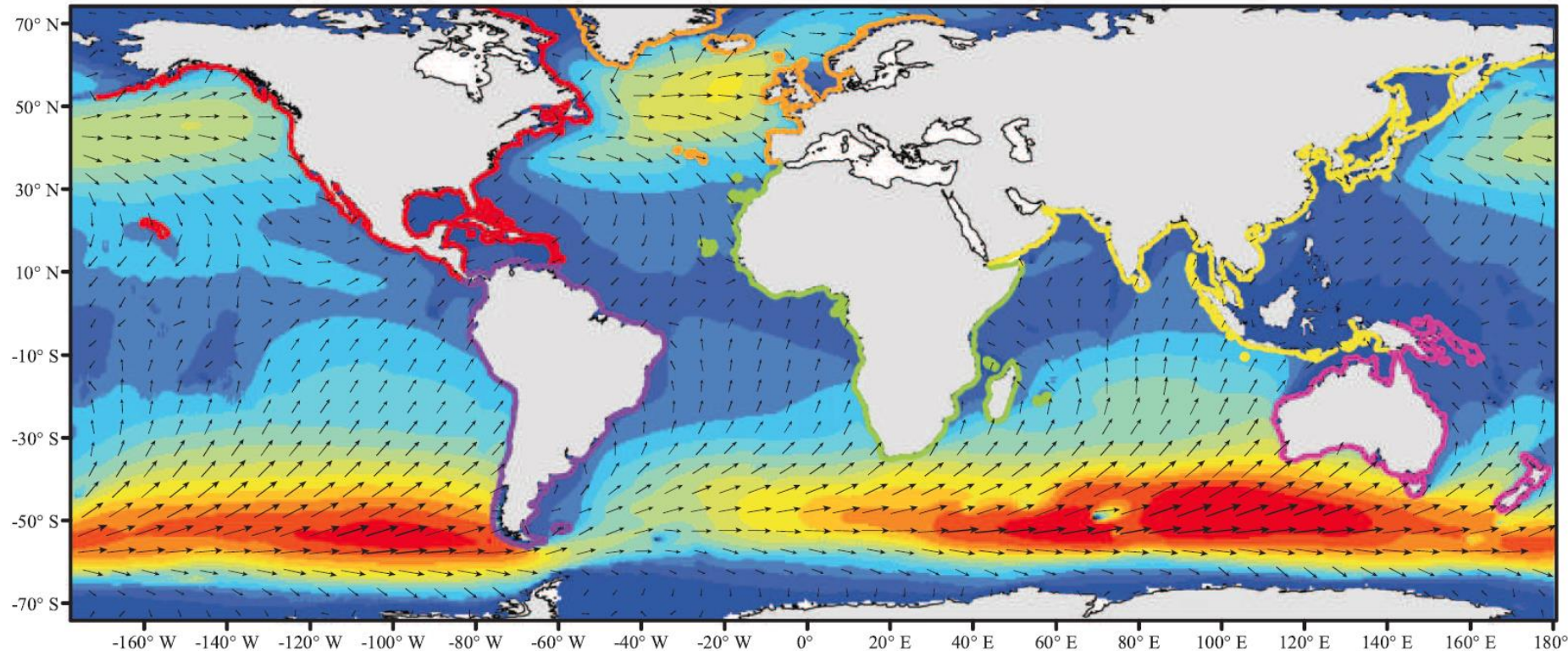
- > Force 6 $\rightarrow H_s \sim 2.5 \text{ m} - T_p \sim 9 \text{ s} \rightarrow P \sim 30 \text{ kW/m}$



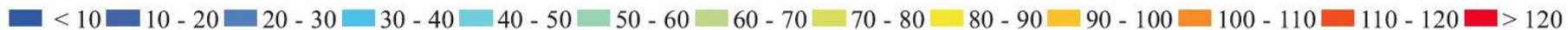
- > Force 12 $\rightarrow H_s \sim 15 \text{ m} - T_p \sim 17 \text{ s} \rightarrow P \sim 1500 \text{ kW/m}$



Cartographie de la ressource houlomotrice



Annual Mean Power Density (kW/m)

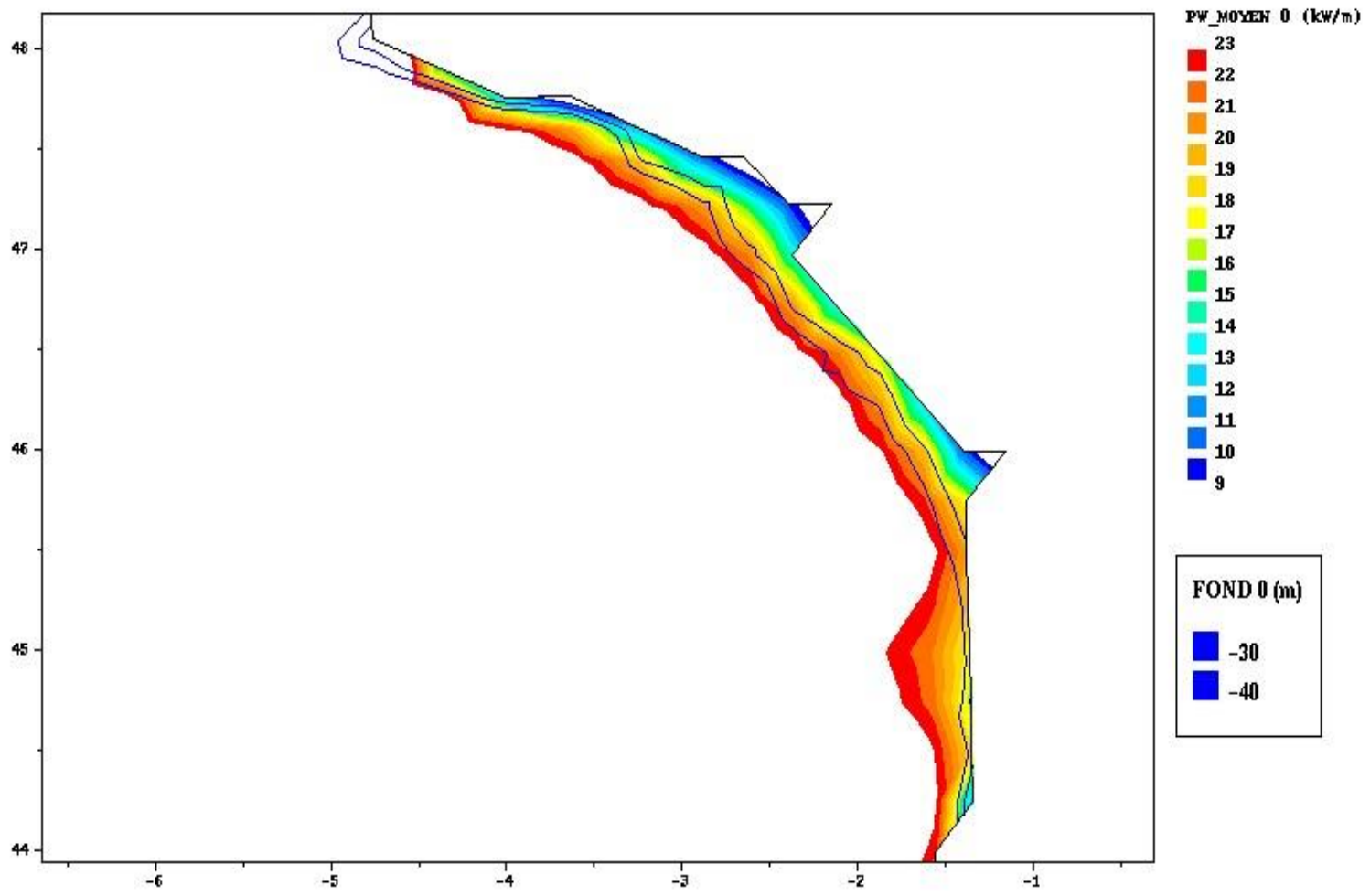


From Gunn K, Stock-Williams C. *Quantifying the global wave power resource*, Renewable Energy (2012)

Estimation du potentiel technique exploitable: 18 500 TWh/an

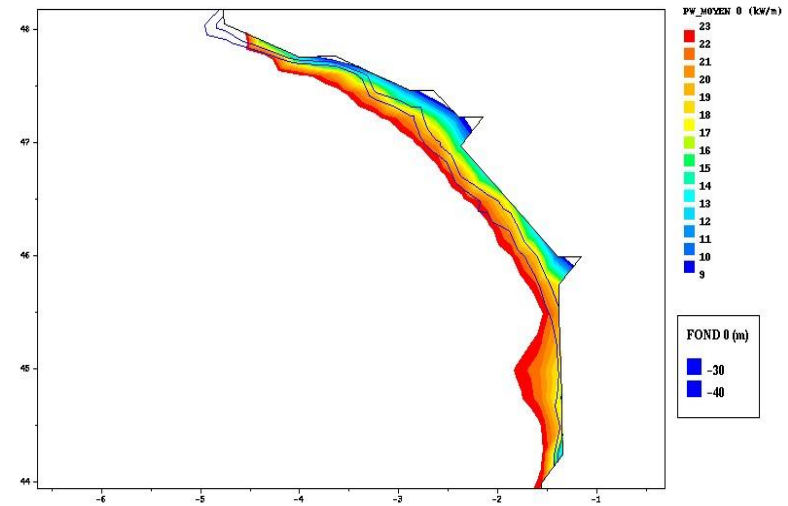
- Consommation d'énergie primaire mondiale: 200 000 TWh/an
- Marché: 18 500 TWh/an = 1 850 Mads d'€/an à 100€/MWh

Sur la côte Atlantique Française



Source: EDF

Gisement énergétique en métropole ?



Source: EDF

Gisement énergétique en métropole ?

> Distance Brest – Bayonne :

~600 km

> Ressource au large:

~30 kW/m = 30 MW/km

> Gisement brut :

$600 \times 30 = 18\,000 \text{ MW} = 18 \text{ GW}$

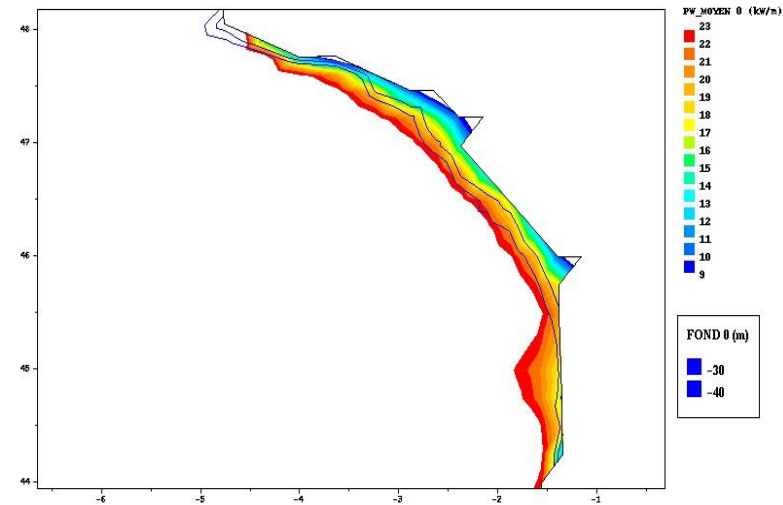
> Consommation électrique **moyenne** en France en 2014 :

50 GW > 18 GW

> Production **moyenne** éolienne en France en 2014 :

2 GW (=4% consommation) ~ 10% ressource énergie des vagues

→ L'énergie des vagues pourrait couvrir une part significative de la consommation électrique nationale



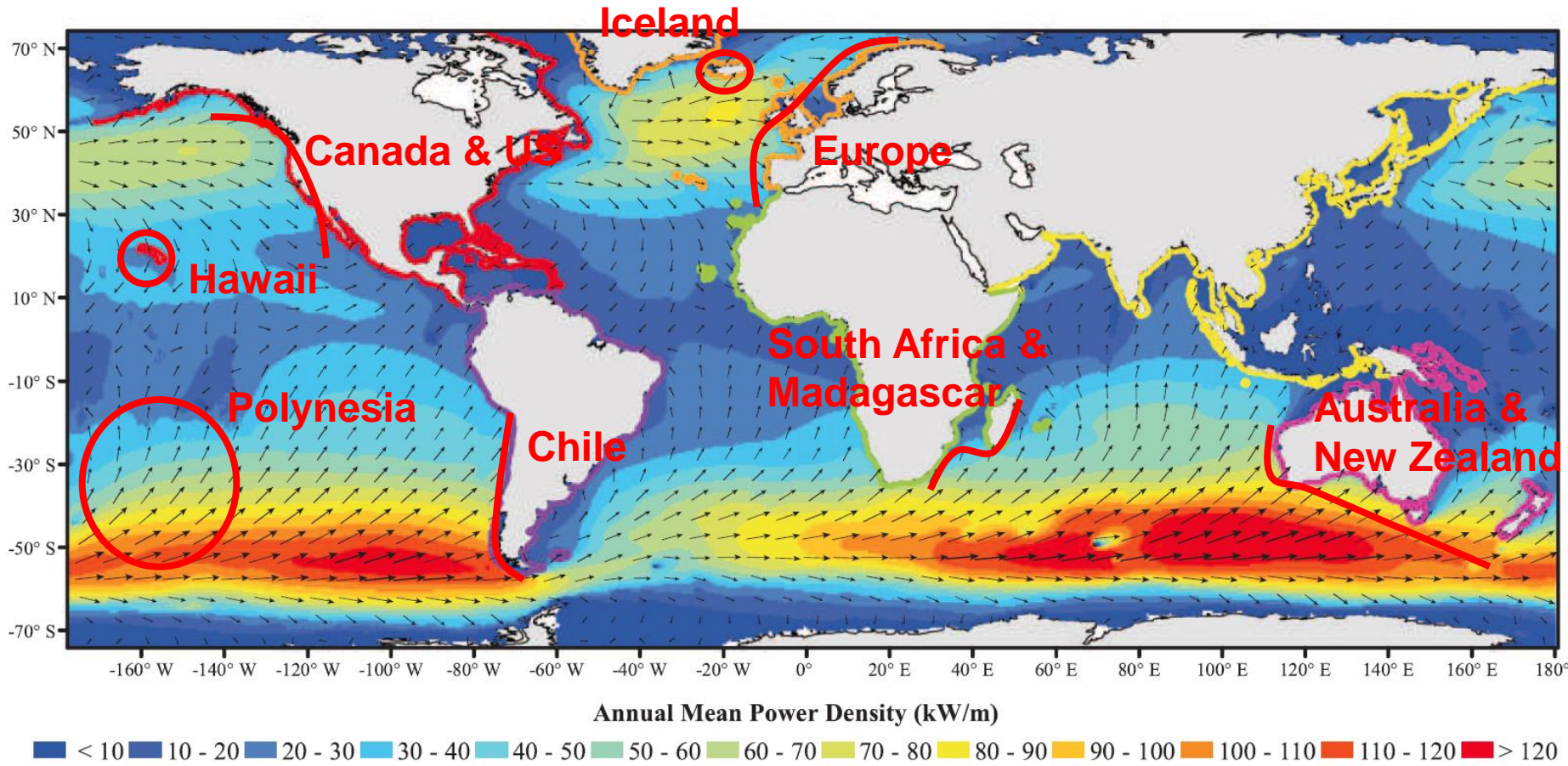
Source: EDF

En résumé

- > L'énergie des vagues est l'énergie des ondes se propageant à la surface des océans (houle)
- > La houle est un processus aléatoire, mais dont l'énergie peut être caractérisé par son spectre (état de mer). Les paramètres ($H_{1/3}$, T_p) de ce spectre varie lentement dans le temps.
- > Pour un spectre classique (JONSWAP), la ressource (flux d'énergie moyen)s'obtient en kW/m par: $P_{wave}(T_1, H_{1/3}) = 0.4T_1H_{1/3}^2$
- > La ressource peut varier de quelques kW/m à plus de 1MW/m, en fonction de l'état de mer.
- > A l'échelle mondiale, le flux moyen d'énergie est typiquement 10 – 40 kW/m
- > Le gisement énergétique est d'un ordre de grandeur inférieur à la consommation, à l'échelle mondiale comme nationale (mais représente néanmoins un marché potentiel considérable (Mads d'€)).

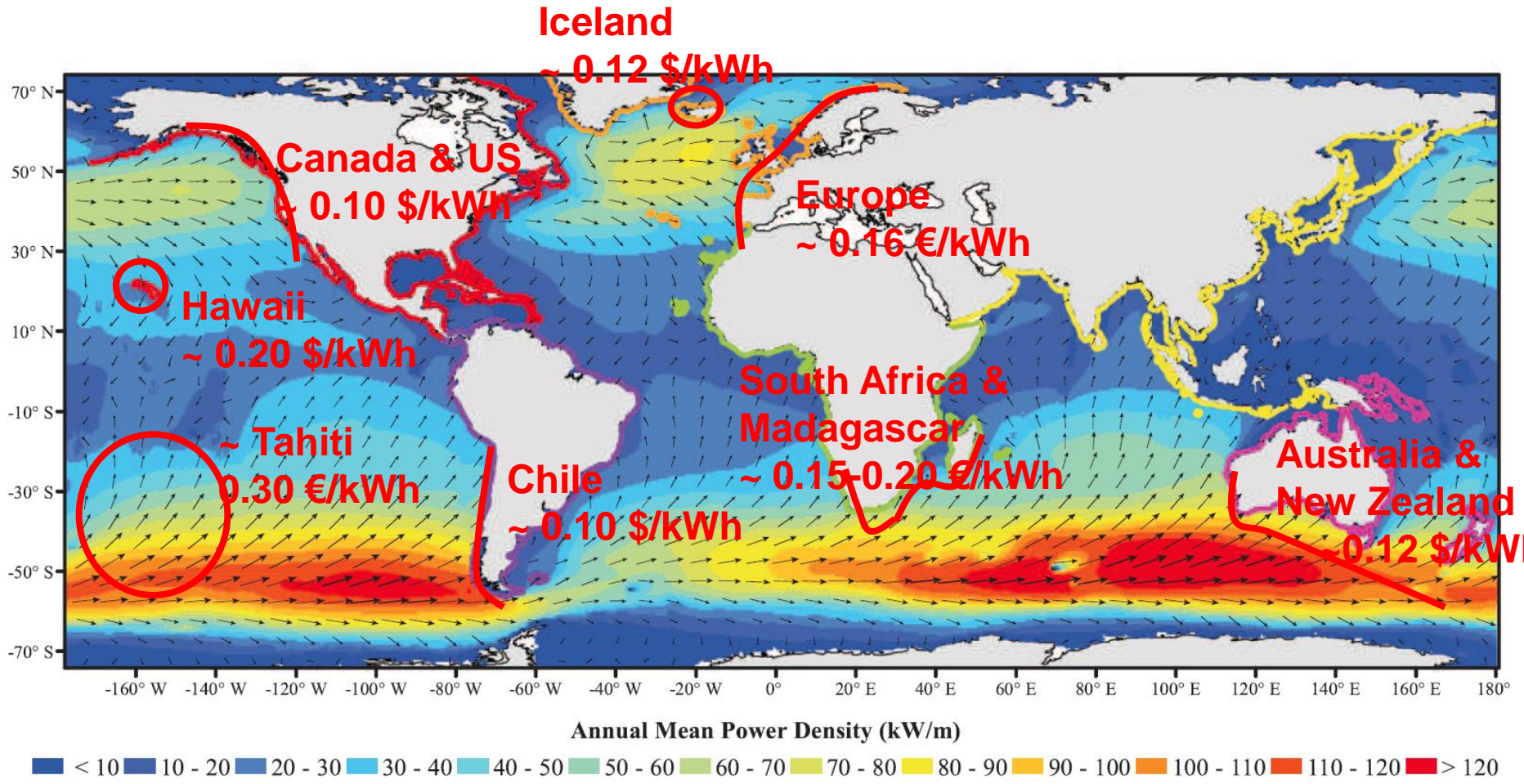
Éléments de marché Énergie des Vagues

Le marché: la ressource



From Gunn K, Stock-Williams C. *Quantifying the global wave power resource*, Renewable Energy (2012)

