



HAL
open science

Conversion des ressources énergétiques marines renouvelables en électricité

Bernard Multon

► **To cite this version:**

Bernard Multon. Conversion des ressources énergétiques marines renouvelables en électricité. École d'ingénieur. France. 2017. cel-01847567

HAL Id: cel-01847567

<https://cel.hal.science/cel-01847567>

Submitted on 23 Jul 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Conversion des ressources énergétiques marines renouvelables en électricité

Bernard MULTON

Source image : Auteur

B. Multon ENS de Rennes

Plan

- Bilan des ressources et potentiels
- Récupération de l'énergie thermique des mer
- Aérogénérateurs
- Hydroliennes et usines marémotrices
- Houlogénérateurs
- Récupération de l'énergie osmotique
- Chaînes électriques, tendances
- Câbles sous-marins,
- Transmissions HVDC
- Stockage massif d'énergie électrique en mer

Quelles ressources et quels potentiels ?

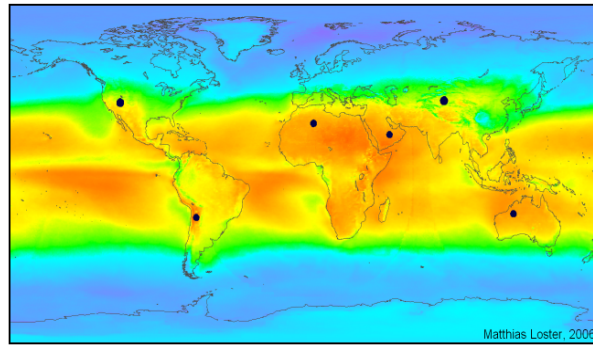
Références énergétiques mondiales 2013 :

Consommation primaire : $E_h = 157\,500 \text{ TWh}_p$

Production d'électricité : $E_e = 23\,300 \text{ TWh}_e$

1- Energie solaire reçue dans la troposphère : 1,2 milliards TWh_p / an (8000. E_h)

➡ **1.1- Rayonnement solaire** : ressources $\cong 800$ millions TWh_p (70%)
Techniquement accessibles : ?? peut-être 1 million de TWh_e (zones côtières) ?



0 50 100 150 200 250 300 350 W/m^2

Energie reçue annuellement dans la zone inter-tropicale : **$200 \cdot 10^6 \text{ TWh}_p$** (100 Mkm^2)
Énergie électrique maximale récupérable soutenable < **$60\,000 \text{ TWh}_e$**

(Source : Nihous, Journal of Energy Resources Technology, 2007)

3

B. Multon ENS de Rennes

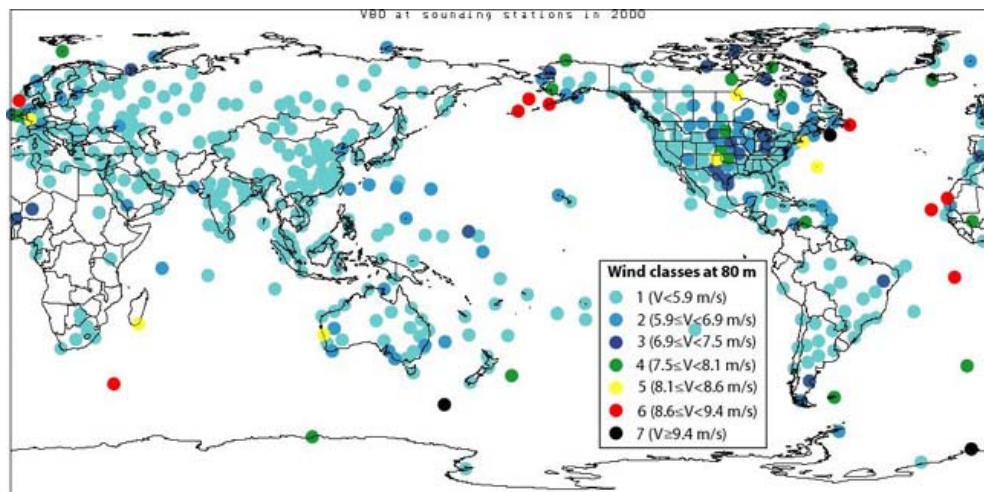
Quelles ressources et quels potentiels ?

1- Energie solaire reçue dans la troposphère (suite)

➡ **1.2- Vents** : ressources 30 millions TWh_p (2,5%)
Techniquement accessibles : 280 000 TWh_e
Exploitable : **$39\,000 \text{ TWh}_e$**

source : World in Transition – Towards Sustainable Energy Systems 2003

A réévaluer à la hausse compte tenu des progrès techniques récents



Source : Journal of Geophysical Research

4

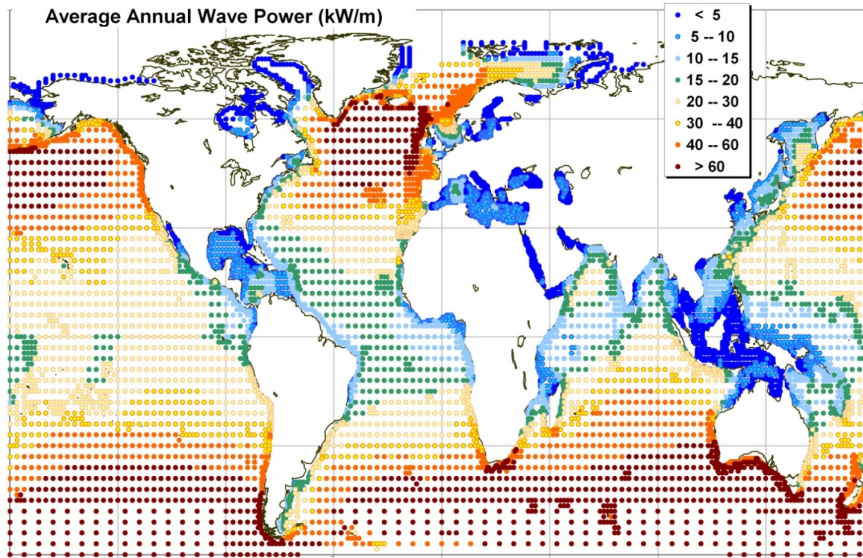
B. Multon ENS de Rennes

Quelles ressources et quels potentiels ?

1- **Energie solaire** reçue dans la troposphère (suite)

➡ **1.3- Houle** : ressource brute 17 000 TWh (dans la bande 0 à 50 km des côtes)
ressource convertible (technologie Pelamis) : **900 TWh_e**

source : Gunn & Stock-Williams, "Quantifying the global wave power resource", Renewable Energy 44, 2012.