Le marché: la ressource

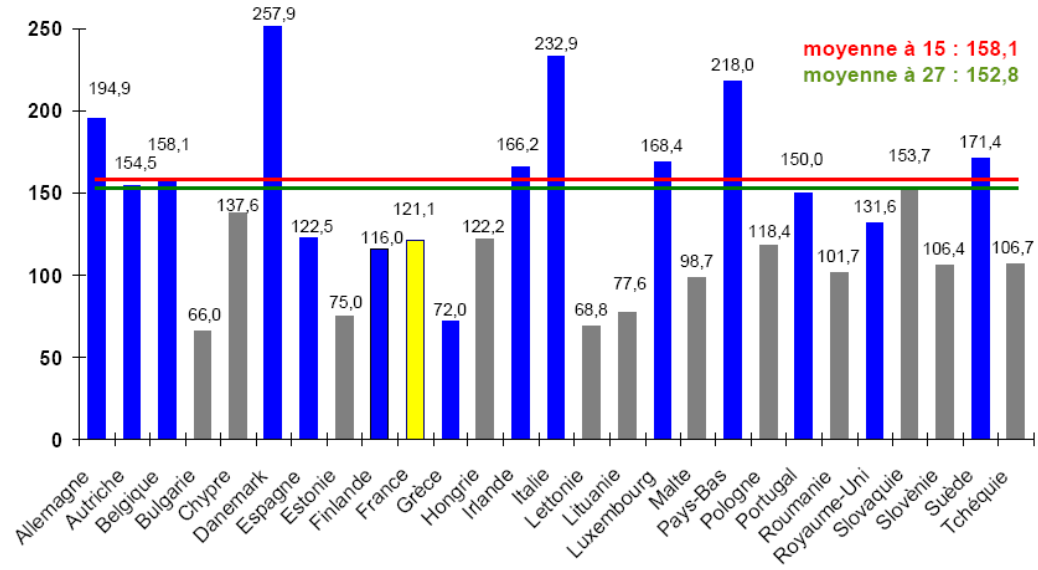
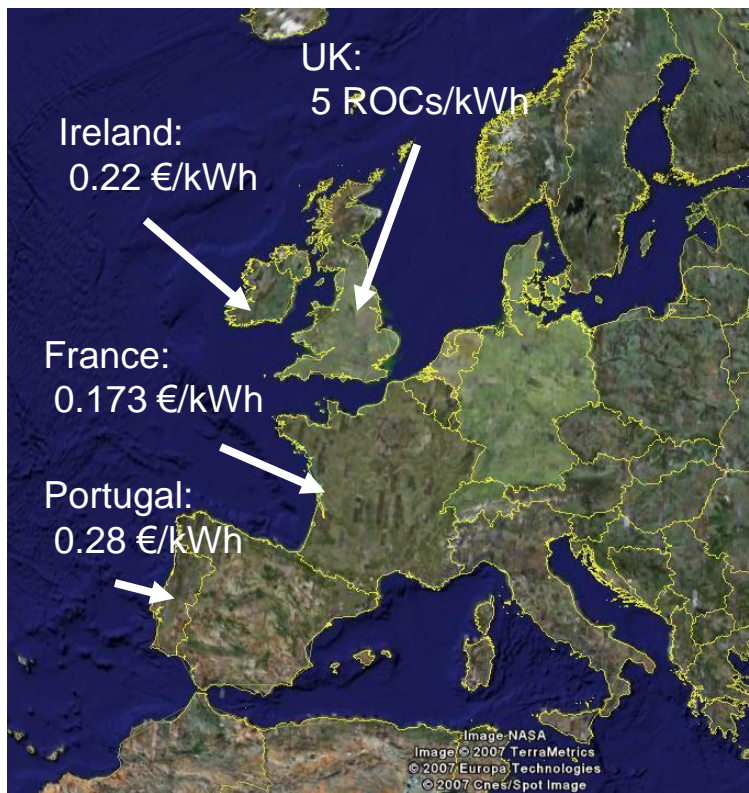


From Gunn K, Stock-Williams C. *Quantifying the global wave power resource*, Renewable Energy (2012)

Estimations du coût de l'énergie des vagues pour des premières fermes commerciales: [0.33 – 0.63 €/kWh] [IRENA, 2014], 0.42 €/kWh[Cordonnier et al. 2015], [0.47 – 0.52 €/kWh] [ETI, 2015] >> prix de l'électricité pratiqués dans le monde

Le marché: Tarifs de rachat en Europe

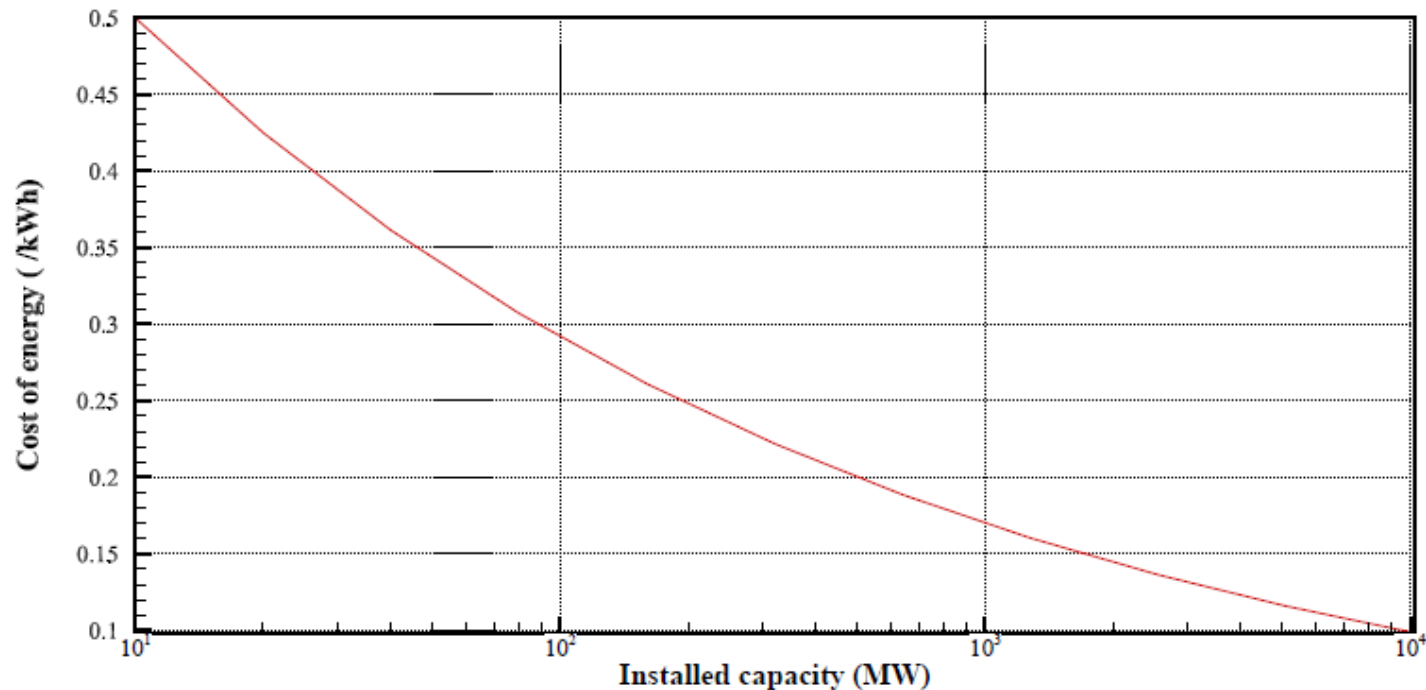
- Tarif de rachat: Niveau de prix auquel le distributeur d'énergie doit acheter l'électricité.
- Objectif: assurer une rentabilité normale aux investissements de production d'électricité d'origine renouvelable



Prix public de l'électricité en Europe. Source: Observatoire de l'Energie d'après Eurostat (January 2007) www.developpement-durable.gouv.fr/energie/statisti/pdf/hanprix2.pdf

Le marché: Pourquoi des tarifs de rachat?

- > Faire baisser les coûts en permettant le développement d'une filière industrielle via la courbe d'apprentissage
- > Courbe d'apprentissage: le coût du produit décroît d'un taux constant à chaque fois que le nombre d'unités double



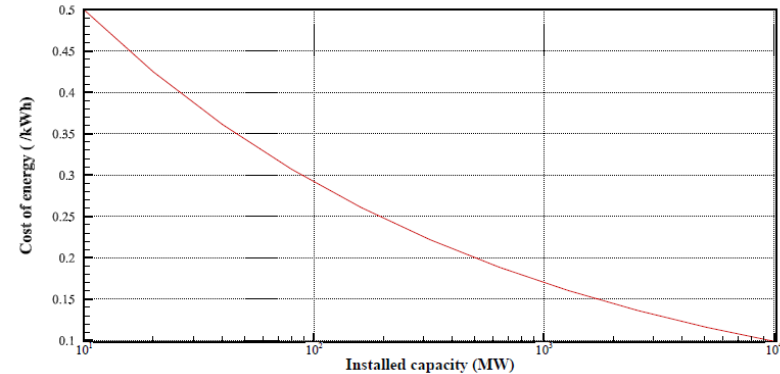
- > Cellules photovoltaïques: 35% entre 1985 et 1995, 18% pour l'éolien entre 1980 et 1995, 15% pour la biomasse. Source : Agence Internationale de l'Énergie

Le marché: Quel point de départ pour le houlomoteur?

- > Hypothèse de taux apprentissage pour les énergies marines renouvelables: 15% Source: Carbon Trust

COE_{array1} €/kWh	I (M€)	P_{parity} $_{installed}$ (MW)
0.5	14 000	9 800
0.4	5 700	4 000
0.3	1 500	1 100
0.2	230	200

Ordre de grandeur des investissements et de la capacité à installer nécessaire pour atteindre la parité réseau en fonction du coût de l'énergie de la première ferme pilote



- > Estimations du coût de l'énergie des vagues pour des premières fermes commerciales: [0.33 – 0.63 €/kWh] [IRENA, 2014], 0.42 €/kWh [Cordonnier et al. 2015], [0.47 – 0.52 €/kWh] [ETI, 2015]
- > Réduction du coût de l'énergie est indispensable
 - Augmenter la performance énergétique (rendement global, disponibilité)
 - Réduire les coûts (CAPEX/OPEX)

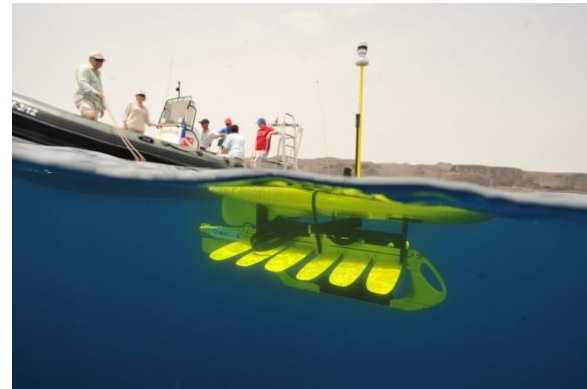
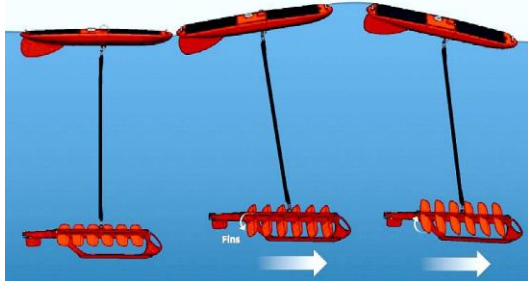
Des marchés alternatifs?

- > Production d'énergie en mer pour alimentation de plateformes O&G
 - Coût de l'Energie (COE) ~ 400€/MWh
- > Désalinisation
 - Osmose inverse: 4 à 5 kWh/m³, ~1\$/m³
- > Systèmes isolés (îles, matériel ou station scientifique)



Ryokuseisha corporation wave power navigation buoy

Liquid Robotics, Inc. / Wave glider
100 k€/unité?

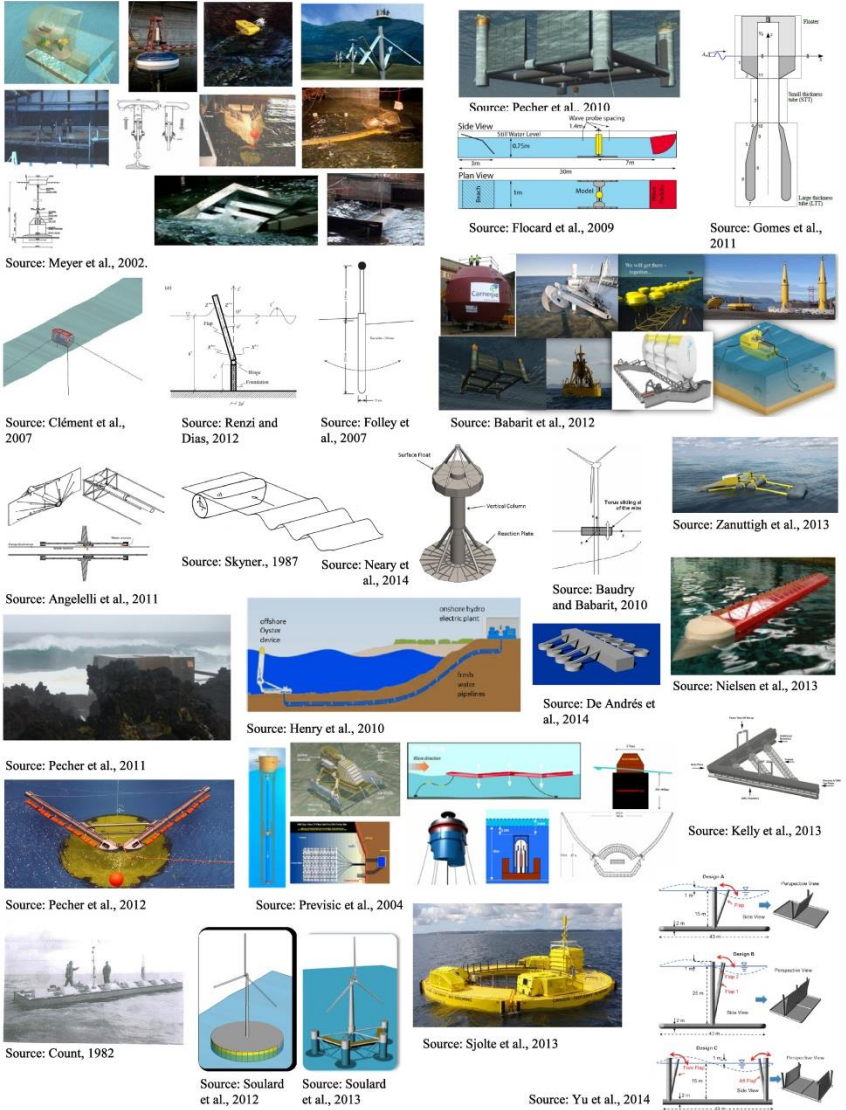


En résumé

- > Les estimations du LCOE des fermes commerciales énergie des vagues >> tarif de l'électricité
- > Plusieurs pays ont mis en place des tarifs de rachat cohérent avec un LCOE pour les premiers prototypes de l'ordre de 0.2 à 0.3 €/kWh
- > Il semble exister des marchés de niche pouvant accepter des LCOE plus élevés

Systemes de Récupération de l'Énergie des Vagues (houlomoteurs ou houlogénérateurs)

Diversité des systèmes houlomoteurs



- 100+ technologies en cours de développements, 1000+ brevets

- Des niveaux de TRLs divers:

- TRL1: concept
- ...
- ...
- ...
- TRL7: démonstration prototype sur site en mer



Pelamis P2 @ EMEC



Oyster 800 @ EMEC

Historique

- > Premier brevet connu en 1799.
- > 19^e, San Francisco, Californie. Moteur à Vagues inventé par Terence Duffy, Wave-Power Air-Compressing Company.
- > 1920 – 1940: Béliers hydrauliques par Coyne, Brest. Béliers-siphons barométriques inventés par Paul Grasset, Biarritz.
- > 1956: Dhaille recense 600+ brevets de houlomoteurs, mais rendements faibles (qqes %). Propose un dièdre à houle de rendement ~20 à 30%, mais problème de rentabilité.
- > 1973, premier choc pétrolier (prix du baril de pétrole x4).
- > S. Salter, « Wave Power », Nature, Vol. 249, p. 720-724, 1974
- > Nombreux travaux et prototypes entre 1975 – 1985 par Budal et Falnes (NO), D.V. Evans (UK), S. Salter (UK), A. Falcao et A. Sarmiento (PT), P. Guével et A. Clément (FR), ...
- > Très fort ralentissement entre 1985 – 1995 (contre-choc pétrolier)
- > Redémarrage dans la deuxième moitié des années 1990.
- > 2000 - 2010: foisonnement, plus d'une centaine de projets en développement de part le monde, 1600+ brevets déposés entre 1978 et 2005, 80+ brevets déposés en 2013
- > 2012 – 2014: crise de confiance. Peut-on produire de l'électricité avec l'énergie des vagues à un coût acceptable?

349.

12 juillet 1799.

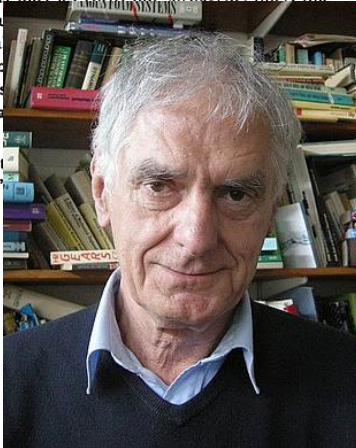
BREVET D'INVENTION DE QUINZE ANS,

Pour divers moyens d'employer les vagues de la mer, comme moteurs,

Aux sieurs GIRARD père et fils, de Paris.

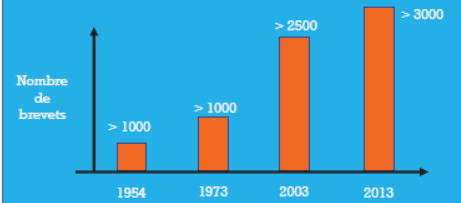
La mobilité et l'inégalité successive des vagues, après s'être élevées comme des montagnes, s'affaissent l'instant après, entraînant dans leurs mouvements tous les corps qui surnaagent, quels que soient leur poids et leur forme, qu'aucune puissance ne puisse résister pendant un instant, par la pensée, et l'on concevra que jamais existé.

C'est principalement l'absence de régularité des vagues, qui nous propose.