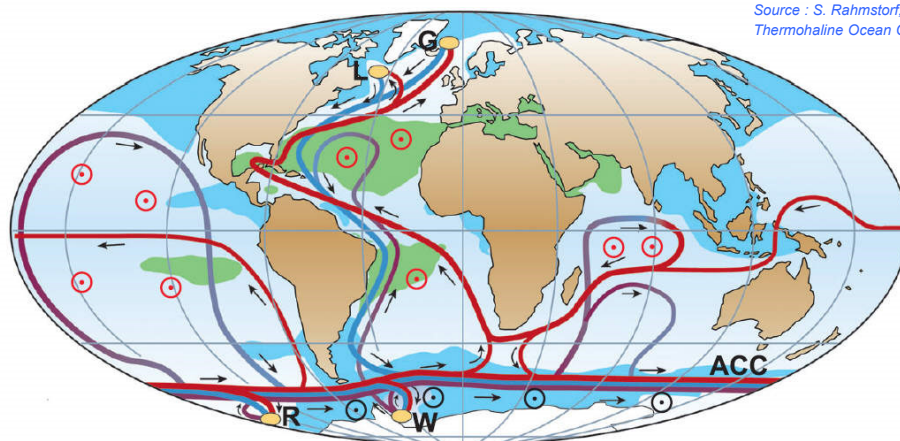
Source : OCEANOR

Quelles ressources et quels potentiels ?

1- **Energie solaire** reçue dans la troposphère (suite)

➡ **1.4- Courants "continus"** (circulation thermohaline, transport de 20 millions de TWh_p)
Ressource primaire mécanique : 4 000 TWh_p (Gulf Stream : 300 TWh_p)
Exploitable : **?? TWh_e** (sans doute à éviter, pour cause de risques climatiques)

Source : S. Rahmstorf, Thermohaline Ocean Circulation. Encyclop. of Quaternary Sc., 2006.



- | | | |
|---|---------------------------|-----------------|
| — Surface flow | ⊙ Wind-driven upwelling | L Labrador Sea |
| — Deep flow | ⊗ Mixing-driven upwelling | G Greenland Sea |
| — Bottom flow | ■ Salinity > 36 ‰ | W Weddell Sea |
| ● Deep Water Formation | ■ Salinity < 34 ‰ | R Ross Sea |

Quelles ressources et quels potentiels ?

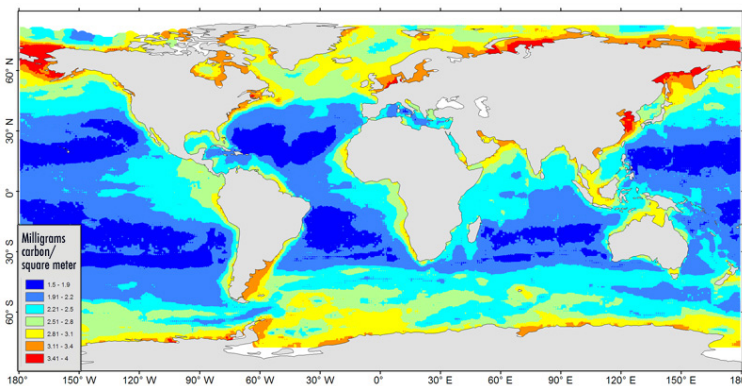
1- Energie solaire reçue dans la troposphère (suite)

- ➡ **1.5- Energie osmotique** (gradients de salinité eaux douces / eaux salées)
Ressource primaire : 30 000 TWh_p
Exploitable : **2000 TWh_e**

Source : Soerensen - Weinstein, "Ocean energy: Position paper for IPCC", Conference on Renewable Energy, Lübeck, 2008

- ➡ **1.6- Biomasse marine** (algues...)
Ressource primaire : 450 000 TWh_p
Exploitable (renouvelables) : **1000 TWh_e ??**

Les usages énergétiques de la biomasse les plus appropriés ne sont peut-être pas électriques ?



Source : Chih-Lin Wei and Gilbert T. Rowe

7

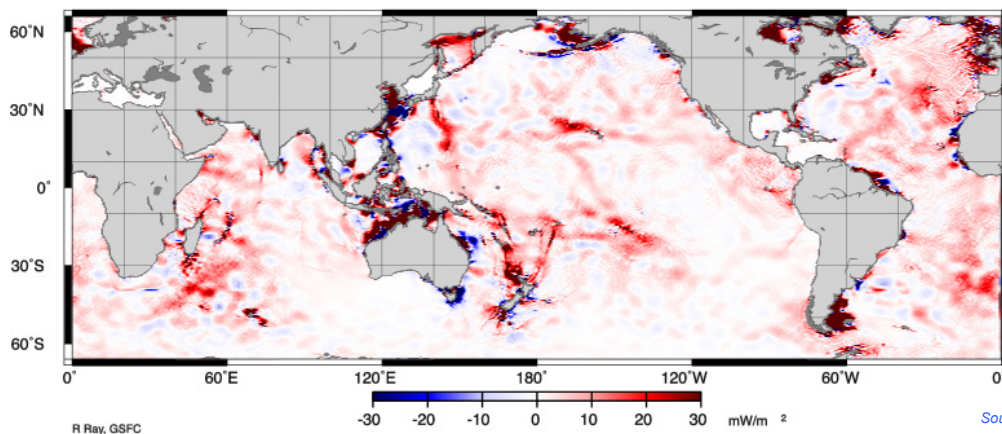
B. Multon ENS de Rennes

Quelles ressources et quels potentiels ?

2- Energie dissipée dans les phénomènes (gravitationnels) de marées

- ➡ **Courants "alternatifs"** : ressource globale 22 000 TWh
Exploitable (barrages et courants libres) : **600 + 900 TWh_e**

M2 Tidal Energy Dissipation
From balance of working and flux divergence



Source : NASA GFSC

3- Géothermie (origine : fission nucléaire, intérieur de la terre)

- ➡ **Nombreuses zones** : ressource mal évaluée en mer,
pour quelle part exploitable ?

8

B. Multon ENS de Rennes

Bilan potentiel des énergies marines renouvelables?

Références énergétiques mondiales 2014 :

Consommation primaire : $E_h = 159\,000 \text{ TWh}_p$

Production d'électricité : $E_e = 23\,800 \text{ TWh}_e$

Synthèse des ressources primaires et des potentiels (ordres de grandeurs)

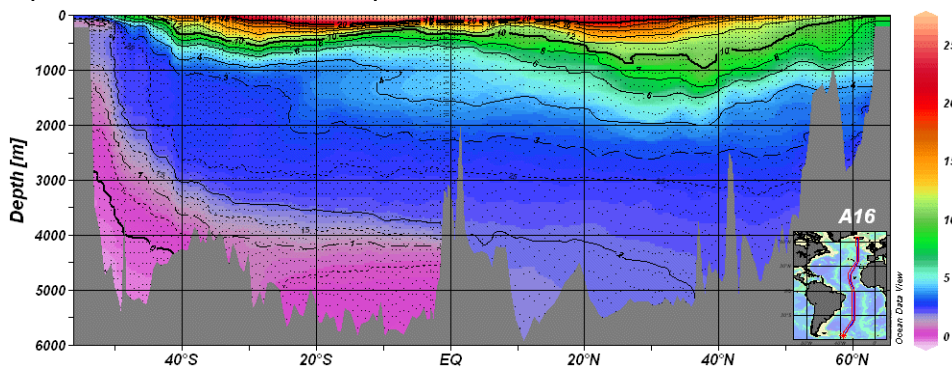
Energies annuelles en 10^3 TWh	Rayon. solaire océans	Courants océaniques thermohalins	Biomasse marine	Cycles hydrologiques			Marées	
				Eolien offshore	houle	Osmotique	Barrages	Courants
estimation globale	400 000	?	450	>> 500	80	30	22	
part primaire exploitable	4 000 (1/100 ^{ème} ?)	1 ?	4 (1/100 ^{ème} ?)	100	2	2	0,6	1,8
énergie électrique récupérable (hyp. rendement)	80 (η 2%)	0,3 ? (η 30%)	1 (η 25%)	37 (η 37%)	0,9 (η 45%)	1 (η 50%)	0,6	0,9

9

B. Multon ENS de Rennes

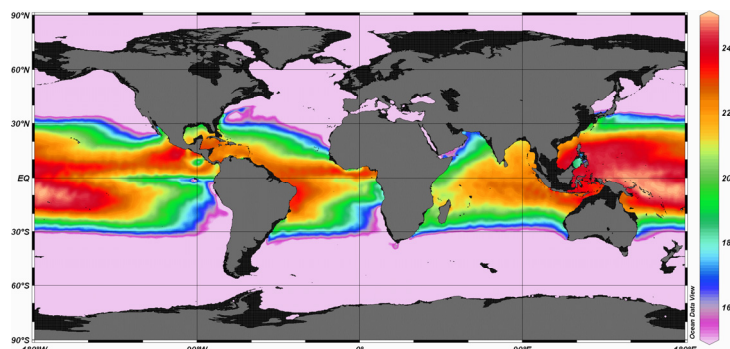
Énergie thermique des mers

Profil de température des eaux océaniques sur une section nord-sud de l'Océan Atlantique



Source : Schlitzer R., eWOCE – *Electronic Atlas of WOCE Data*, <http://www.ewoce.org/>, 2007

Différences de températures annuelles moyennes entre les profondeurs de 20 m et 1000 m (palette de 15 à 25°C)

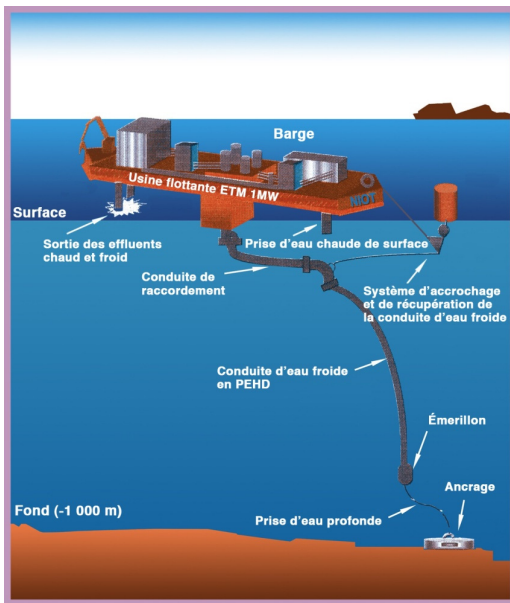


Source : Nihous G.C.,
Mapping available Ocean Thermal Energy Conversion resources
around the main Hawaiian Islands with state-of-the-art tools,
Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2010

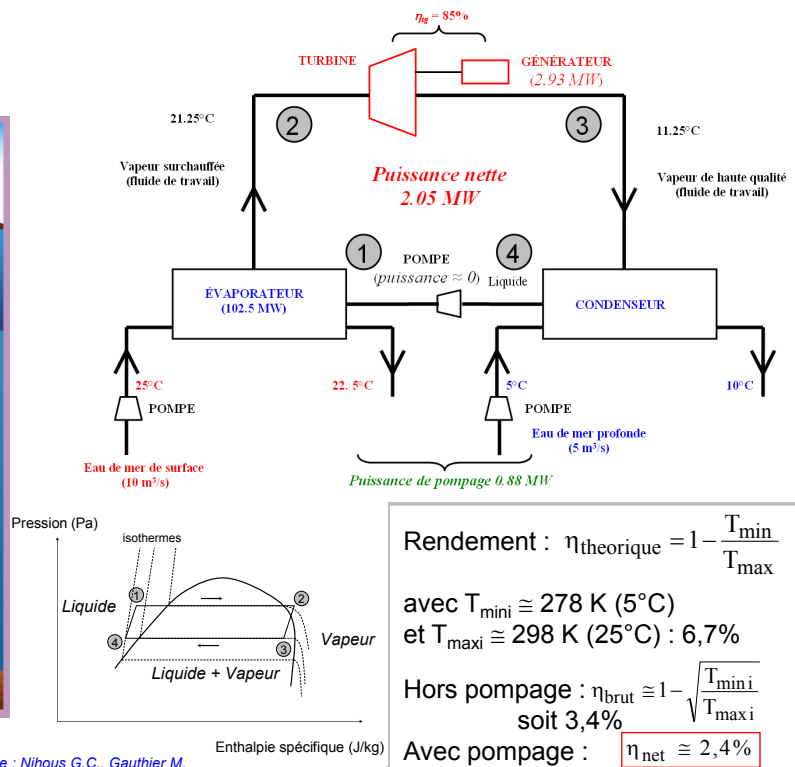
10

Récupération de l'énergie thermique des mers (OTEC Ocean Thermal Energy Conversion)

Principe



Source : Gauthier M., ECRIN 2004



Source : Nihous G.C., Gauthier M. Chapitre 2, Livre Hermès 2012

B. Multon ENS de Rennes

Exemples d'usine ETM



Hawaï : l'usine ETM la plus puissante (1993 à 1998)

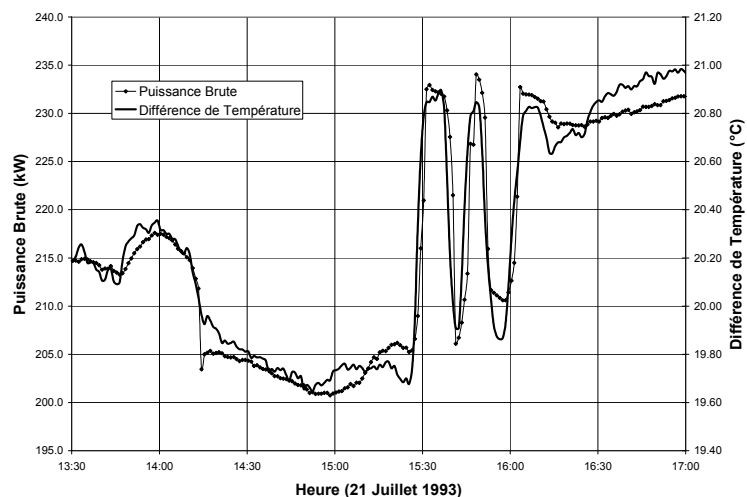
eau 26°C en surface
et 6°C (810 m de profondeur)