Stephen Salter

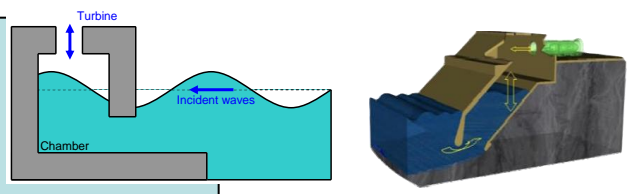
l'énergie des vagues, depuis longtemps, excite l'imagination des inventeurs. Cela se traduit par le nombre considérable de brevets déposés sur le sujet :



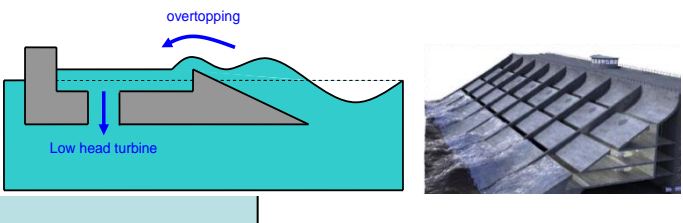
Classification par principe de fonctionnement

Adapted from Falcão 2010

Colonne d'eau oscillante

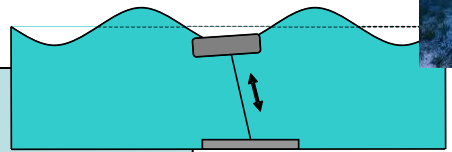


Système à déferlement



Systèmes à flotteurs actionnés par la houle

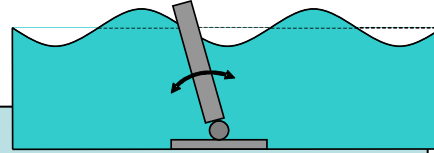
Mouvement principalement vertical



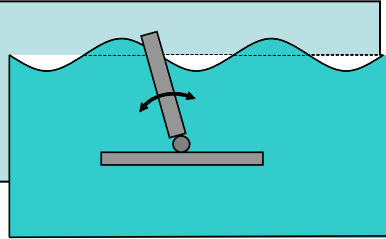
Mouvement principalement horizontal



Sur point fixe



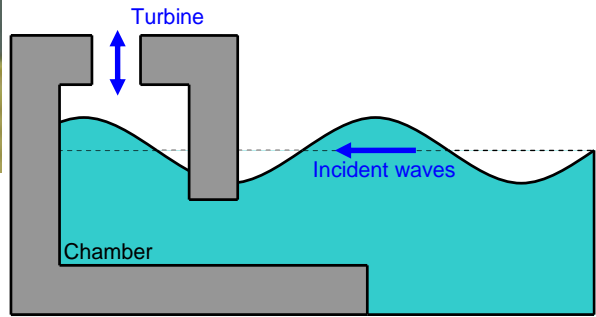
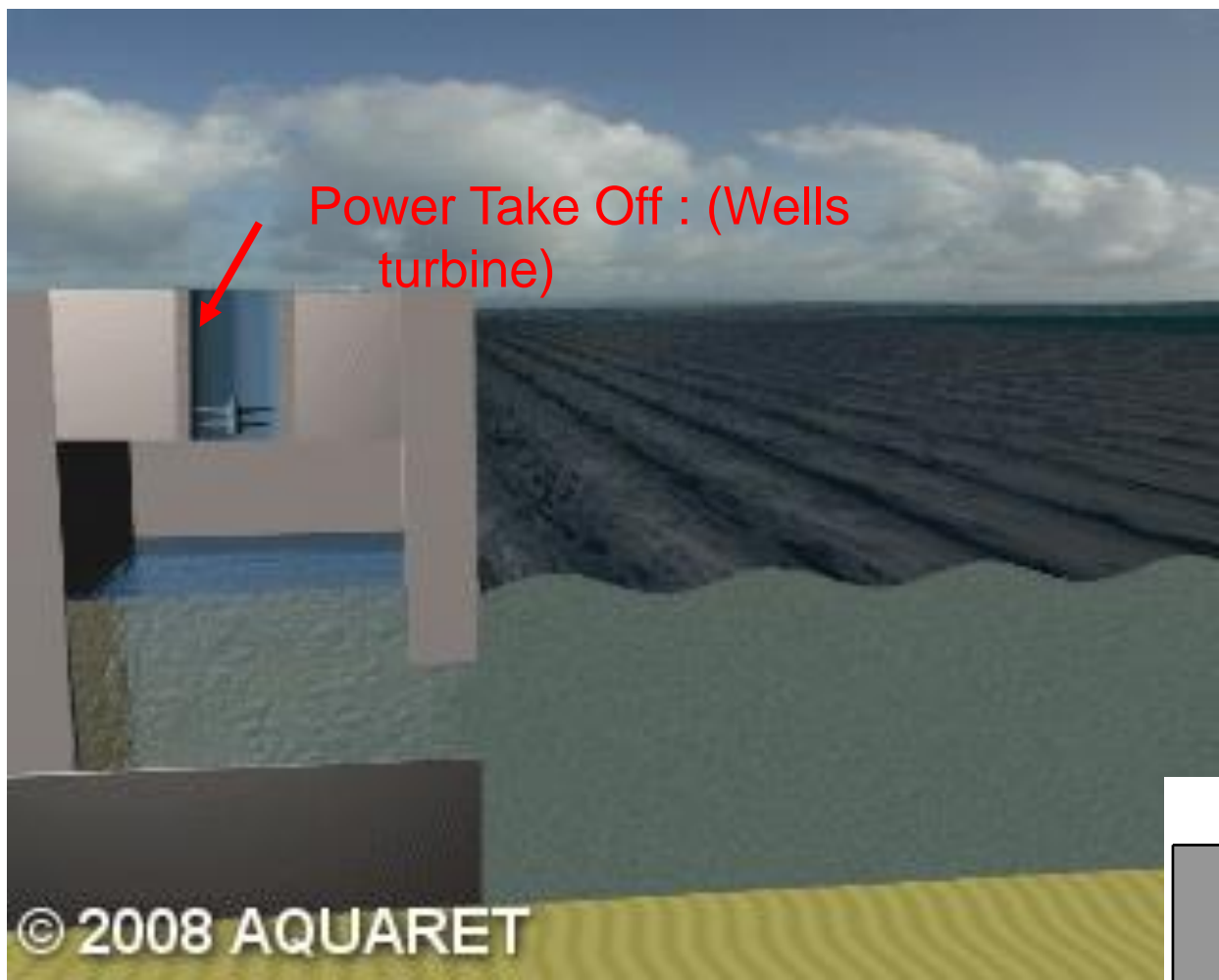
Flottant



Autres (turbines à houle, ...)

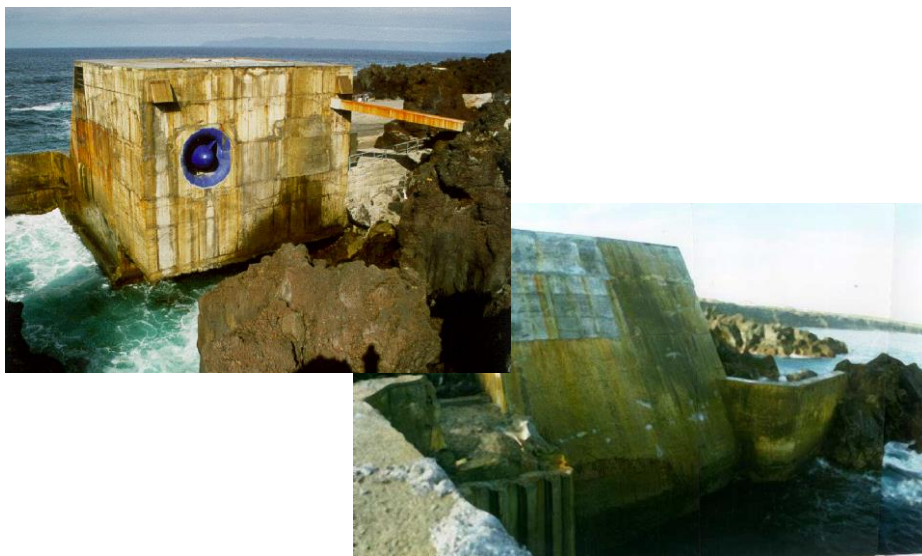


Colonne d'eau oscillante (OWC): principe



Exemples :

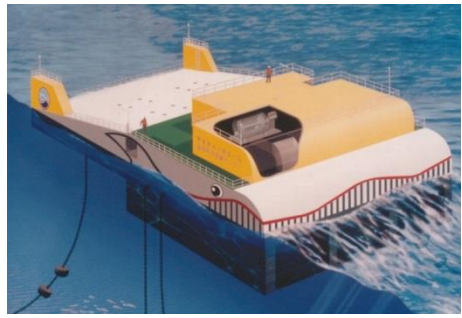
>> *Fixé* : **Pico plant (Açores)**



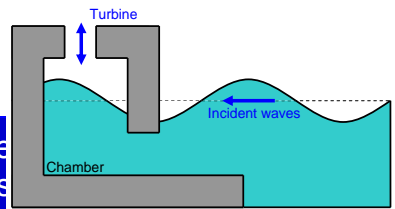
>> *Flottante* : **Mighty whale, Oceanlinx**



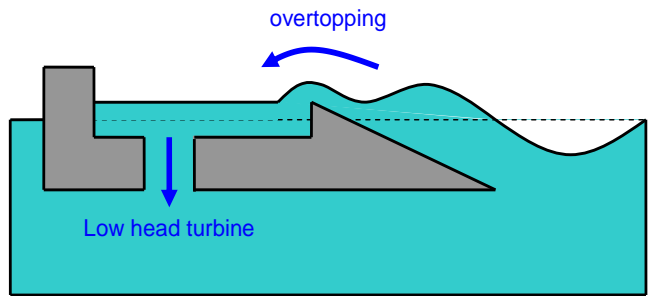
☹️ **Faillite en 2014**



>> *Dans un ouvrage portuaire* : **Sakata (Japon), Mutriku (Espagne)**

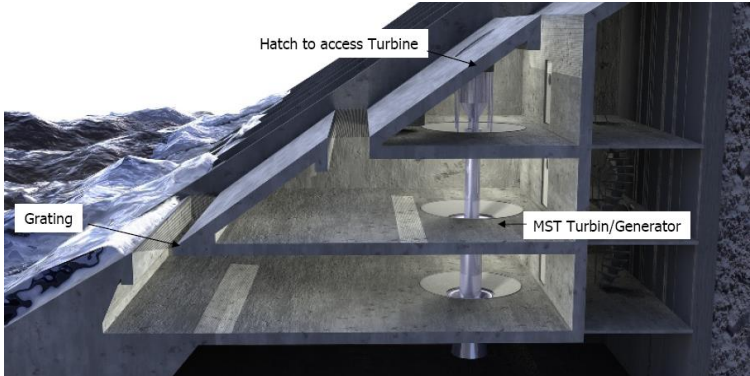
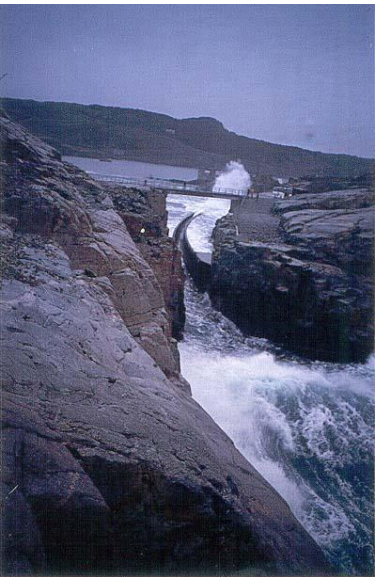


Centrale à déferlement : principe

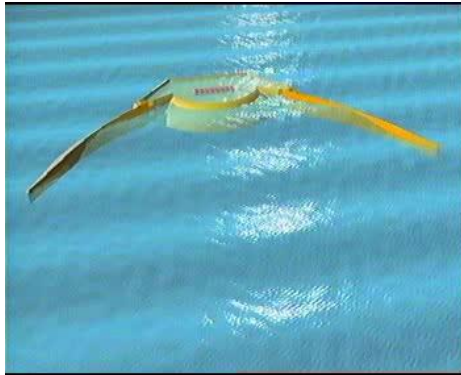


Exemples :

>> Fixé : Tapchan (Norvège)

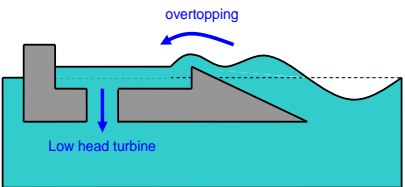


>> Dans une digue : SSG (Norvège)



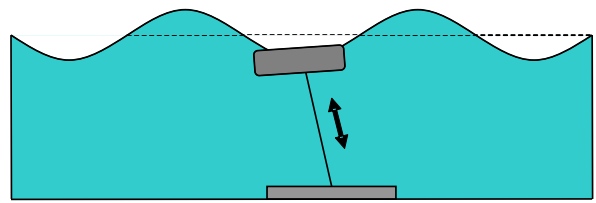
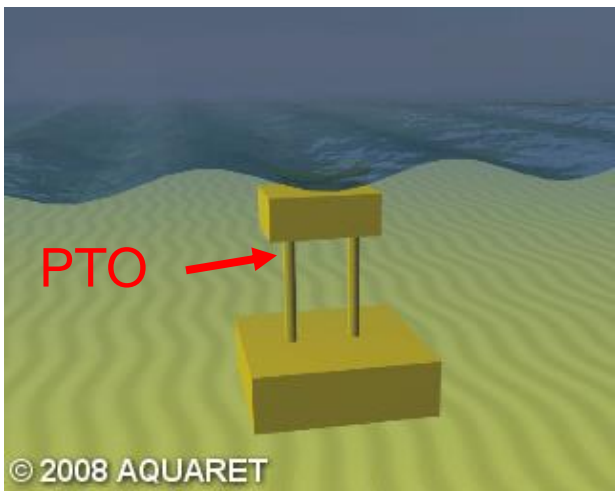
>> Flottant : Wavedragon (Danemark)

Pilote 1/4.5 installé en 2003, testé de 2003 à 2005 puis de 2006 à 2007

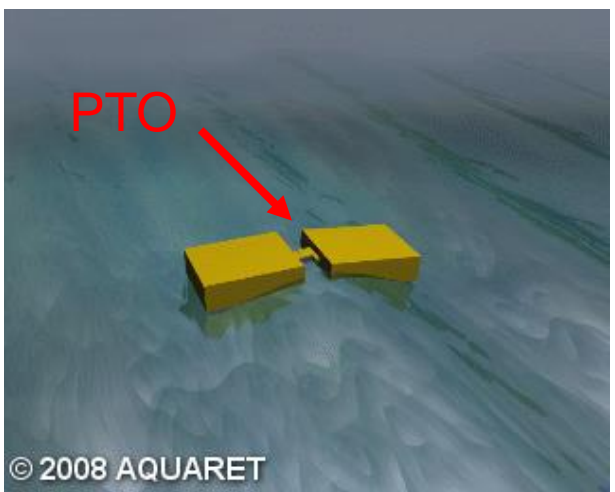


Actionnés par la houle – mvt vertical

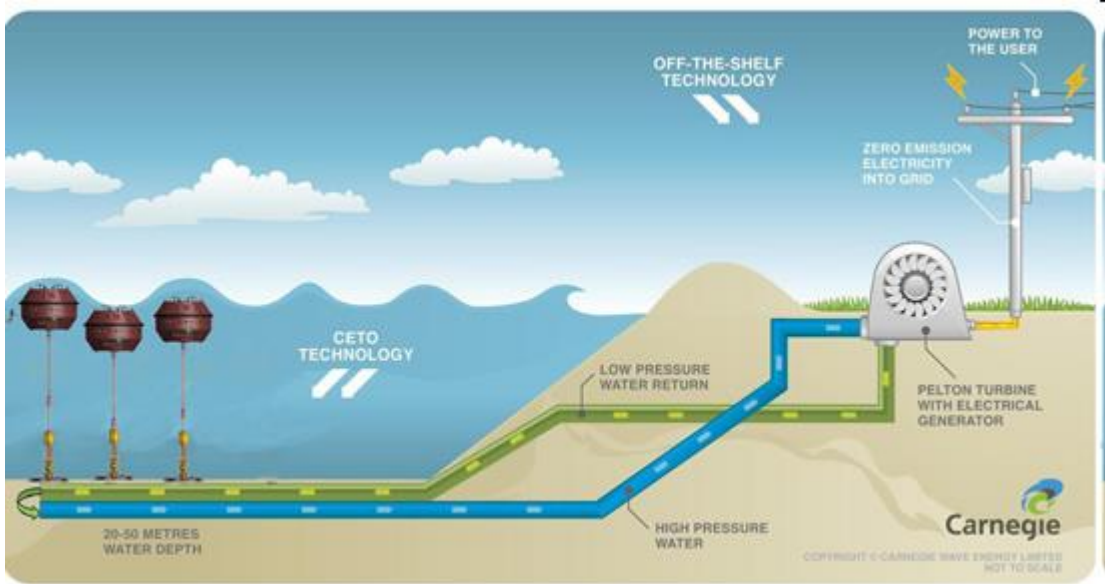
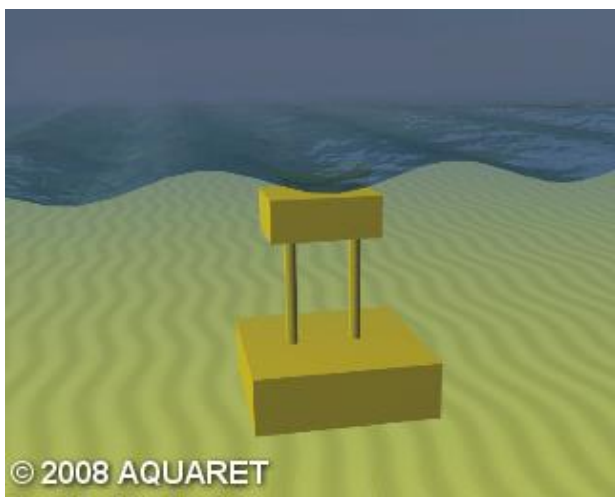
>> *Référencé au fond*



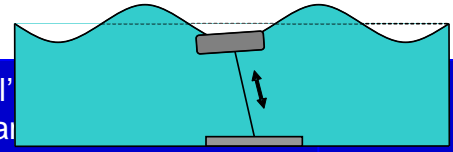
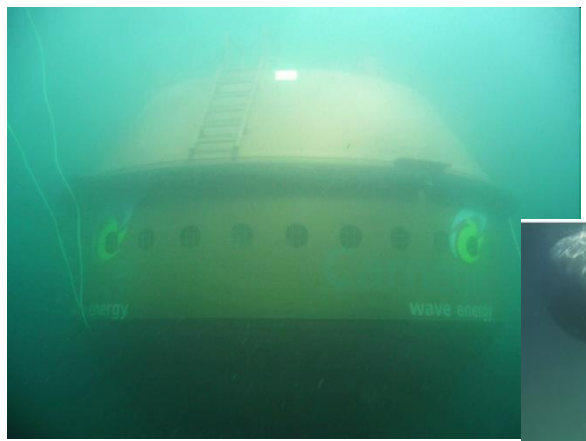
>> *Flottant et autoréférencé*



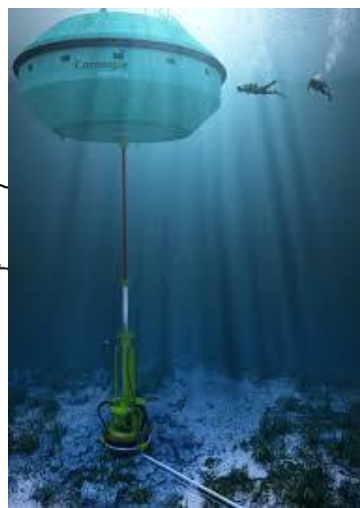
Ceto (AUS)



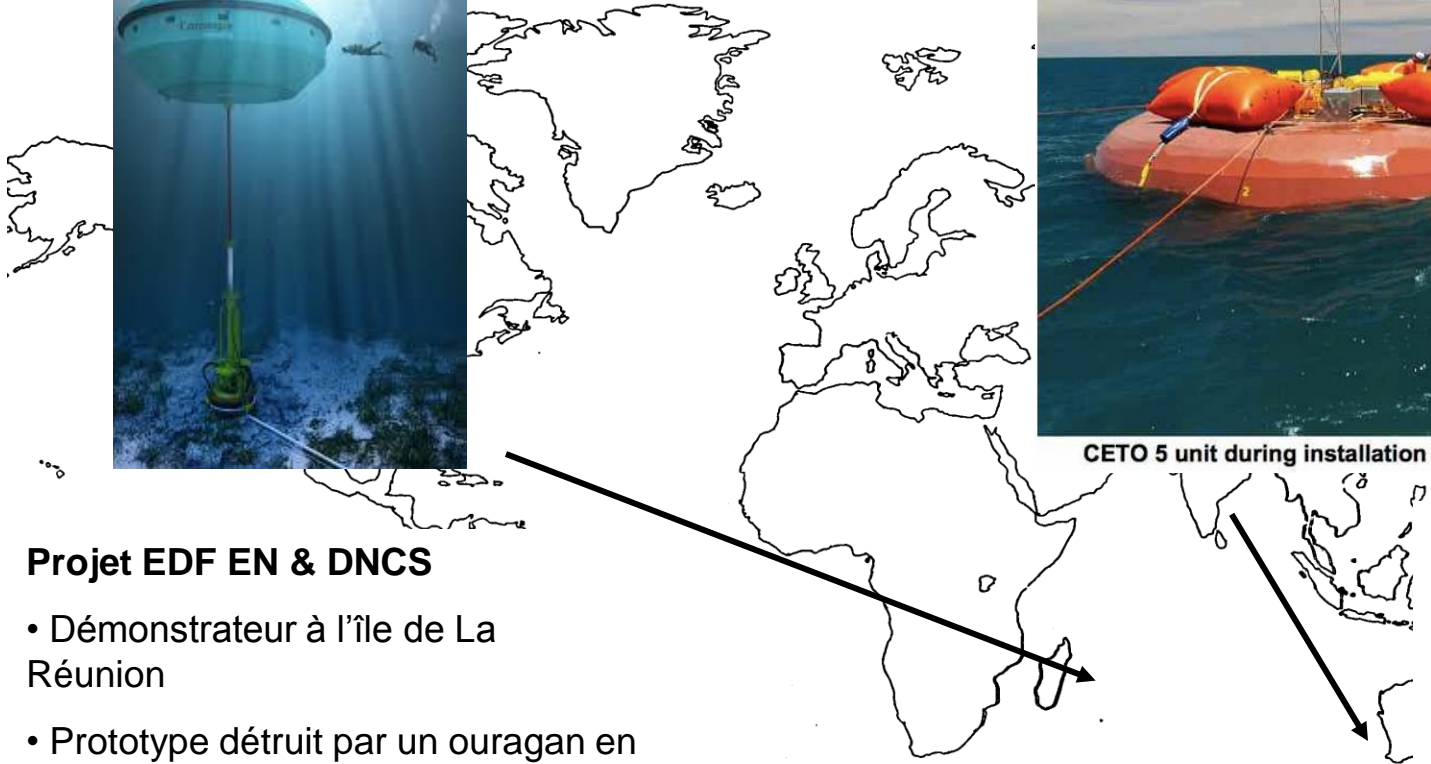
> Technologie en développement depuis 2005



Ceto (AUS)



CETO 5 unit during installation at the Perth Project site



Projet EDF EN & DNCS

- Démonstrateur à l'île de La Réunion
- Prototype détruit par un ouragan en janvier 2014 après seulement une semaine suite à une défaillance du tendon

Projet Perth

- Alimentation base marine Australienne
- 2 unités déployés au 27/01/15, 1700 de fonctionnement pour l'unité 1

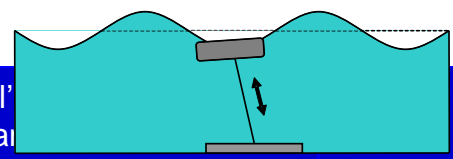
Zinfos974.com
le journal qui oZe

Accueil Local Océan Indien National International

St-Pierre: Le prototype houlomoteur CETO détruit par Bejisa

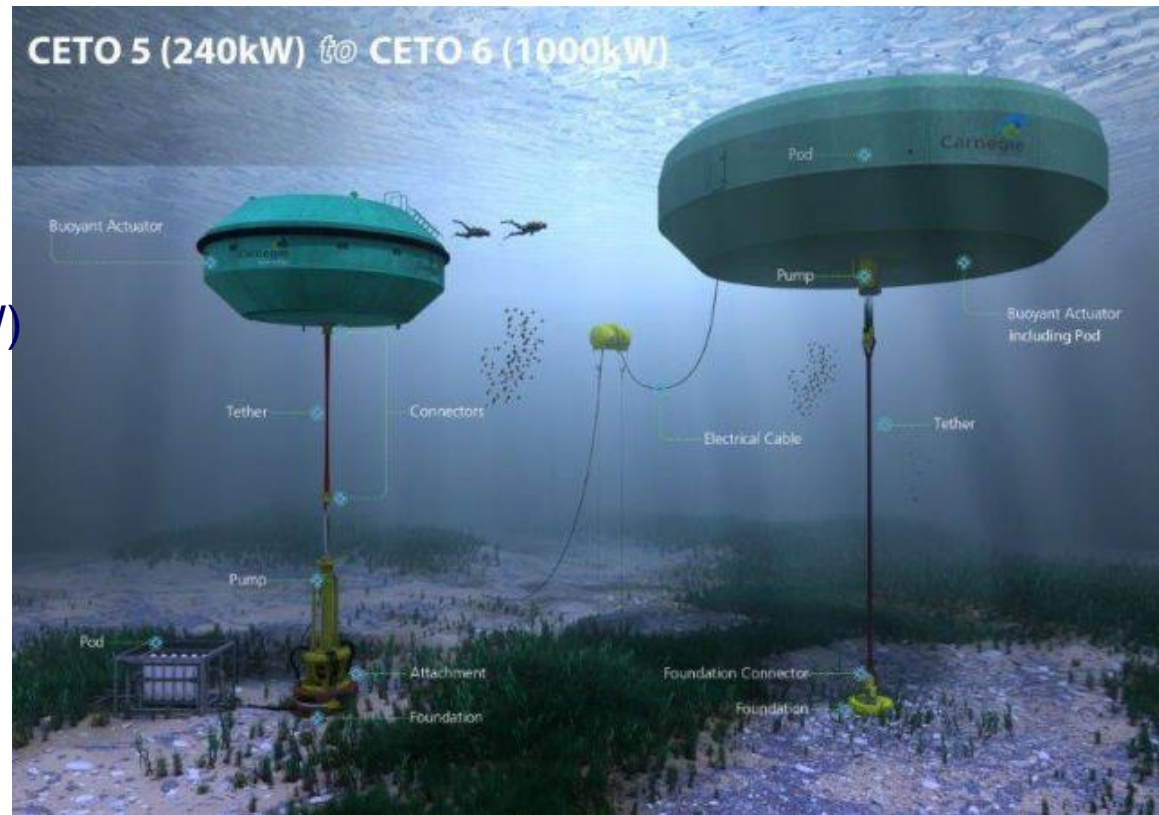
Jeu 23 Janvier 2014 - 06:50
Ludovic Grondin

Introduction à la Récupération de l'...
A. Babarit - Ecole Centrale de Na

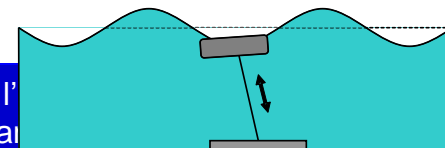


Ceto (AUS)

- > Ceto 5 (2015)
 - 240 kW
 - Diamètre 11 m
 - PTO au fond
 - 32 M AUS\$ (3 x 240 kW)
- > Ceto 6
 - 1000 kW
 - Diamètre 20 m
 - PTO sur la bouée
 - 31 M AUS\$ en +



<http://www.carnegiewave.com>



Autres exemples de systèmes pilonnants

Wavebob (IE)

> Diamètre 20m



☹ Faillite en 2013



Ocean Power Technologies (US)

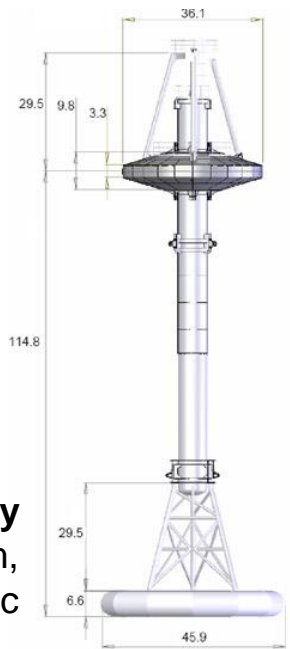
- Créé en 1994
- Essais de prototypes en Espagne (2008, PB40), et aux USA (2009, PB40)

OPT/PB3

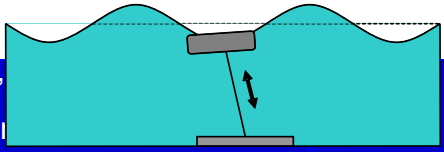
Diamètre 3.4m
Puissance moyenne 300 W
2 bouées installées en 2016



OPT/Powerbuoy
Diamètre 10m,
Puissance 150 kWc



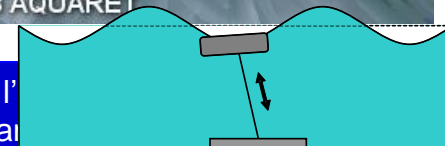
<http://www.oceanpowertecnologies.com>



Pelamis (UK)



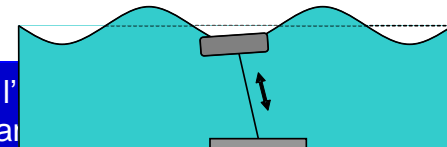
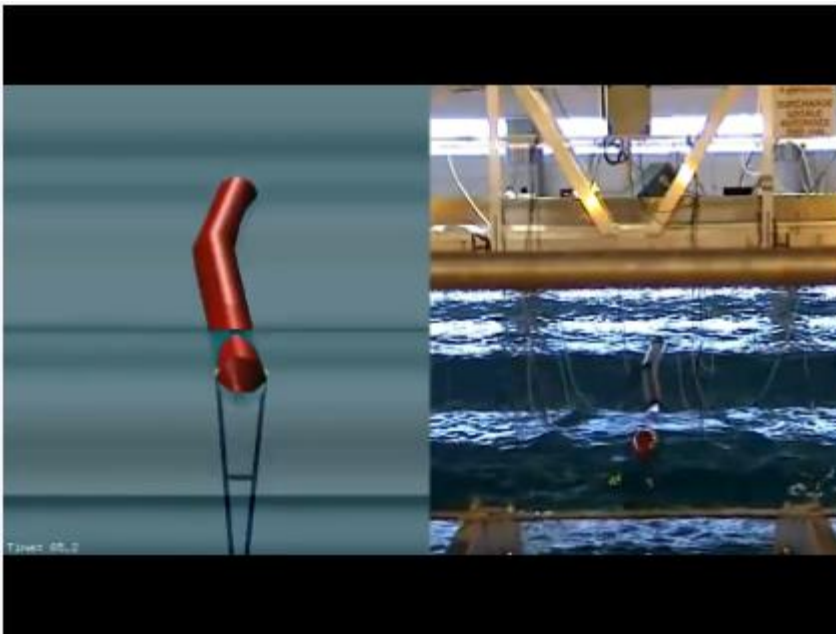
- > P1 : 4 x 30 m, diamètre 3.5m – 750kW
- > P2 : 5 x 36 m, diamètre 4m – 820kW
- > Hydraulic Power Take Off (PTO)



Pelamis : Essais à échelle réduite



Essais de survie à l'échelle 1/20
model tests à Centrale Nantes (2003,
2004, 2005, ...)



Essais à pleine échelle



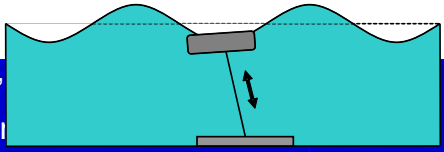
Mars 2004: Lancement du prototype P1

Avril 2004: premiers essais en mer



Septembre 2008: première ferme commerciale connectée au réseau au Portugal

Fin 2008: problèmes avec les ancres et crise financière = retour des 3 machines au port ...



Le Pelamis P2



Premiers essais en mer à EMEC en 2010



Système commercial vendu à E.ON, en juillet 2011

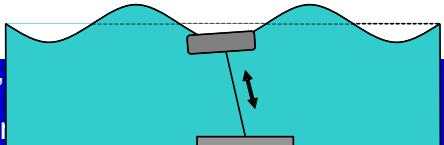
BBC News Sport Weather
NEWS SCOTLAND BUSINESS

21 November 2014 Last updated at 21:45 GMT

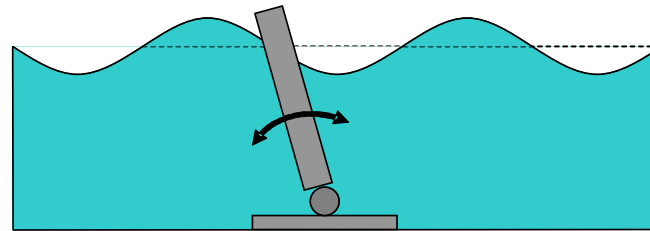
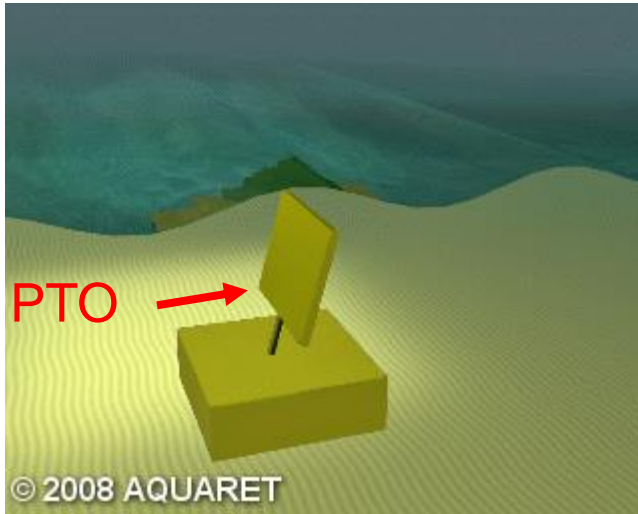
☹ **Faillite en 2014**

Wave power firm Pelamis calls in administrators

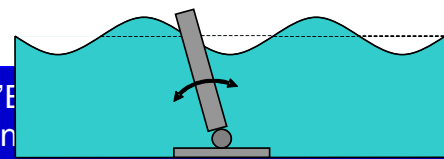
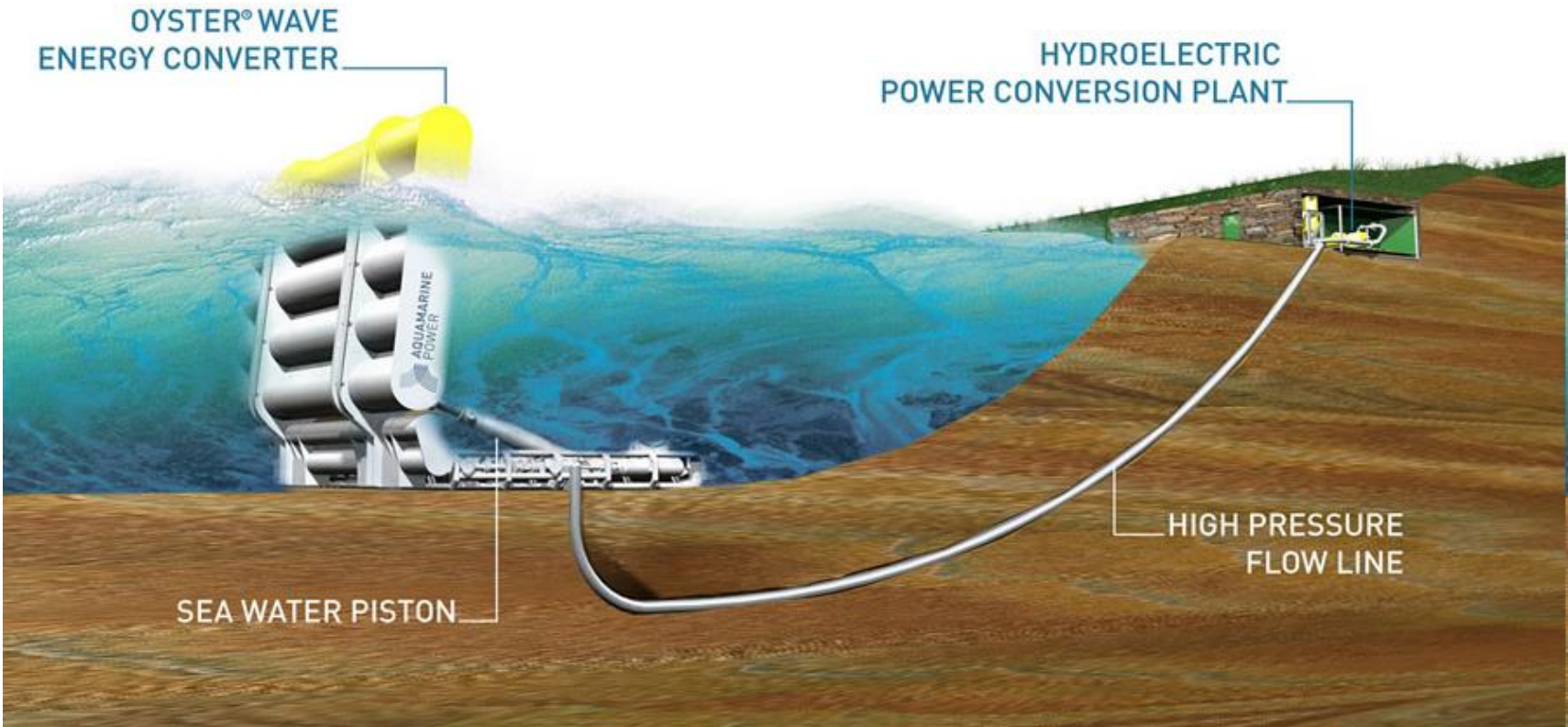
<http://www.pelamiswave.com>



Actionnés par la houle – mvt horizontal - / pt fixe



Aquamarine/Oyster (UK)



Aquamarine/Oyster (UK)

- > En développement depuis 2005
- > Installation en 2009 de l'Oyster 1 à EMEC
 - Largeur 18 m, Hauteur 12 m
- > Installation de l'Oyster 800 en 2011
 - Largeur 26 m, Hauteur 12 m, 800 kW



Oyster 1 (2009)



Oyster 800 (2011)

A screenshot of a businessGreen article. The article title is "Wave energy firm Aquamarine Power goes into liquidation". The author is Madeleine Cuff, and the date is 23 November 2015. A red box highlights the text "Faillite en 2015" with a sad face icon. The article is categorized under "Marine".

businessGreen

News In-depth Opinion Energy Policy

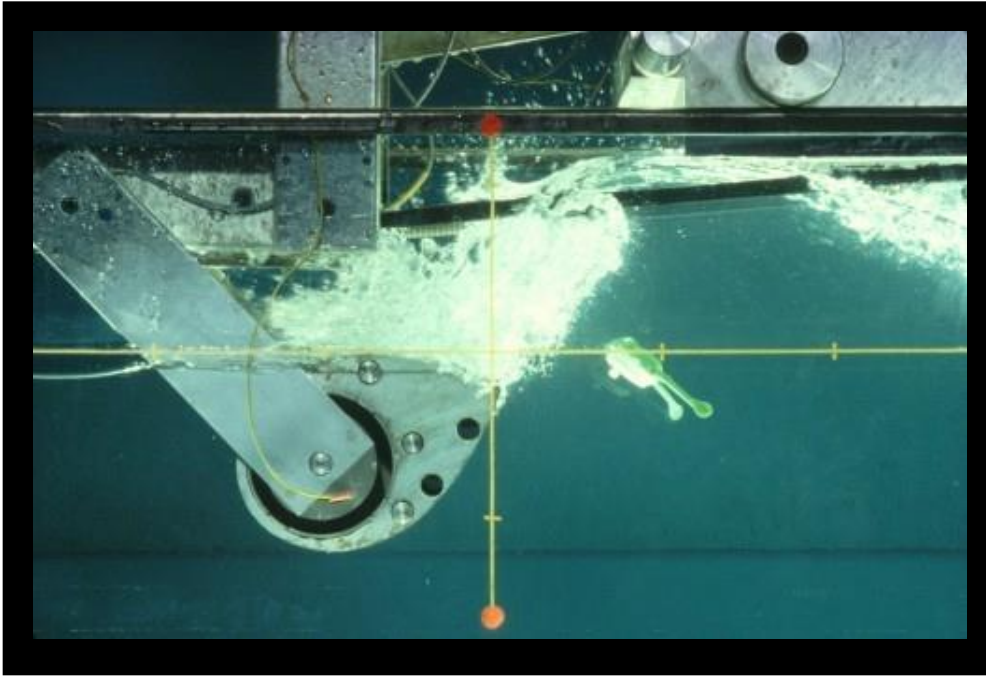
☹ Faillite en 2015

Marine

Wave energy firm Aquamarine Power goes into liquidation

Madeleine Cuff
23 November 2015

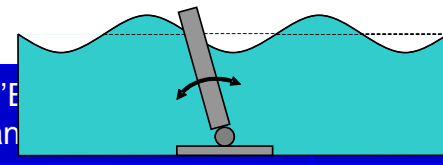
Salter's duck (UK)