Puissance brute : 220 kW

Puissance nette : 100 kW_e

+ désalinisation eau de mer

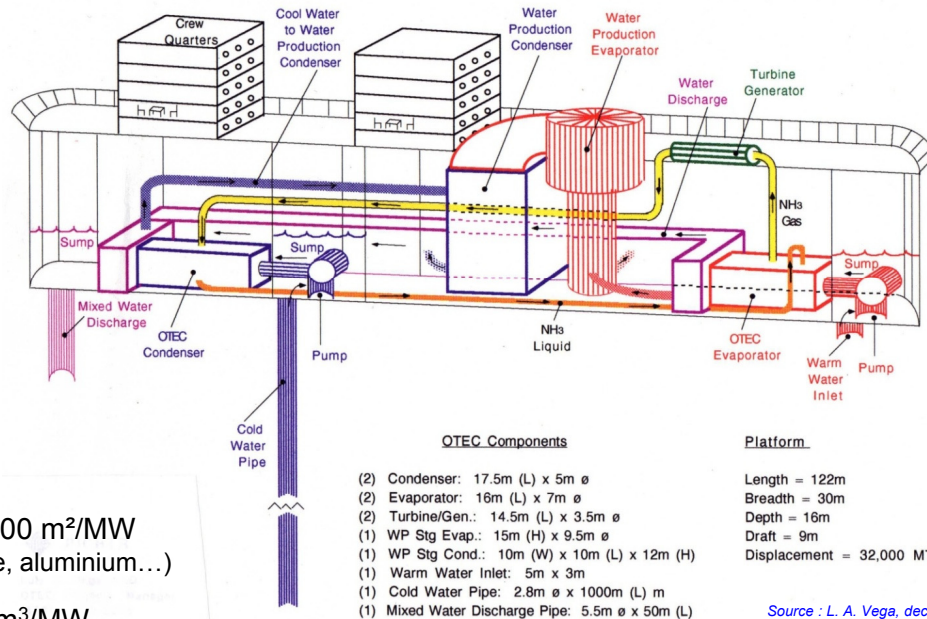
Influence des fluctuations (pourtant très faibles) de différence de température sur la puissance brute



Source : Nihous G.C., Gauthier M. Chapitre 2, Livre Hermès 2012

Exemples d'usine ETM

5 MWe OTEC Pre-Commercial Plant



Échangeurs : qq 1000 m²/MW
(coût matériaux : titane, aluminium...)

Pompage : 2 à 5 Mm³/MW

Conduite eau froide : 1,8 m² par MW_e,
(diamètre 1,5 m pour 1 MW et 15 m pour 100 MW)

Coût d'investissement élevé : 10 à 20 €/W

13

B. Multon ENS de Rennes

Énergie cinétique et puissance mécanique

Vents et courants hydrauliques :

des flux d'air (1,2 kg/m³) ou d'eau (1000 kg/m³)

à des vitesses comprises entre quelques m/s (eau) à quelques 10 m/s (air)

Energie cinétique d'un volume [S.L] à une vitesse v :

$$E_c = \frac{1}{2} M.v^2 = \frac{1}{2} \rho.[S.L].v^2$$

Puissance cinétique (dans un tube de section S) :

$$P_c = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \rho.S.v^3$$

Exemples

- **air** : 2 kW/m² avec 1,2 kg/m³ et 15 m/s
(moyenne annuelle : 400 à 600 W/m²)
- **eau** : 13 kW/m² avec 1000 kg/m³ et 3 m/s
(moyenne annuelle : 2 à 4 kW/m²)

14

B. Multon ENS de Rennes

Aérogénérateurs : évolution vers l'offshore

A terre :



Moulins
(600 av.JC,
12^{ème} siècle Europe...)



Pompage (polders)
(14^{ème} siècle Pays-Bas...)



1^{ers} aérogénérateurs
(fin 19^{ème} siècle)



Californie
(Wind rush : 1985)



Europe
Années 1990-2000

Fin 2016 : environ 473 GW installés à terre

En mer : plus de 20 ans d'expérience



Danemark Baltique
(Vindeby 1991, 11 x 450 kW)



Danemark
(Middelgrunden 2001, 20x 2 MW)



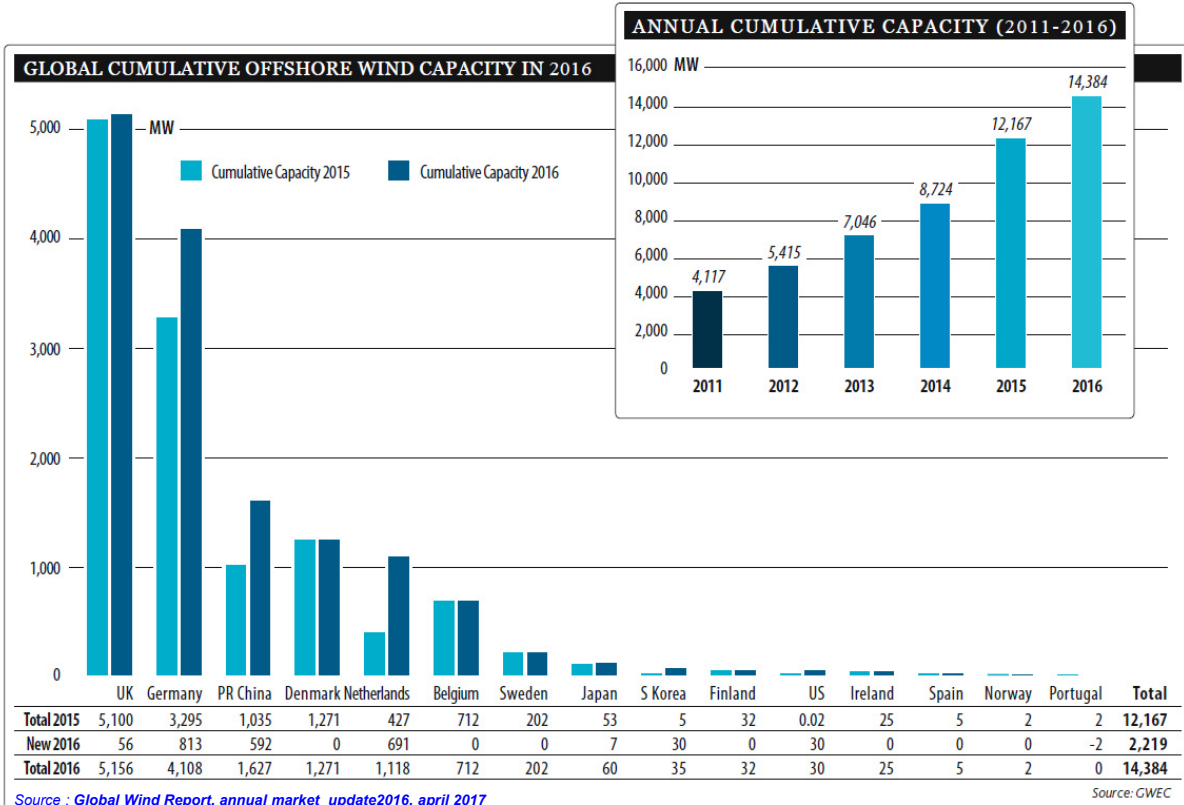
Danemark
(Nysted 2003, 72 x 2,3 MW)



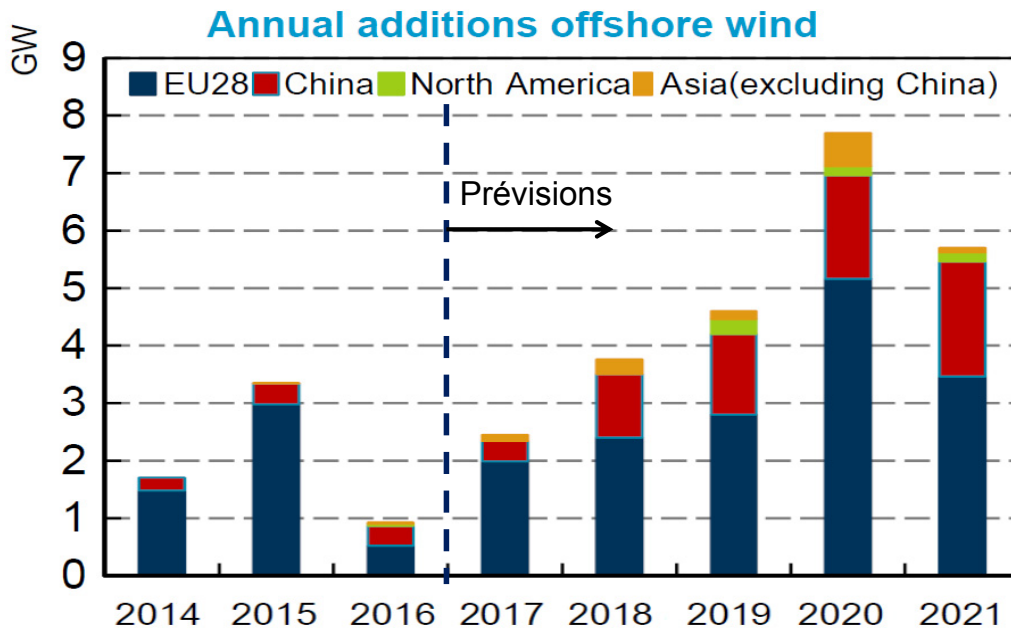
Royaume Uni
(London Array
2012, 175 x 3,6 MW)

Fin 2016 : > 14 GW installés en mer (presque tout en Europe, la Chine décolle)

Puissance installée en 2016 et cumulée



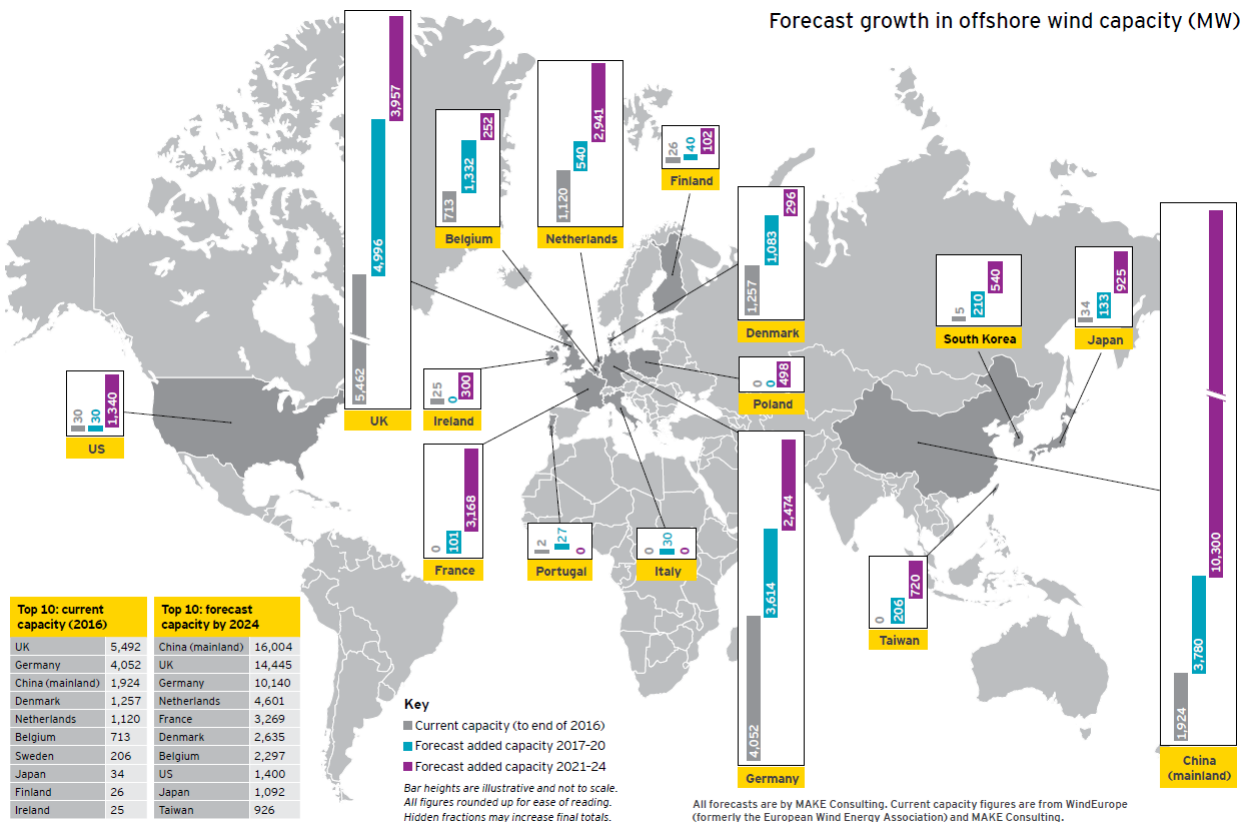
Evolution des additions de capacités éoliennes offshore



Capacité installée cumulée fin 2016 :
 environ 14,4 GW offshore (12,6 GW en Europe)
 (pour un total de 487 GW terrestre + offshore)

Source : Medium-Term Renewable Energy Market Report (MTRMR) 2016

Evolution de la production éolienne offshore



Turbines : rendement aérodynamique et limite de Betz (valable dans l'eau et dans l'air)

Puissance aérodynamique : $P = C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S_{\text{balayée}} \cdot V^3$
 (ou hydrodynamique)

Coefficient de puissance ou rendement aérodynamique



Source : www.windpower.dk

Limite de Betz :