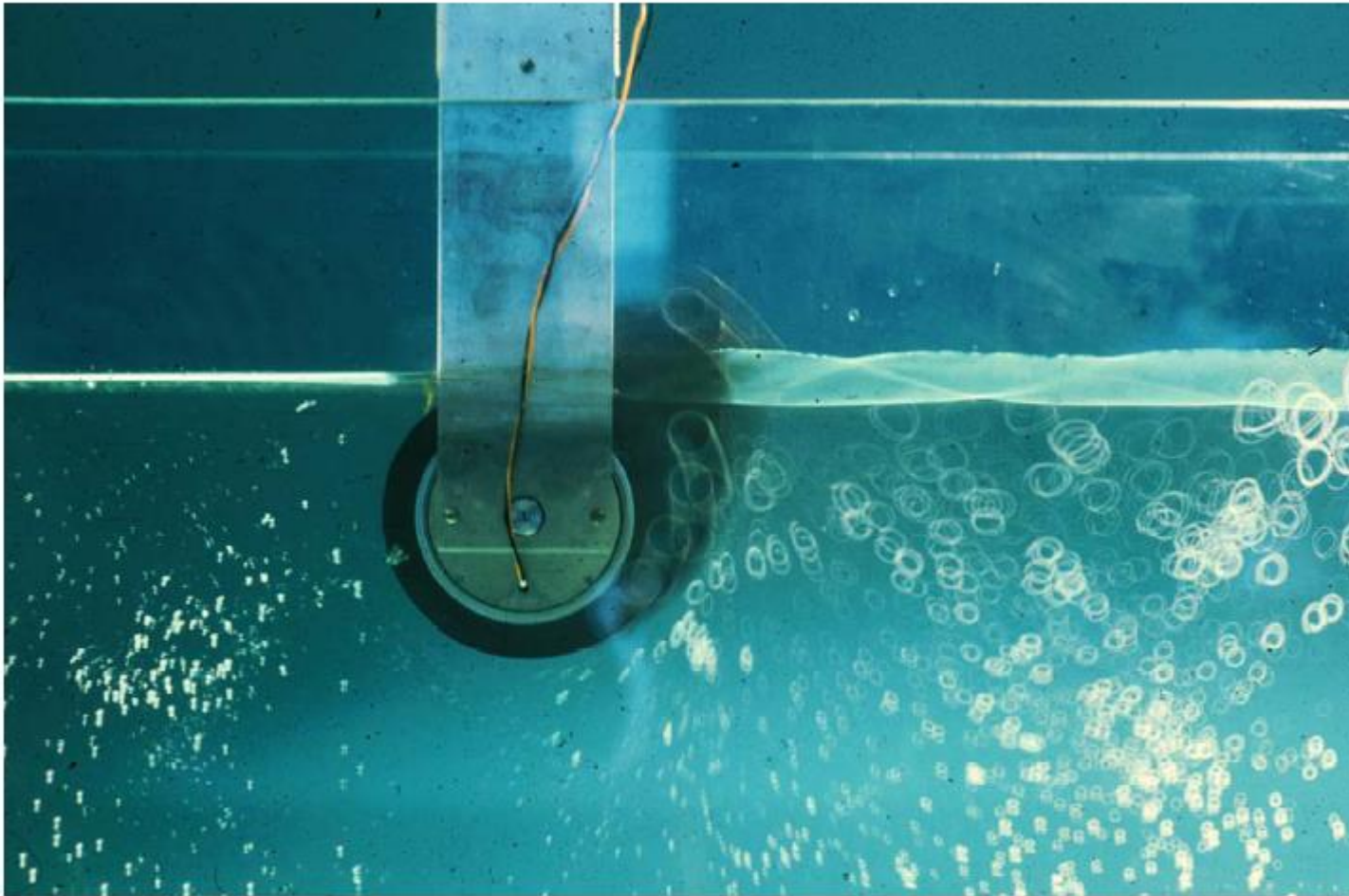
- > Les canards de Salter (1975)
- > 14 m de diamètre, 90 m de long, 11000 t
- > Point fixe par colonne vertébrale ou gyroscope
- > Axe souple

Nature Vol. 256 August 7 1975

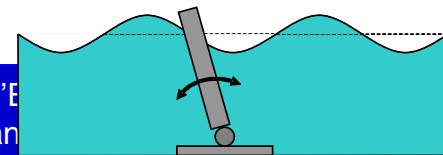
**A resonant point absorber
of ocean-wave power**



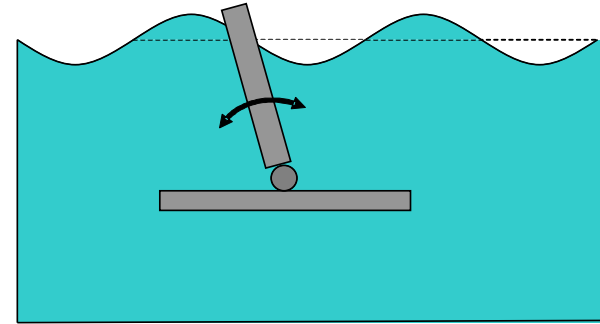
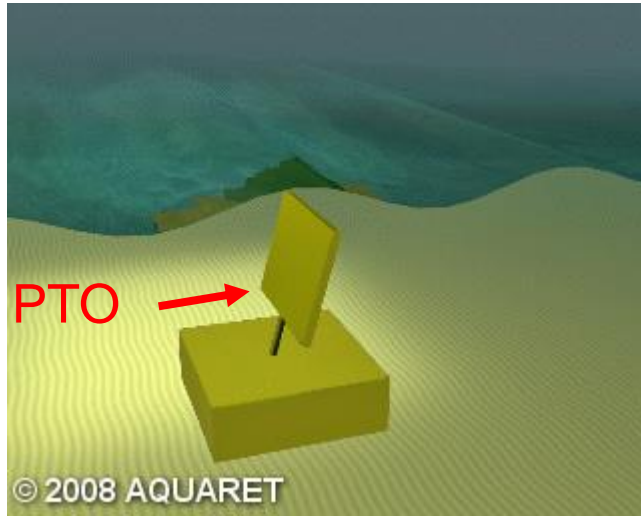
Salter's duck: un système particulièrement efficace



> Absorption de 90% de l'énergie des vagues



Actionnés par la houle – mvt horizontal - / flottant

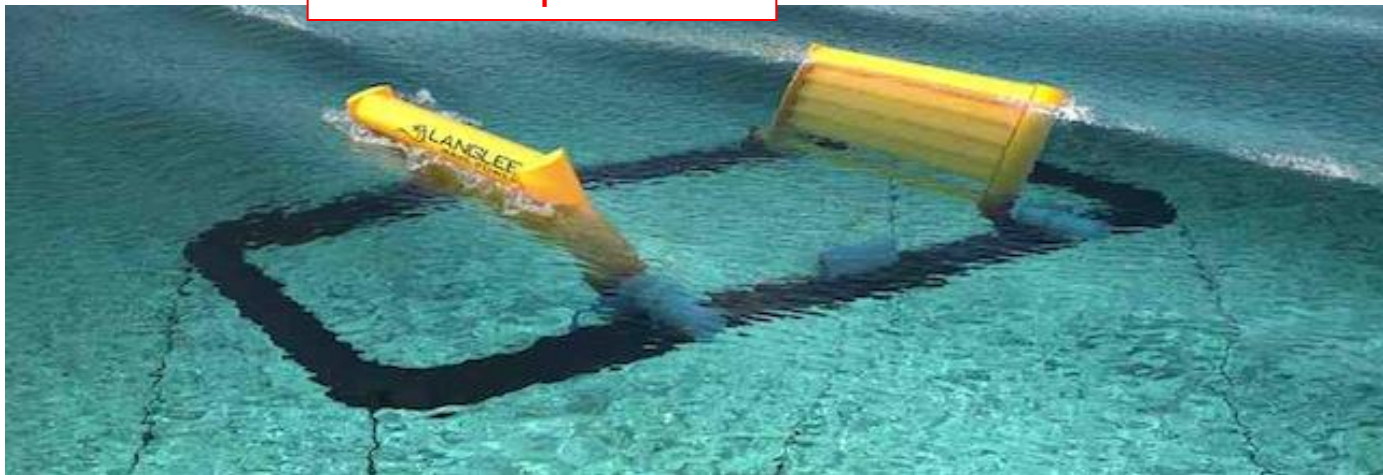
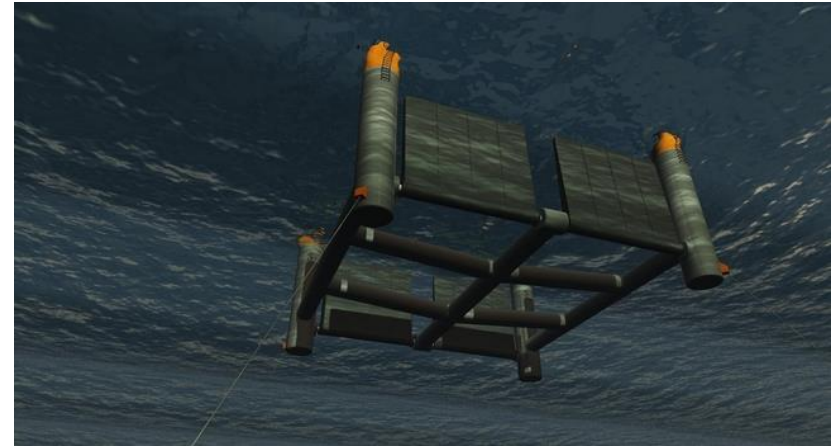


flottant

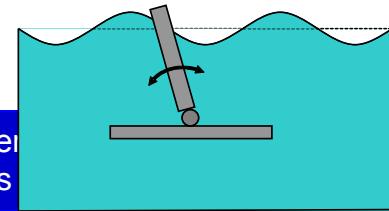
Langlee

- > En développement depuis 2008
- > Version 1: 4 volets immergés, 25 x 25m
- > Version 2 ('Robusto'): 2 volets traversant la surface libre, 30 x 50m, 132 kW
- > Projet de démonstration aux Canaries

☹ En pause

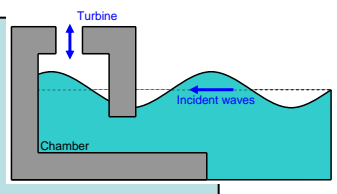


<http://www.langleewavepower.com>

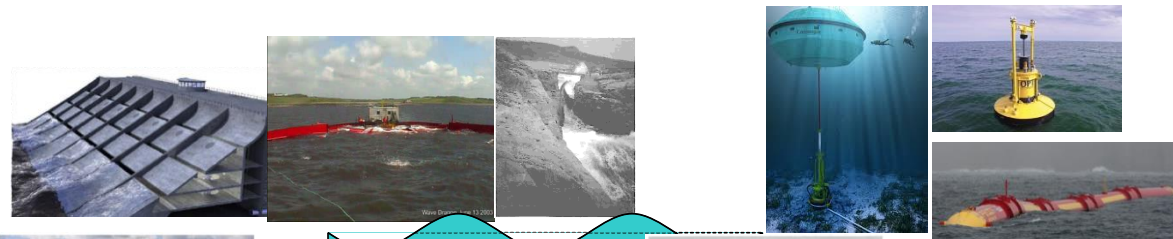
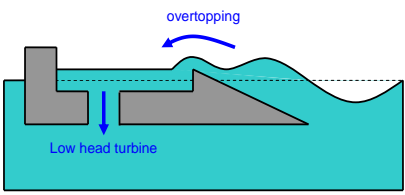


Classification par principe de fonctionnement

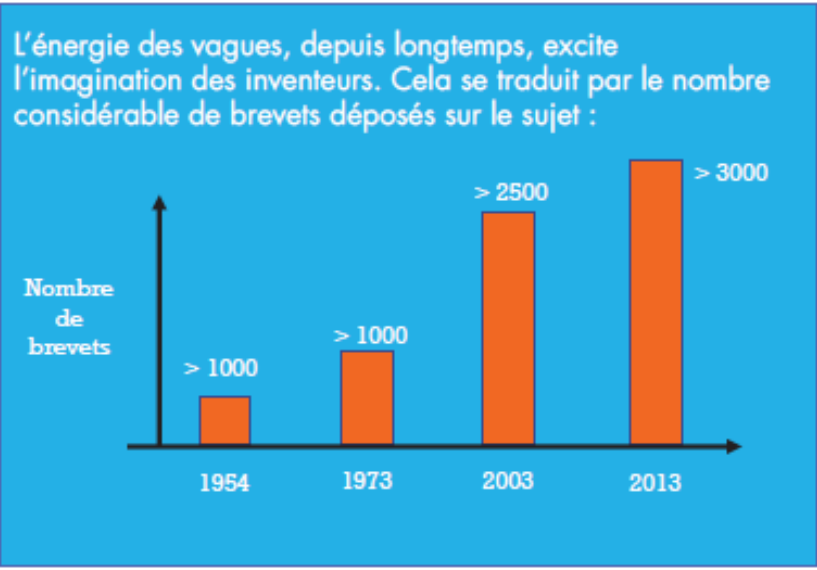
Colonne d'eau oscillante



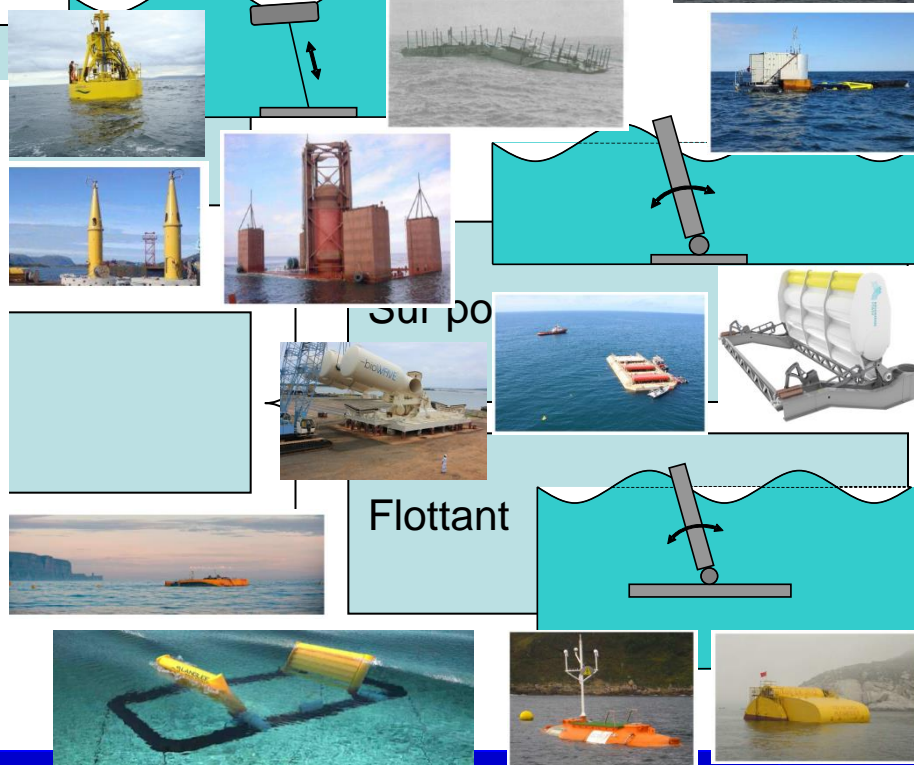
Système à déferlement



Système à action

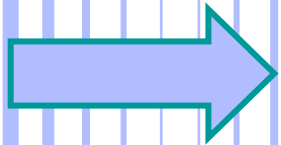


Autre houle

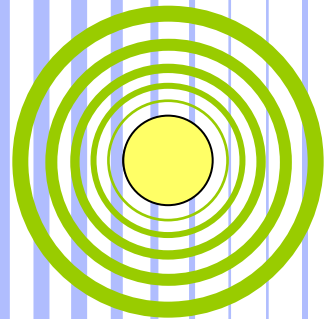
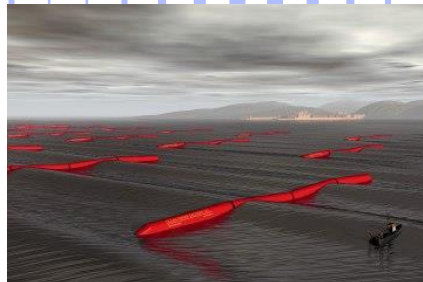
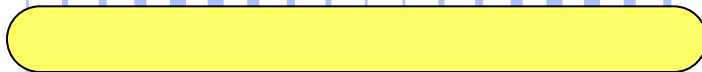


Classification / dimension et configuration

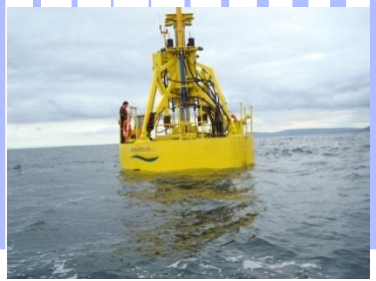
λ = wavelength, ~50 to 150 m



Attenuator



Point absorber



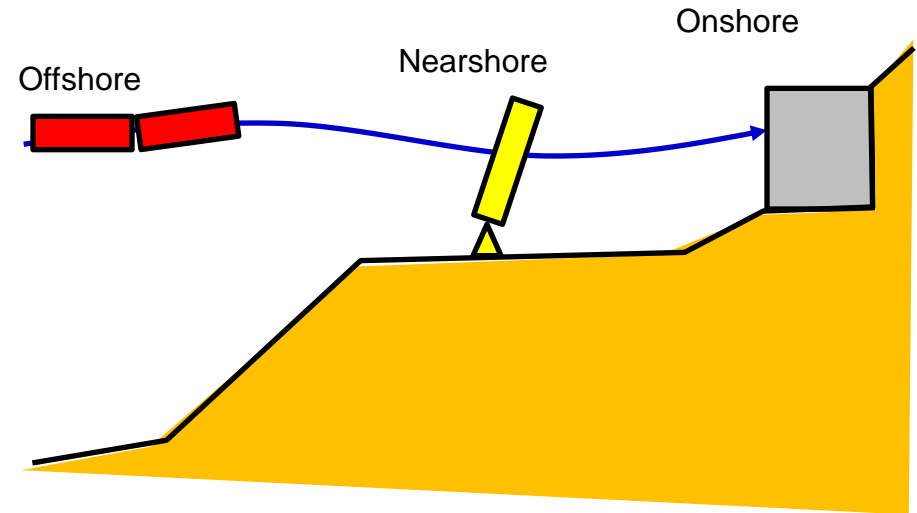
Terminator



Autres classifications

> Profondeur d'eau:

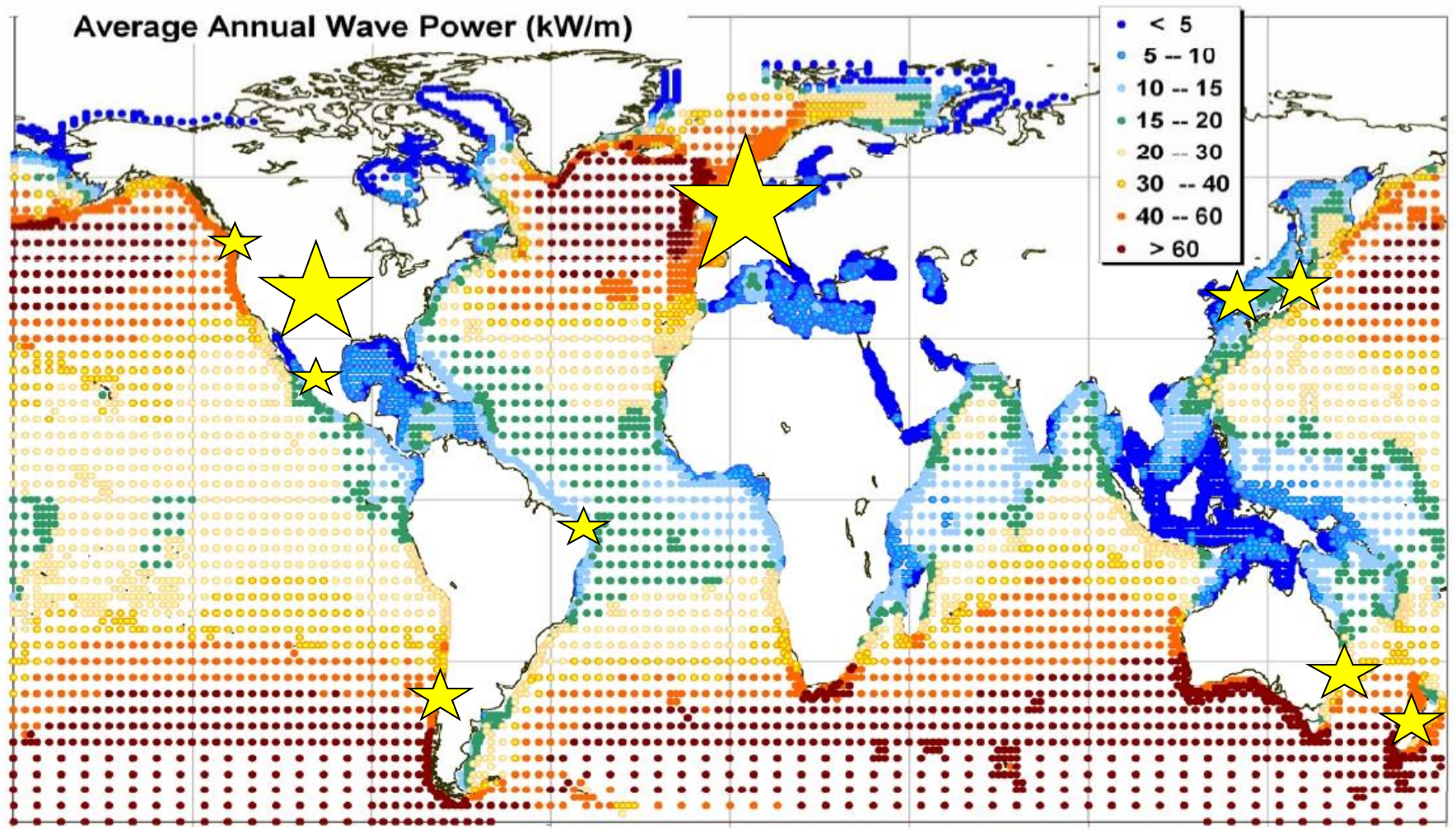
- Onshore → à la côte
- Nearshore → proche côte (profondeur 0 – 50m)
- Offshore → au large, 50m+



> PTO (convertisseur/génératrice):

- Turbine à air
- Hydraulique
- Génératrice directe
- Matériaux électroactifs
- Désalinisation...