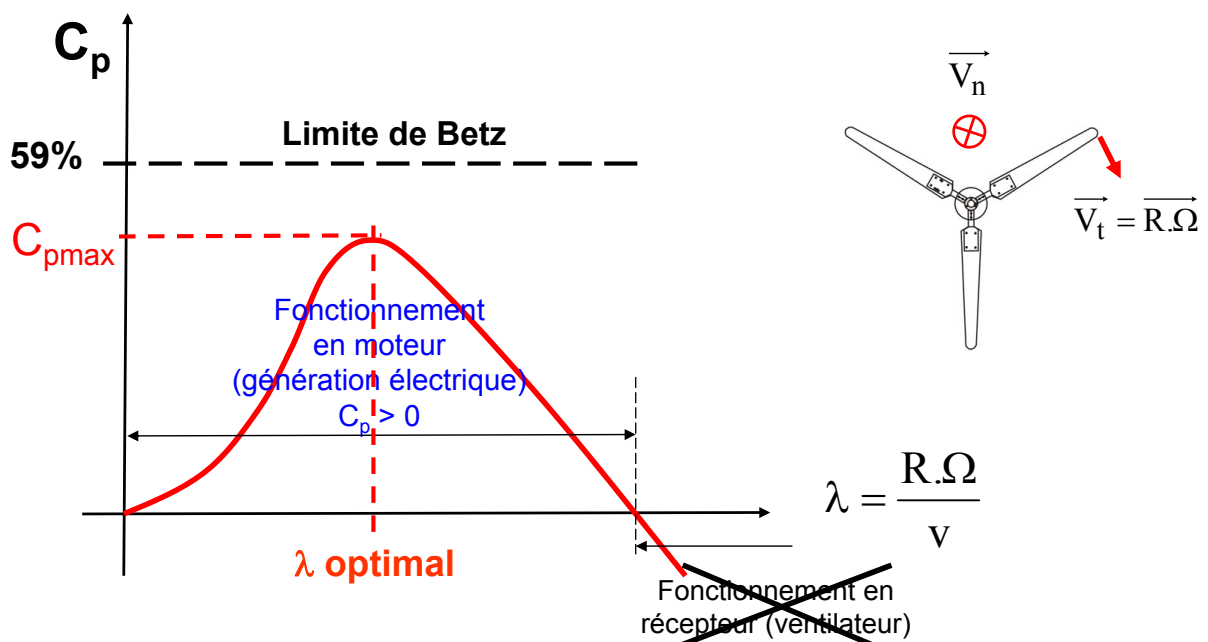
le rendement aérodynamique C_p est limité

à une valeur maximale : $16/27 = 59\%$

Il est fonction de la vitesse de rotation normalisée : $\lambda = \frac{R \cdot \Omega}{V}$
 (Tip speed ratio : TSR)

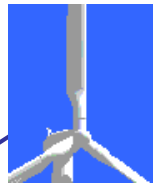
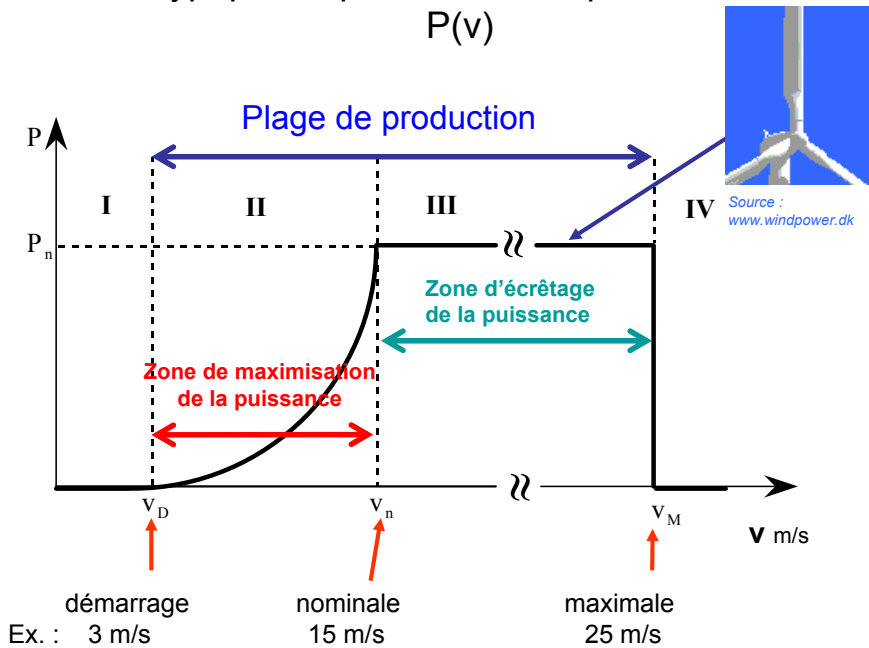
Turbines : caractéristiques fondamentales (éolien ou hydrolien)

Allure typique de la fonction $C_p(\lambda)$ d'une turbine



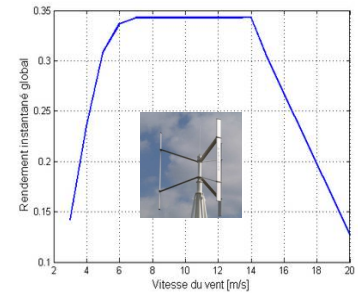
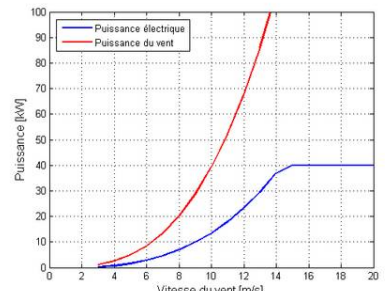
Turbines éoliennes : caractéristiques

Courbe typique de puissance récupérée $P(v)$



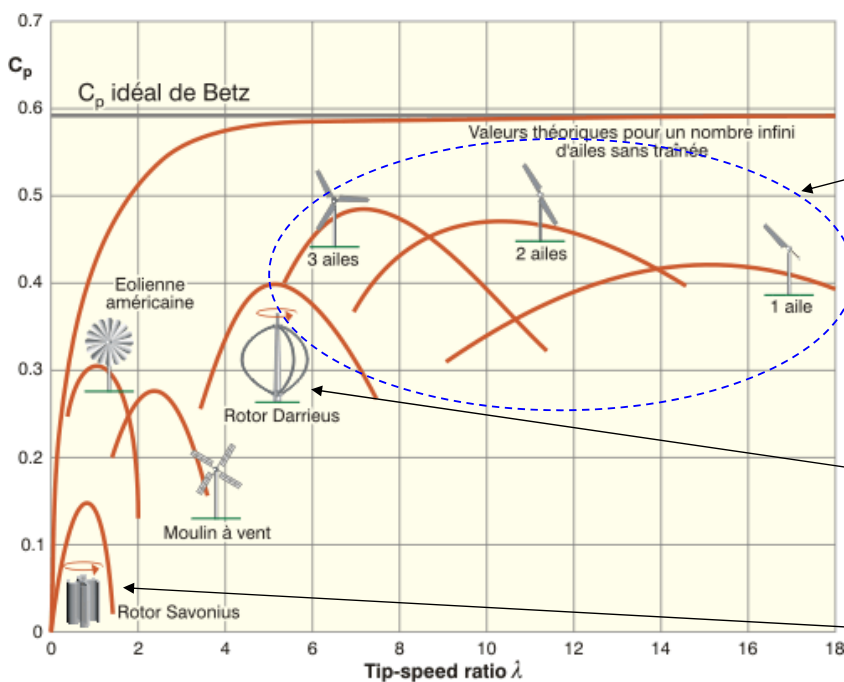
Source : www.windpower.dk

Exemple :



Source image exemple : <http://www.energieplus-lesite.be>

Turbines éoliennes : différentes technologies



Turbines à axe horizontal plus rapides, d'autant plus que le nombre de pales est faible

Rapides



Lentes

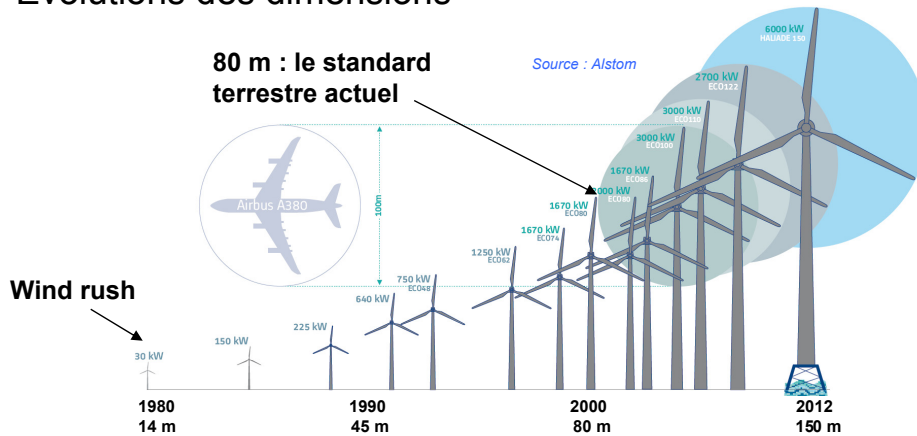


Source image : <http://www.energieplus-lesite.be>

Turbines : les évolutions en puissance

Évolutions des dimensions

(WTG = Wind Turbine Generators)



Alstom Haliade
150 m – 6 à 10 MW
(1^{er} proto. mars 2012)



Source : Alstom

et même 180 m - 15 MW
en projet...

Éoliennes en mer (depuis 1991) : 7,1 GW installés fin 2013

Structures fixes :
Fonds à moins
de 50 m



Source : www.dongenergy.com

Des contraintes de
fiabilité drastiques
pour minimiser les
coûts de maintenance

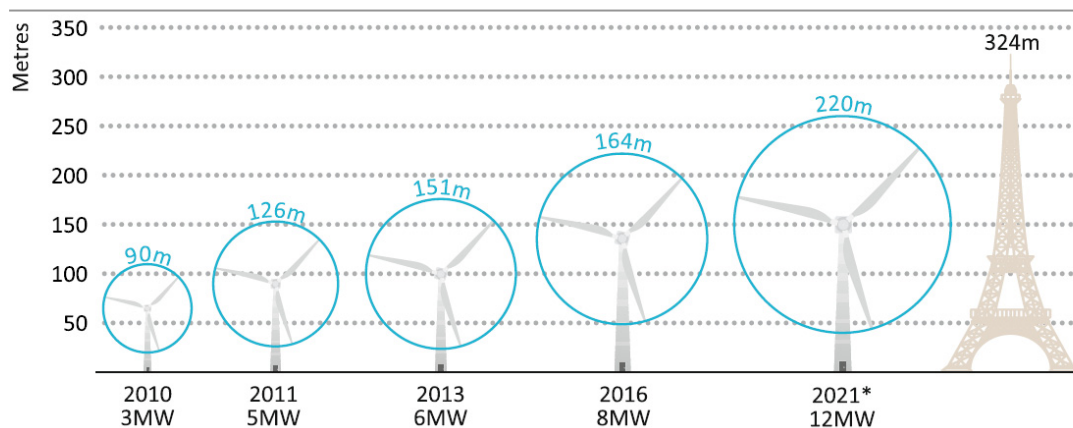


B. Multon ENS de Rennes

23

Turbines : les évolutions en puissance

Evolution of the largest commercially available wind turbines



With fewer restrictions on size and height than their onshore counterparts, offshore turbines are becoming giants – a key factor behind anticipated lower generation costs

* Announced expected year of commercial deployment.

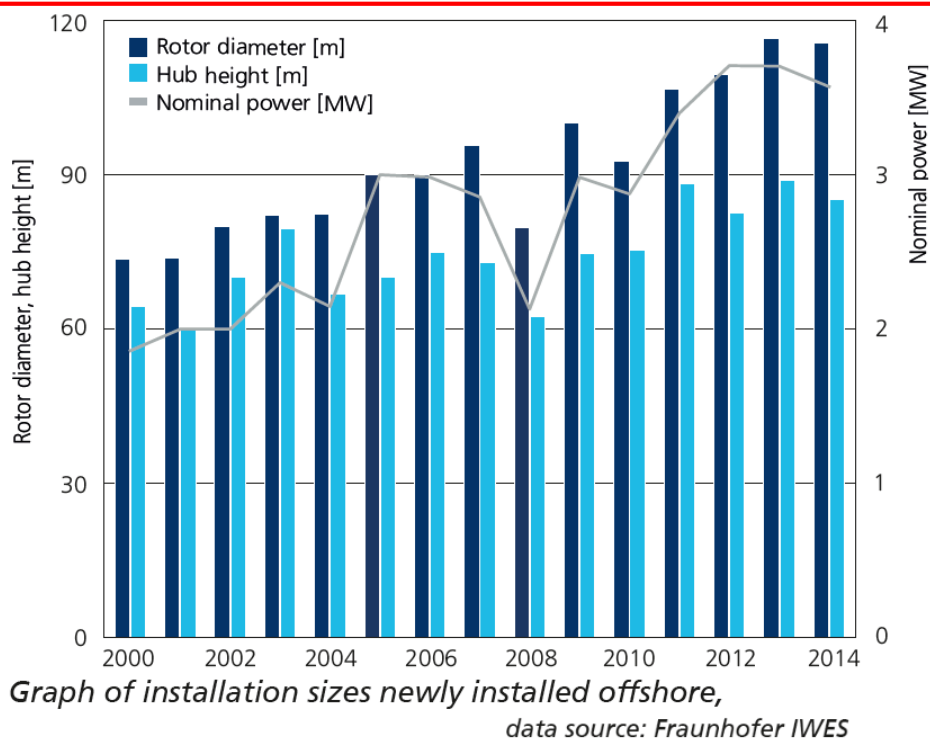
Note: Illustration is drawn to scale. Figures in blue indicate the diameter of the swept area.

Source : IEA Offshore Energy Outlook 2018

24

B. Multon ENS de Rennes

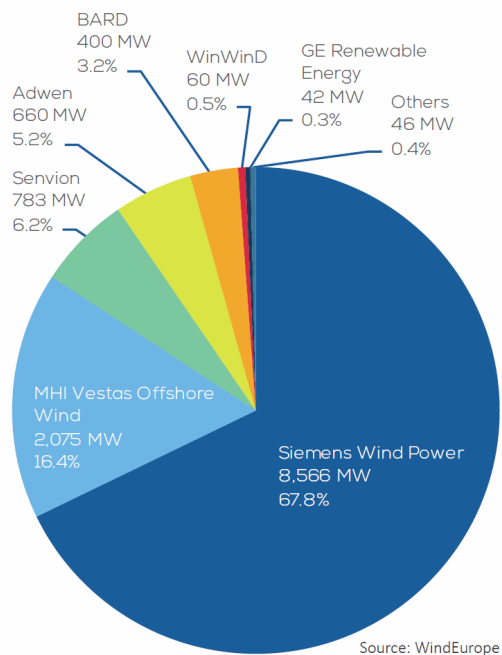
Turbines : les évolutions en puissance, diamètre et hauteur du moyeu