Localisation des projets

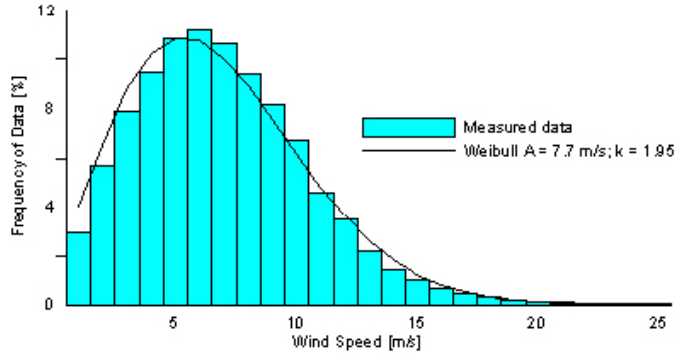


© WorldWaves data/OCEANOR/ECMWF

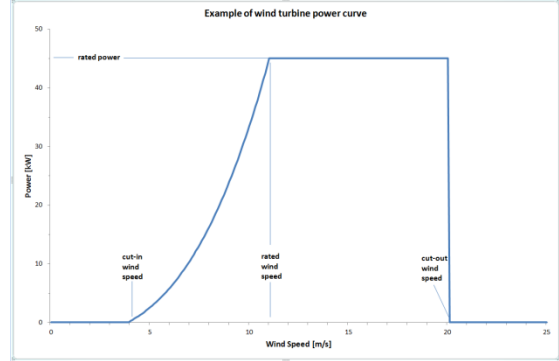
Caractérisation des performances



Distribution vent



Fonction puissance



Production
d'énergie
annuelle

=

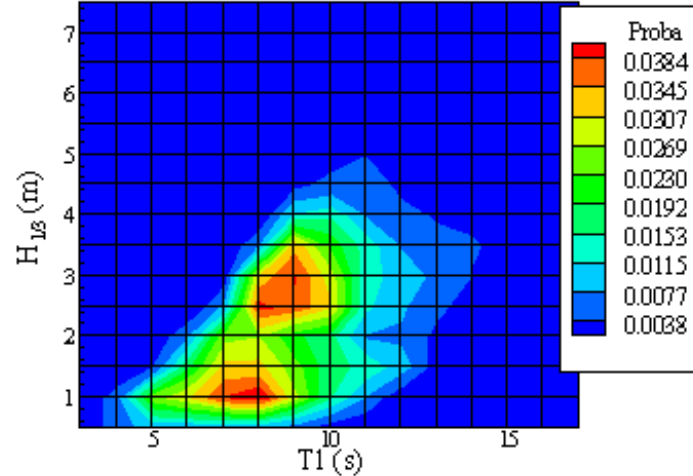
Ressource

x

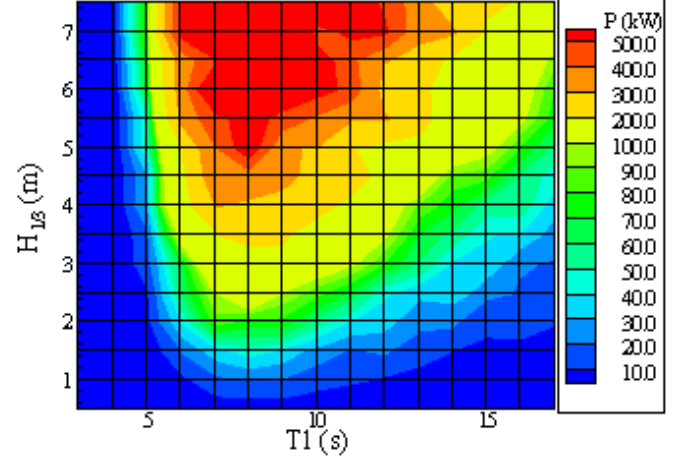
Courbe de puissance



WAVEBOB



Scatter diagram



Matrice de puissance

Résumé

- > Les grandes familles de principes:
 - Colonne d'eau oscillante
 - Déferlement
 - Systèmes actionnés par la houle
 - Mvt principalement verticaux
 - Mvt principalement horizontaux (sur point fixe ou flottant)
- > Des milliers de brevets, des centaines de systèmes houlomoteurs de part le monde
- > De nombreux systèmes ont atteint des stades de développement avancé (TRL7-8): Pelamis, Aquamarine/Oyster, Ceto, OPT/Powerbuoy, ...
- > Caractérisation de la performance d'un système houlomoteur: matrice de puissance

Éléments de rendement hydrodynamique

Comment quantifier le rendement d'un houlomoteur?

- > Largeur de capture [*Falnes 197*]: rapport de la puissance moyenne absorbée à la puissance incidente.

$$C_W = \frac{P_{abs}}{P_W}$$

Puissance absorbée en moyenne annuelle

Ressource

- > Dimension: longueur (m)
- > Equivalent à la largeur de front d'onde totalement absorbée par le houlogénérateur.

Comment quantifier le rendement d'un houlomoteur?

- > “Rendement” hydrodynamique: rapport de la largeur de capture à la largeur typique du système.

Puissance moyenne absorbée
($\langle \rangle$ puissance produite)

Rendement hydrodynamique

$$\eta_1 = \frac{P_{abs}}{P_{wave} B} = \frac{C_W}{B}$$

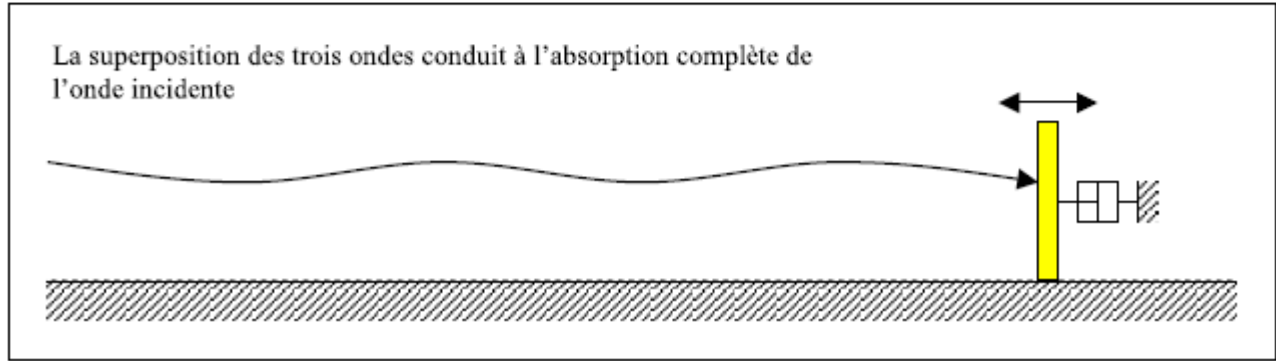
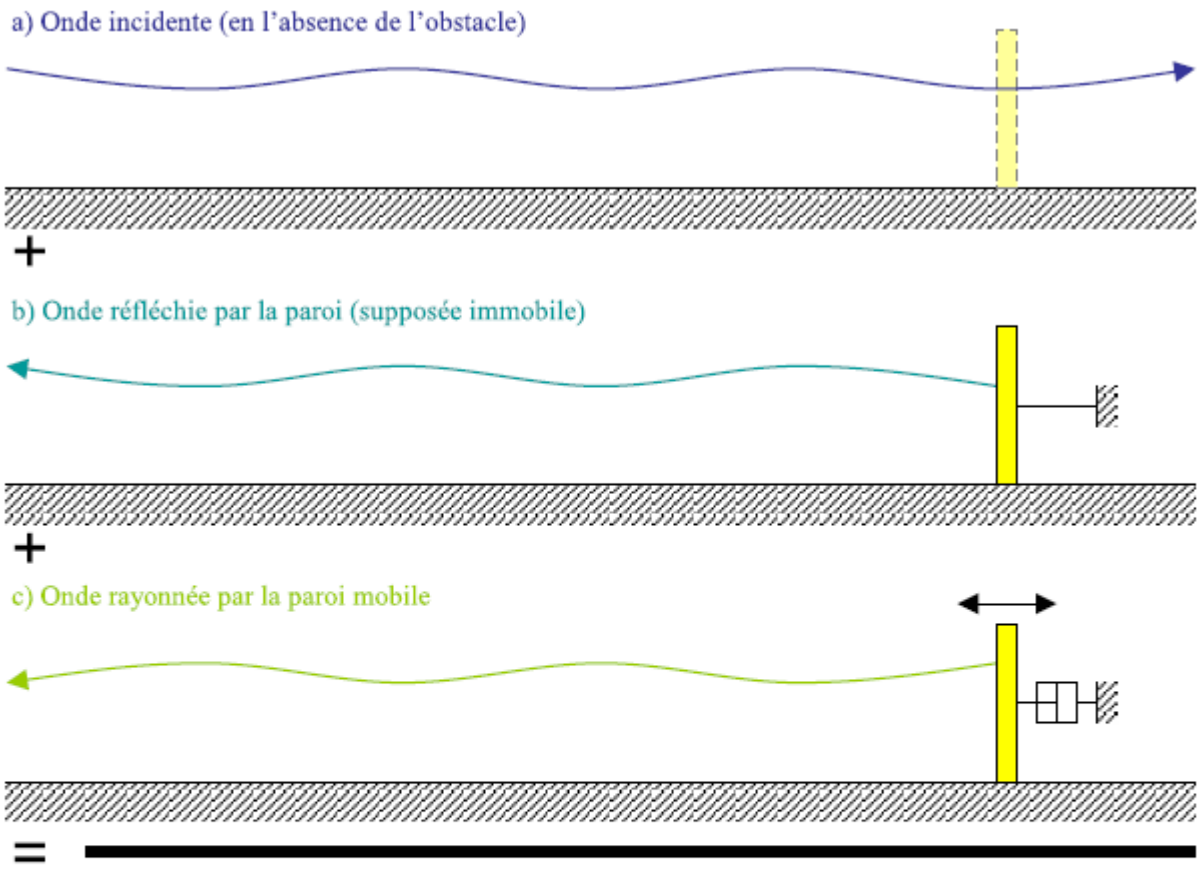
Ressource par mètre de front d'onde

Dimension typique
(Largeur, la plupart du temps)

- > “Rendement” avec des guillemets, car peut être >1 pour des absorbeurs ponctuels (théoriquement)

Absorption de l'énergie des vagues

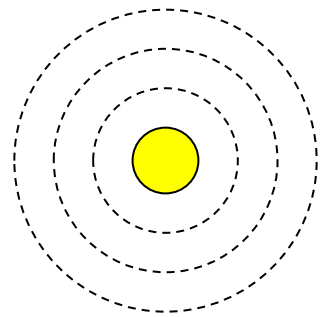
- > Processus physique: interférence d'ondes.
- > En 2D, $CWR_{max}=100\%$



Maxima théoriques en 3D

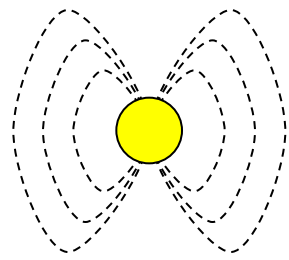
Absorbeurs ponctuels axisymétriques (point absorbers)

> Pilonnant (heave)



$$C_w = \frac{\lambda}{2\pi}$$

> Cavalement/tangage (surge/pitch)

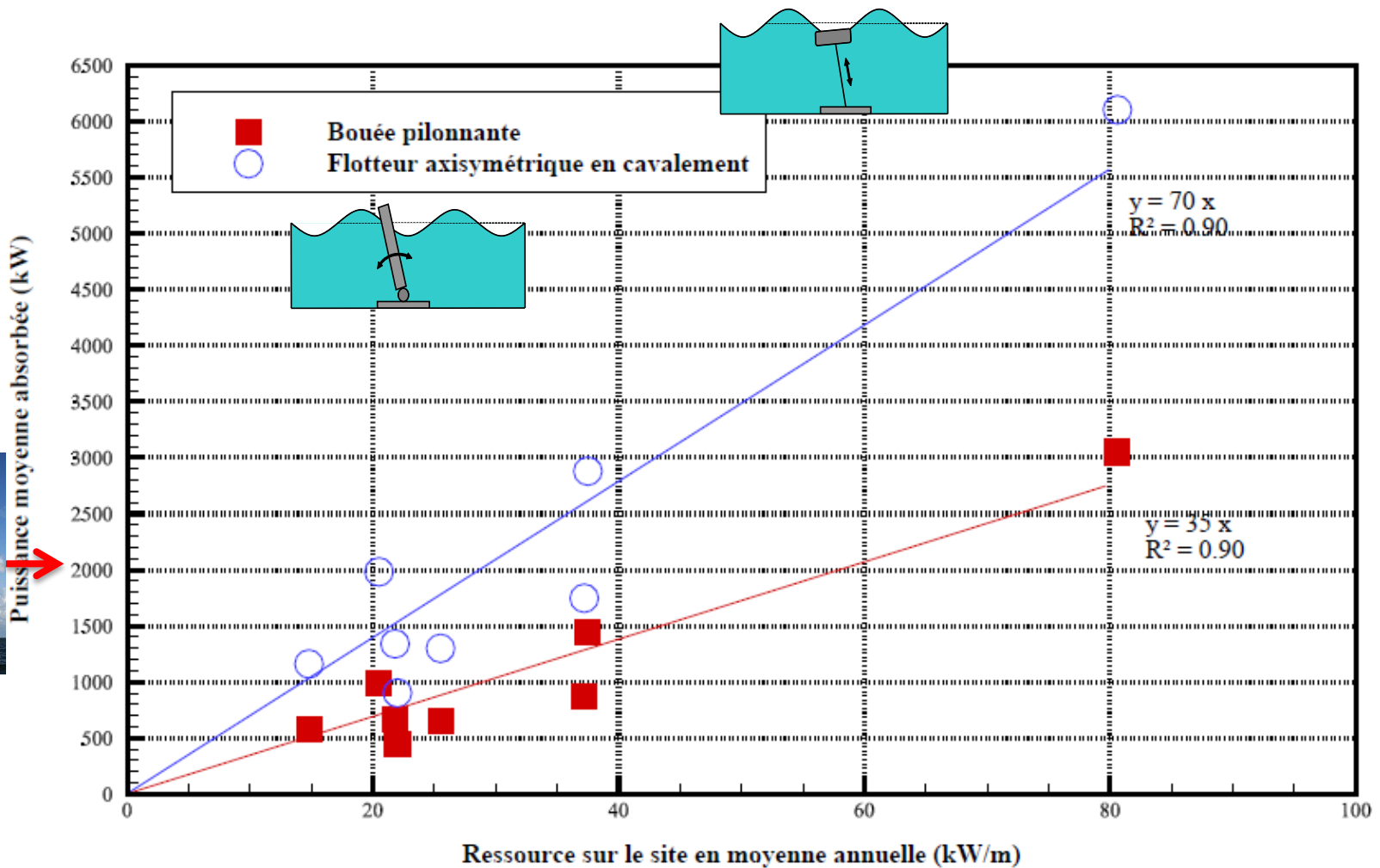


$$C_w = \frac{\lambda}{\pi}$$

Largeur de capture indépendante de la géométrie !

Résultats théoriques: théorie linéarisée et contrôle optimal anticausal.
En pratique, non linéarités et contrôle non démontré en pratique.

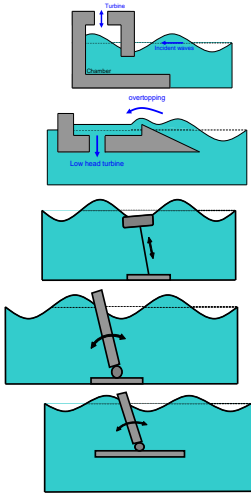
Maxima théoriques en houle irrégulière



Résultats théoriques: théorie linéarisée et contrôle optimal anticausal.
 En pratique, non linéarités et contrôle non démontré en pratique.

Performances observées en pratique

> Selon le principe de fonctionnement



Colonnes d'eau oscillante

Déferlement

Mvt vertical

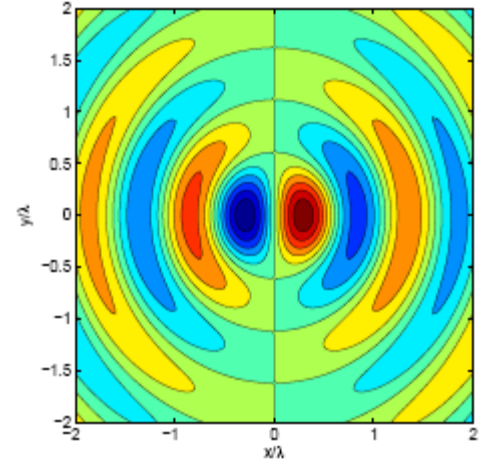
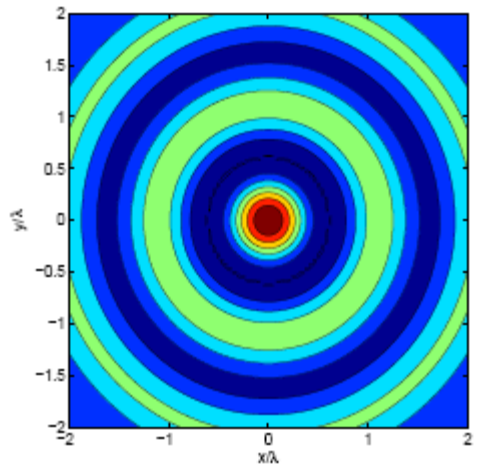
Mvt horizontal, réf. fixe

Mvt horizontal, réf. flottante

- Autres (non pris en compte)

- > Distinction entre archétypes et variations
- > Dimension caractéristique: 'active' width
- > Systèmes pilonnants: diamètre équivalent

Différence fondamentale dans le champ de vagues rayonnés

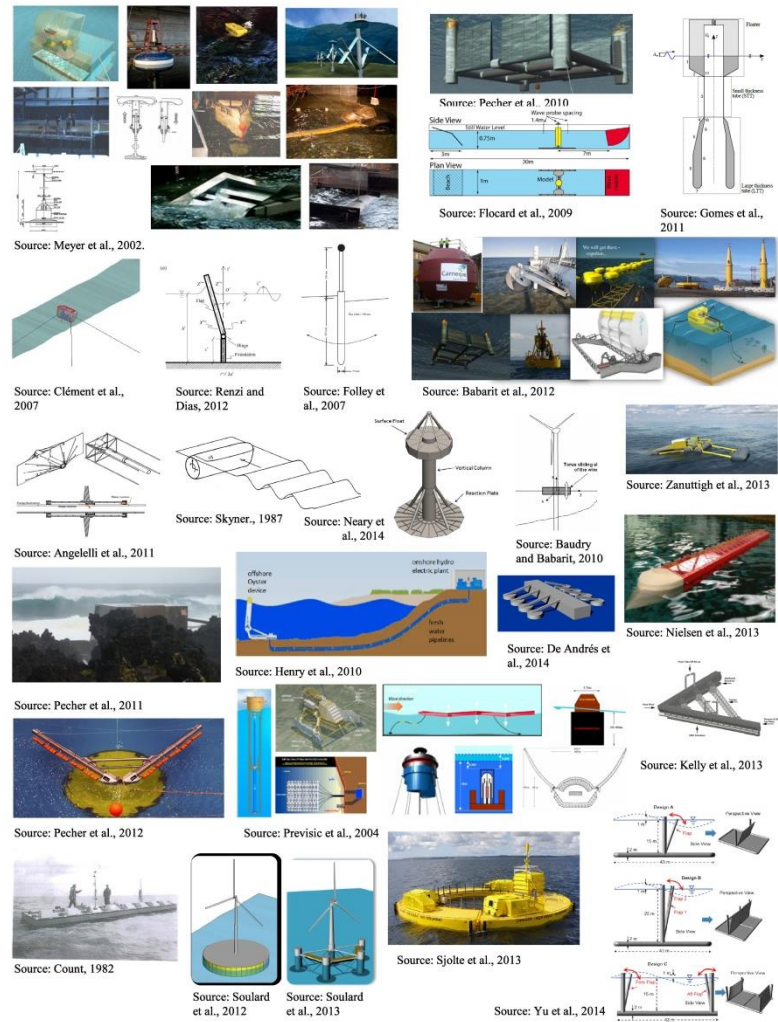


$$D_w^2 = \frac{A_w}{4\pi}$$

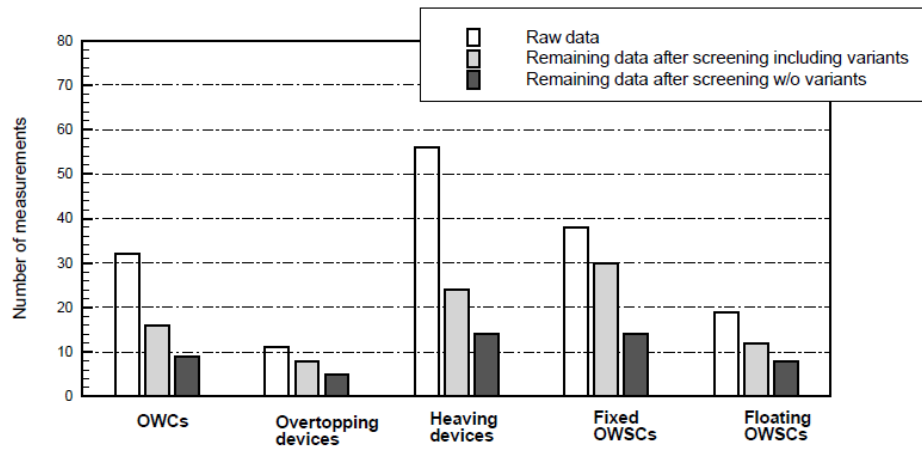
Surface à la flottaison



Base de données WEC EXPERT



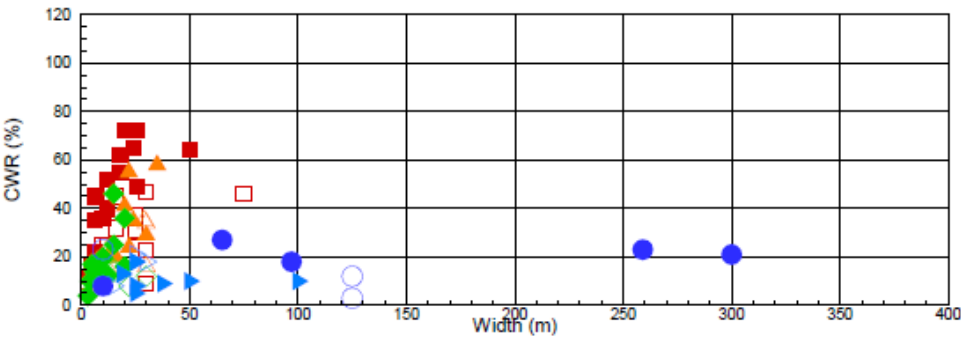
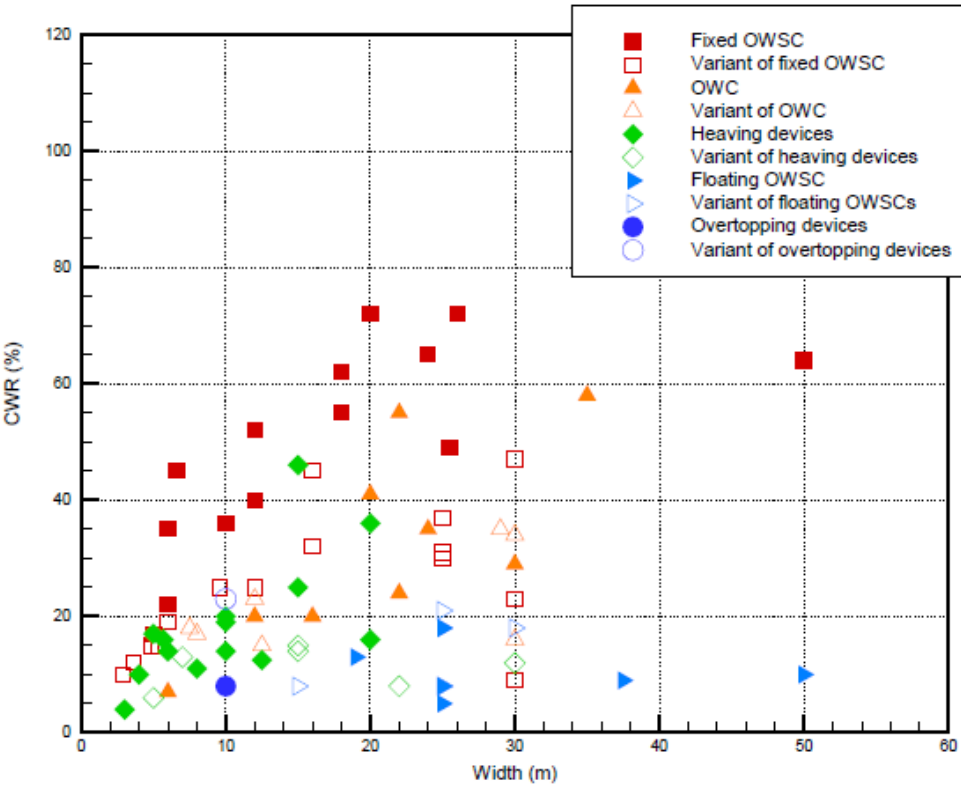
> 90 échantillons retenus



From A. Babarit (2015). *A database of capture width ratio of wave energy converters.* Renewable Energy



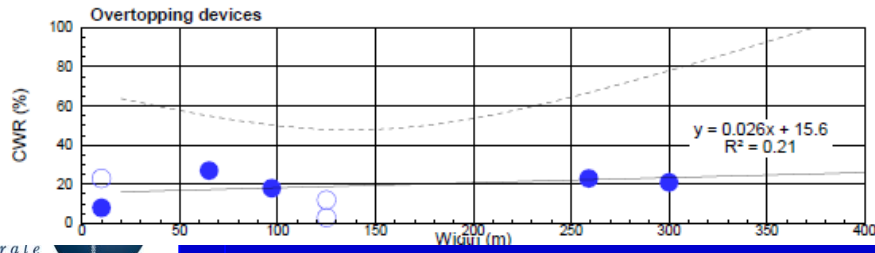
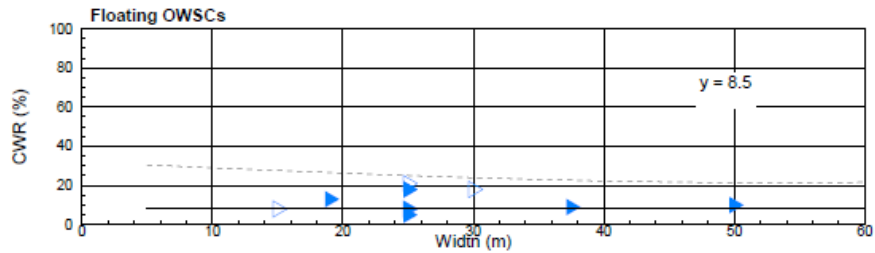
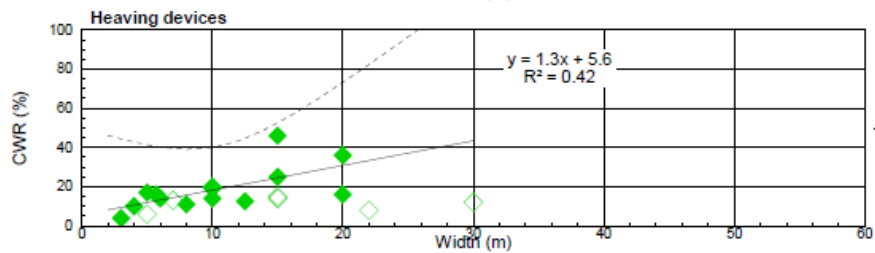
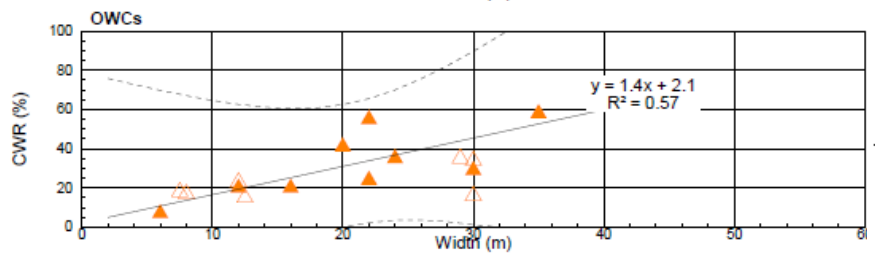
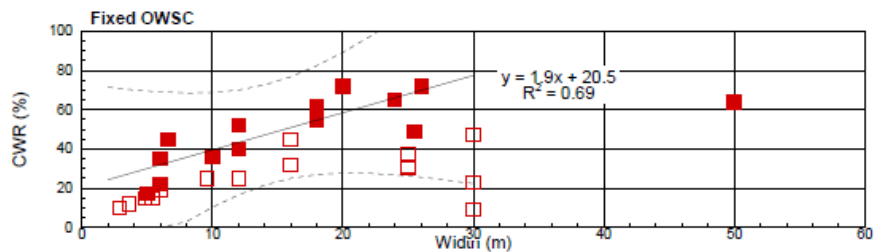
Distribution du CWR en fonction de la dimension



Dispersion importante, mais des tendances:

- > Plus efficace sont systèmes à mvt horizontaux sur référence fixe
- > Moins efficaces: mvt horizontaux sur référence flottante
- > Déferlement, mvt verticaux et colonne d'eau oscillante
- > La largeur de capture relative augmente avec la dimension pour les systèmes mvt horizontaux sur réf. fixe, déferlement, colonne d'eau oscillante, mvt verticaux

Analyse statistique (hors variations)



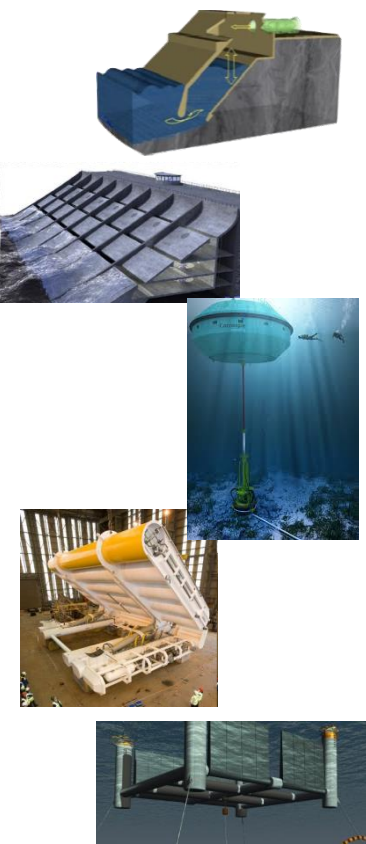
Moyennes

		OWCs	Overtopping devices	Heaving devices	Fixed OWSCs	Floating OWSCs
Capture width ratio (%)	Mean	29	17	16	37	12
	STD	13	8	10	20	5
Characteristic dimension (m)	Mean	20	124	12	18	33
	STD	10	107	7	14	24

Régressions:

	Best fit	95 % confidence interval
OWCs	$\bar{\eta}_1 = 1.4B + 2.1, B \in [0, 40]$	$\bar{\eta}_1 \pm 30\sqrt{1.1 + \frac{(B-21)^2}{81}}$
Overtopping devices	$\bar{\eta}_1 = 0.026B + 15.6, B \in [0, 320]$	$\bar{\eta}_1 \pm 26\sqrt{1.2 + \frac{(B-146)^2}{7230}}$
Heaving devices	$\bar{\eta}_1 = 1.3B + 5.6, B \in [0, 20]$	$\bar{\eta}_1 \pm 21\sqrt{1.1 + \frac{(B-10)^2}{31}}$
Fixed OWSCs	$\bar{\eta}_1 = 1.9B + 20.5, B \in [0, 20]$	$\bar{\eta}_1 \pm 25\sqrt{1.1 + \frac{(B-15)^2}{61}}$
Floating OWSCs	$\bar{\eta}_1 = 8.5, B \in [0, 100]$	$\bar{\eta}_1 \pm 12\sqrt{1.1 + \frac{(B-53)^2}{1090}}$

Largeur de capture ‘moyenne’ par princ. de fonctionnement

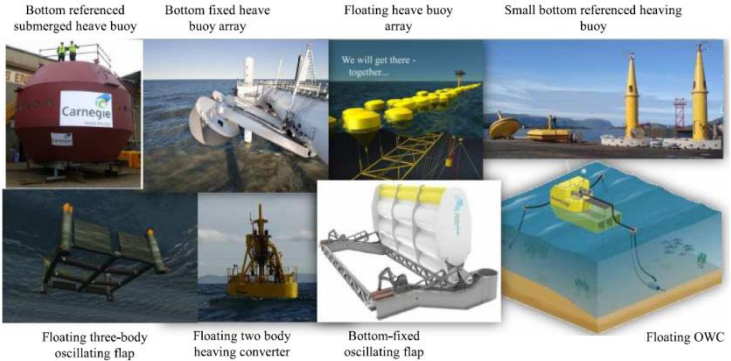


Catégorie	Largeur de capture relative typique	Longueur de référence	Dimension typique	Exemples
Colonne d'eau oscillante	29% [3% - 55%]	Largeur de la chambre	20m	Swan DK3, Pico plant, Energetech, ...
Systèmes à déferlement	17% [1% - 33%]	Largeur face à la houle	124m	Wavedragon,, ...
Systèmes à mouvement principalement vertical	16% [0% - 36%]	Diamètre	12m	Wavebob, Ceto, OPT, ...
Systèmes à mouvement principalement horizontal sur référence fixe	37% [0% - 77%]	Largeur face à la houle	18m	Oyster, Waveroller, ...
Systèmes à mouvement principalement horizontal sur référence flottante	12% [2% - 22%]	Largeur face à la houle	33m	Langlee

- > Indicateur de performance, mais pas un indicateur de coût
- > Puissance absorbée <> électricité produite

Parangonnage technico-économique

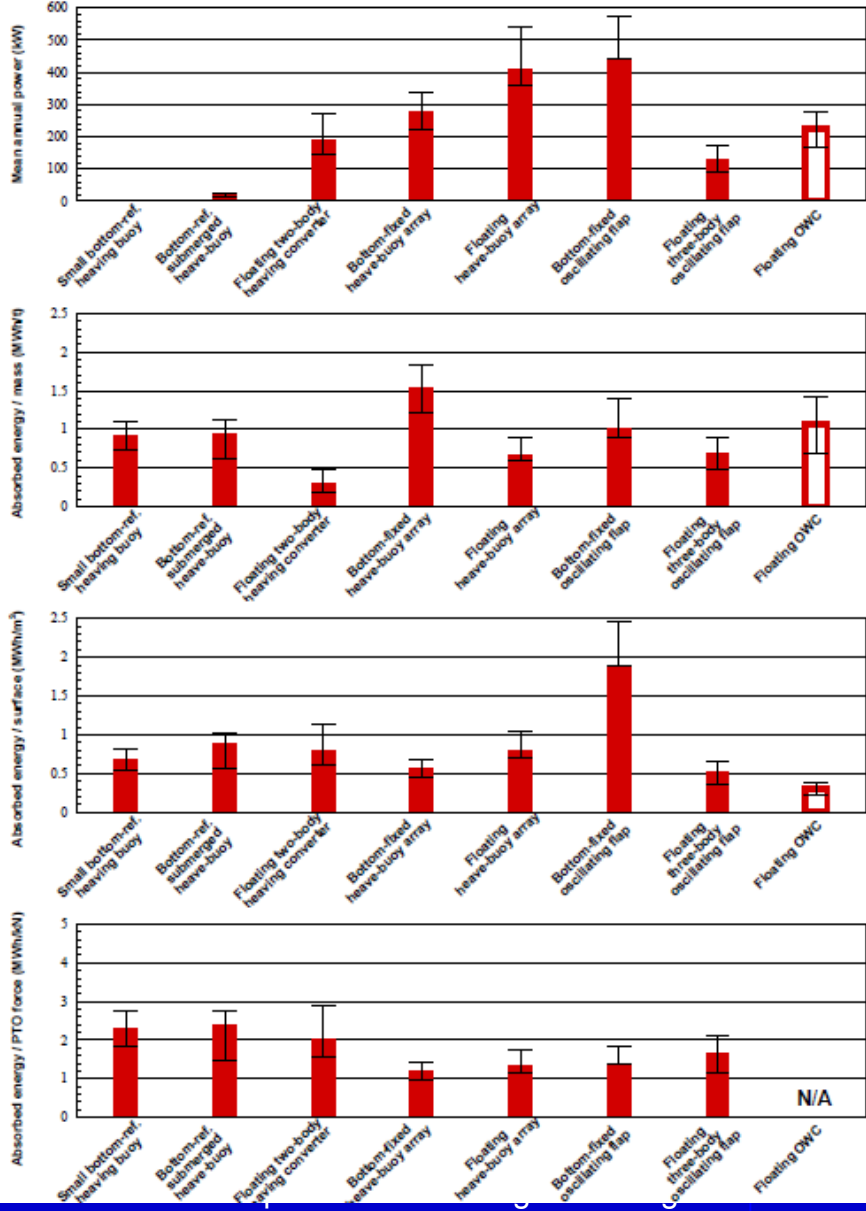
> 8 technologies



> Estimation de la production annuelle par modélisation numérique

> Critères de comparaison:

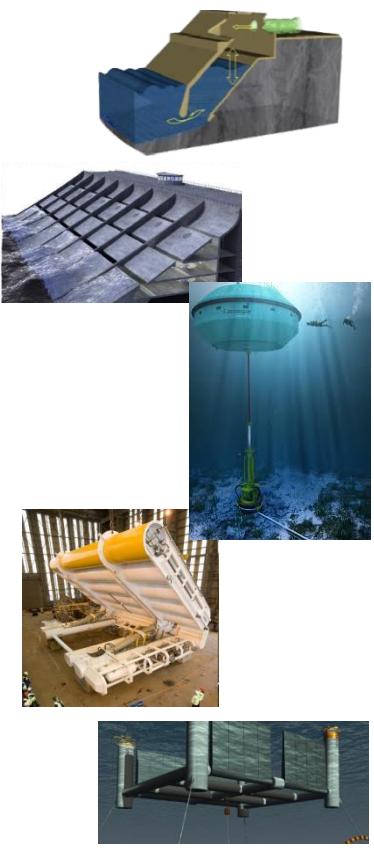
- Production d'énergie annuelle
- Energie / Volume caractéristique
- Energie / Surface caractéristique
- Energie / Effort caractéristique dans le convertisseur



Résumé

- > Caractérisation de la ressource: scatter diagrams
- > Fonction de représentation des capacités des machines houlomotrices: matrice de puissance
- > Largeur de capture relative typiques
 - Dépend du principe opérationnel
 - Typiquement de 10 à 40%
- > Variabilité faible entre technologies classiques du point de vue d'indicateurs économiques

Exercice : plateforme hybride



Catégorie	Largeur de capture relative typique	Longueur de référence	Dimension typique	Exemples
Colonne d'eau oscillante	26% [0% - 52%]	Diamètre de la chambre	17m	Swan DK3, Pico plant, Energetech, ...
Systèmes à déferlement	16% [2% - 30%]	Largeur face à la houle	170m	Wavedragon, Power pyramid, ...
Systèmes à mouvement principalement vertical	16% [0% - 36%]	Diamètre caractéristique (Rayon du disque de surface équivalente à la surface horizontale du système)	12m	Wavebob, Ceto, Pelamis, OPT, ...
Systèmes à mouvement principalement horizontal sur référence fixe	44% [8% - 80%]	Largeur face à la houle	17m	Oyster, Waveroller, ...
Systèmes à mouvement principalement horizontal sur référence flottante	12% [2% - 22%]	Largeur face à la houle	27m	Langlee

Pour chacune des catégories ci-dessus, estimer la dimension caractéristique d'un houlomoteur de production d'énergie comparable à une éolienne offshore de 5MW

Les nouvelles tendances

Les nouvelles tendances

- > Systèmes de grandes dimensions, à multiples absorbeurs
- > Systèmes souples, déformables
- > Systèmes combinant vent et vagues
- > Marchés de niche

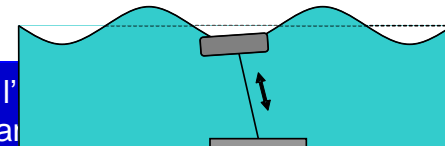
Wavestar (DK)

- > En dvpt depuis 2000
- > 20 flotteurs (diamètre 5 m, attachés sur une plateforme autoélevatrice (jack-up))
- > Un prototype en fonctionnement au Danemark de 2009 à 2014

☹ Faillite en 2016

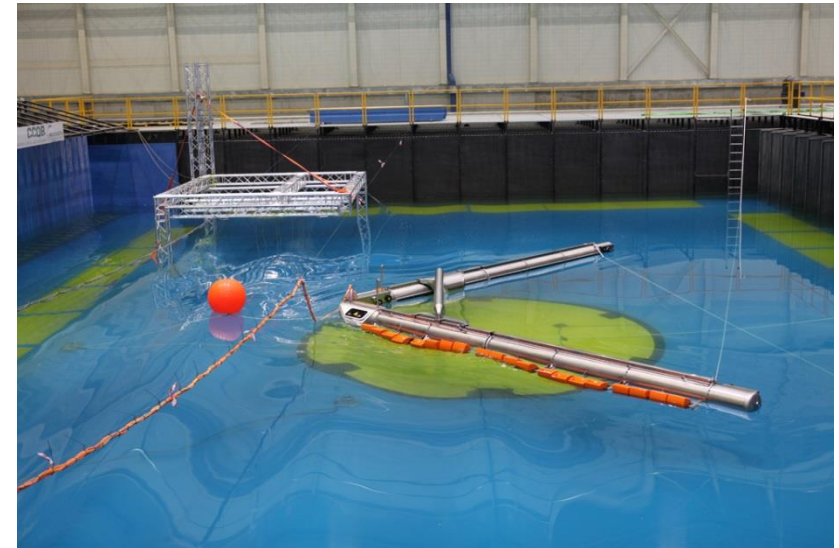


<http://www.wavestarenergy.com>

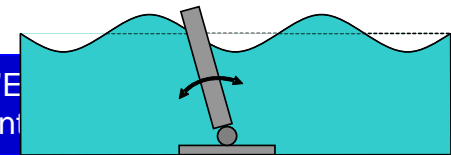


WEPTOS (DK)

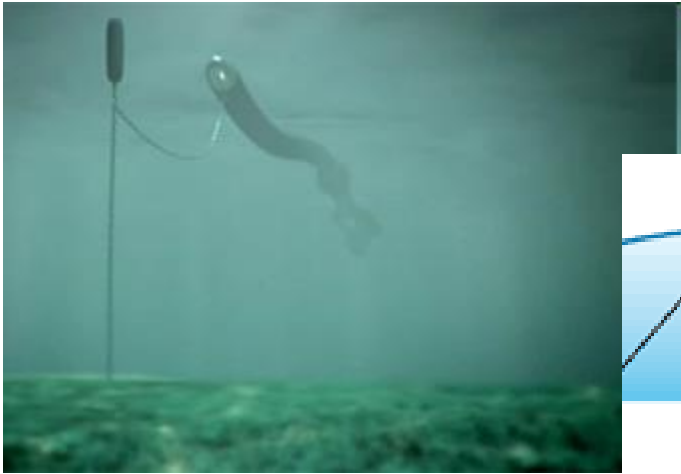
- > En développement depuis 2007
- > Salter's duck montés sur deux bras orientables
 - Réduire les efforts structuraux en conditions de tempêtes
- > Version 1 testé en Espagne (IHC)
 - 2x 20 flotteurs, longueur ~ 100m
- > Version 2 (2014)
 - 2x10 flotteurs, longueur ~ 100m
- > Essais en mer fin 2016 sur un prototype échelle 1/10



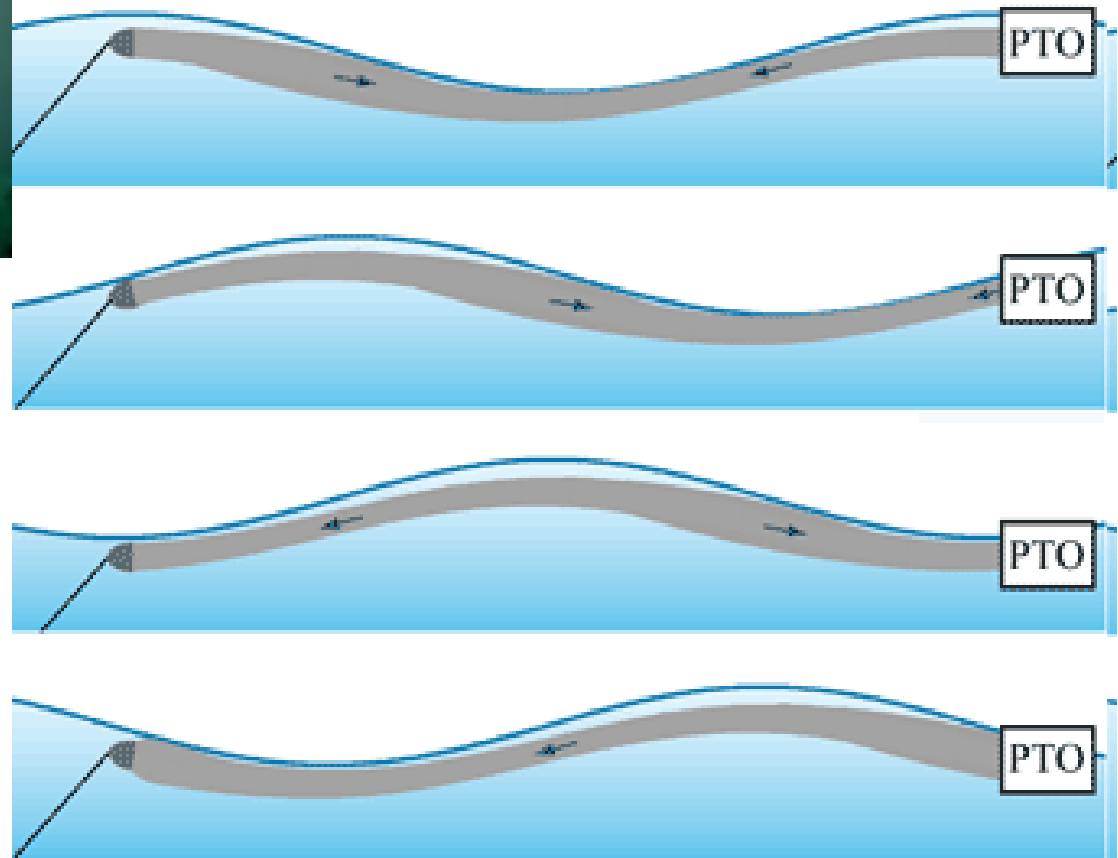
<http://www.weptos.com>



Anaconda (UK)



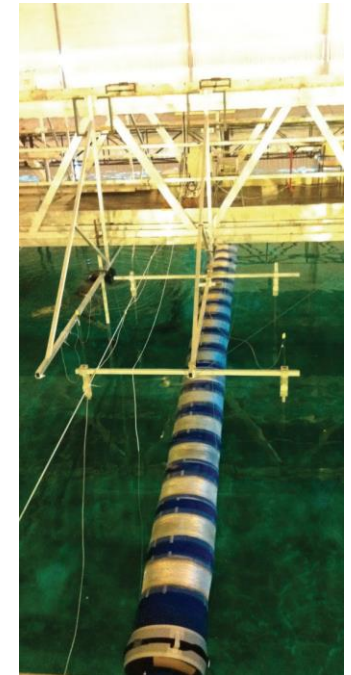
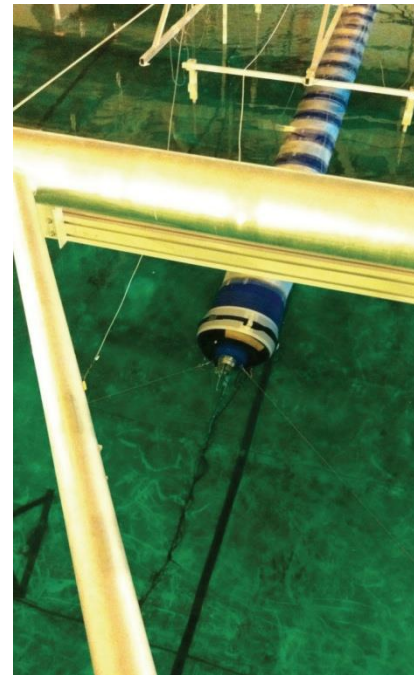
- > En développement depuis 2006
- > Tube en caoutchouc, rempli d'eau sous pression
- > La houle génère des ondes de renflement (surpression) qui se propagent le long du tube
- > PTO en extrémité de tube



<http://www.bulgewave.com>

SBM S3 (Monaco)

- > En développement depuis 2009
- > Paroi du tube (structure) faite en polymères électroactifs (structure = PTO)



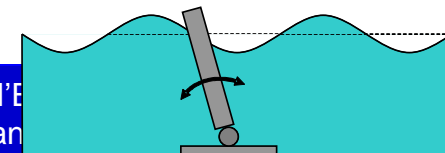
AWS III (UK)

- > En dvpt depuis 2004 (sur le principe du SeaClam, 1986)
- > 12 membranes flexibles pressurisées transformant l'énergie des vagues en énergie pneumatique

☹ Faillite en 2013



<http://www.awsocan.com>



Wave Carpet (US)

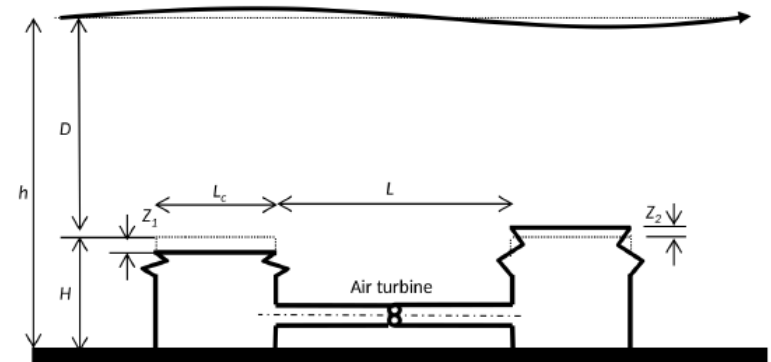
- > En développement depuis 2012
- > Tapis flexible fixé au fond, se déforme et absorbe la houle
 - Inspiré par l'effet d'absorption de la houle par les fonds vaseux.



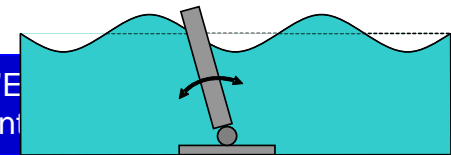
<http://taflab.berkeley.edu/uc-berkeley-ocean-wave-energy-converter/>

M3wave (US)

- > 'Pressure differential device'
- > En développement depuis 2011
- > Prototype installé en Oregon en septembre 2014

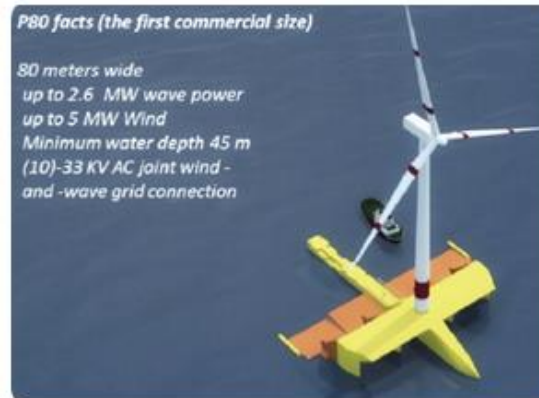
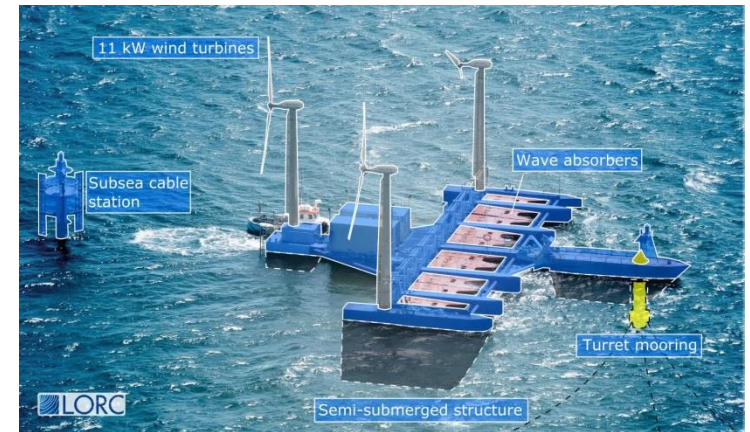


<http://www.m3wave.com>



Poseidon (DK)

- > Dvlpt depuis 1995
- > Plateforme flottante combinant houlomoteurs et éoliennes offshore
- > Prototype 37m testé en mer en 2008-2009, 2010 et 2012-2013
- > 2014: Dvlpt P80



<http://www.floatingpowerplant.com>

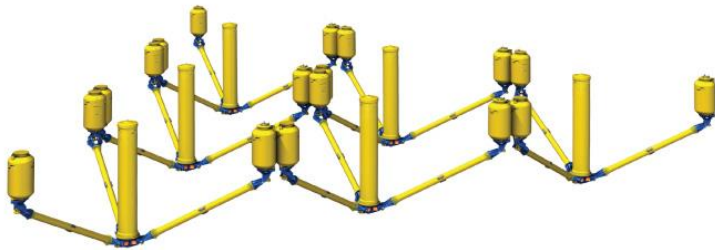
AEOLOS (Corée du Sud)

- > Projet recherche Université d'Ulsan, 2015
- > 12 MW wind turbine, arbre éolienne en composite, génératrice utilisant matériaux superconducteurs
- > Pas d'ancrage, positionnement assuré par houlomoteurs



Albatern (UK)

- > 'Réseau de flotteurs articulés'
- > Positionnement sur marchés:
 - Aquaculture, plateforme, communautés insulaires

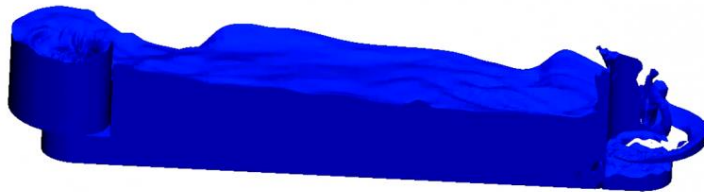


Ile de Muck, Ecosse, 22kWc

<http://www.albatern.co.uk>

GEPS Techno (F)

- > Autonomie énergétique en mer: bouée autonome, stabilisateur de navire avec production d'énergie



<http://www.geps-techno.com>

Défi

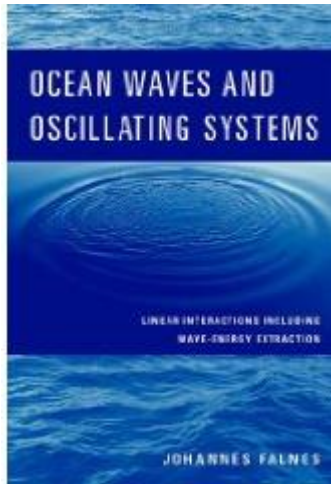
- > Aujourd'hui: 2 000 à 3 000 brevets déposés
 - > Peut-on produire de l'électricité avec l'énergie des vagues?
 - ✓ oui
 - > Peut-on produire de l'électricité avec l'énergie des vagues à un coût acceptable???
- Revenus faibles: prix de l'énergie, production dans les conditions moyennes
 - Coûts élevés: milieu difficile, survivabilité dans les conditions extrêmes



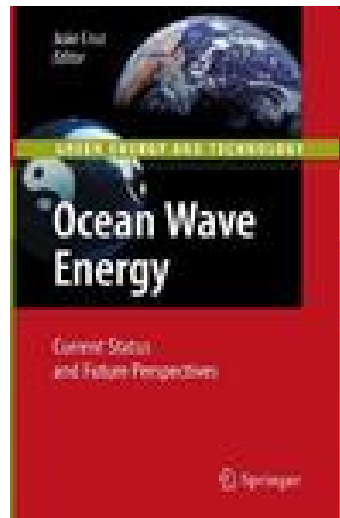
Résumé

- > Nouvelles tendances
 - Systèmes de grande dimension
 - Systèmes souples, déformables
 - Combinaisons houlomoteurs/éoliennes offshore
 - Positionnement sur de nouveaux marchés
- > Un défi toujours à relever: la rentabilité des projets

Bibliographie



- Ocean waves and oscillating systems: linear interaction including wave-energy extraction (J. Falnes, Cambridge University Press).



- Ocean Wave Energy – Current status and Future Perspectives (J. Cruz, Springer, 2008)



- Energie thermique des mers, houlogénération et technologies de conversion et de transport des énergies marines renouvelables (B. Multon, Hermès, 2012)

« Utilisez la nature, cette immense auxiliaire dédaignée. (...) Réfléchissez au mouvement des vagues, au flux et reflux, au va-et-vient des marées. Qu'est-ce que l'océan? une énorme force perdue. Comme la terre est bête! Ne pas employer l'océan! »

Victor HUGO, *Quatre-vingt treize* (1874)