Source : Wind Energy Report 2014, Fraunhofer IWES

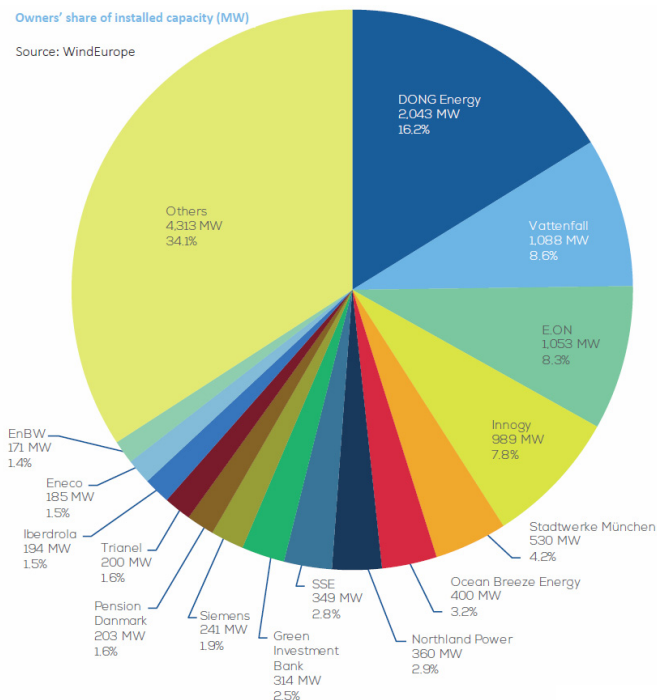
Répartition du marché européen cumulé fin 2016

Fabricants de machines (en % de la puissance totale)

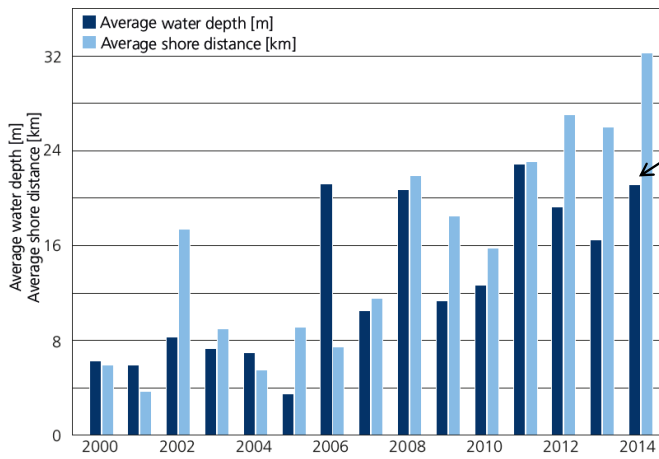


Source : Wind Europe, The European offshore wind industry – key trends and statistics 2016, feb. 2017

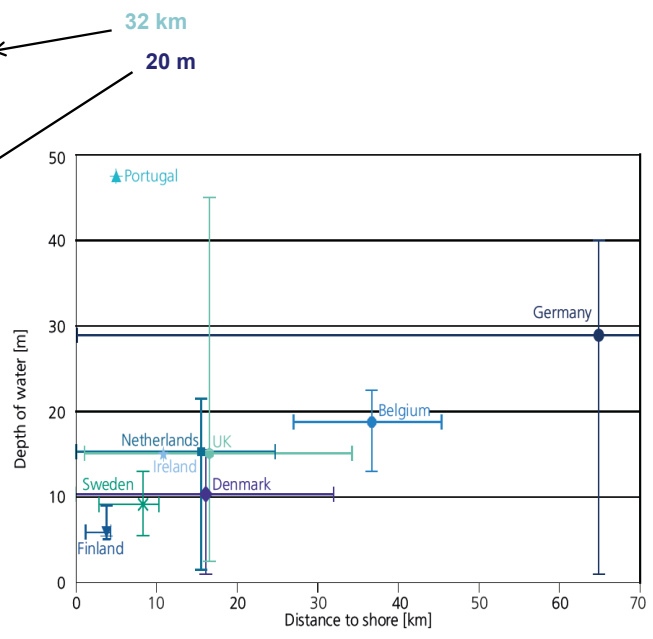
Exploitants de parcs (en % de la puissance totale)



Des profondeurs et des distances à la côte toujours plus grandes



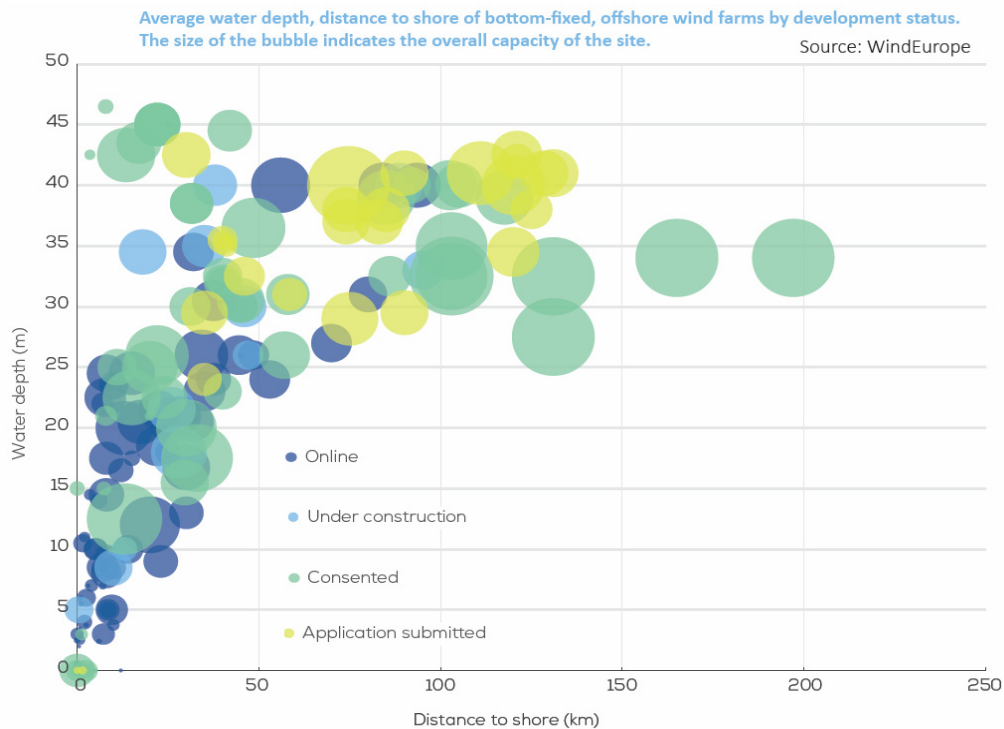
Graph of average distance to shore and water depth of newly installed offshore wind turbines, data source: Fraunhofer IWES



Water depth and distance to coast of European offshore wind farms by country (without floating test installations in Norway), data source: Fraunhofer IWES

Source : Wind Energy Report 2014, Fraunhofer IWES

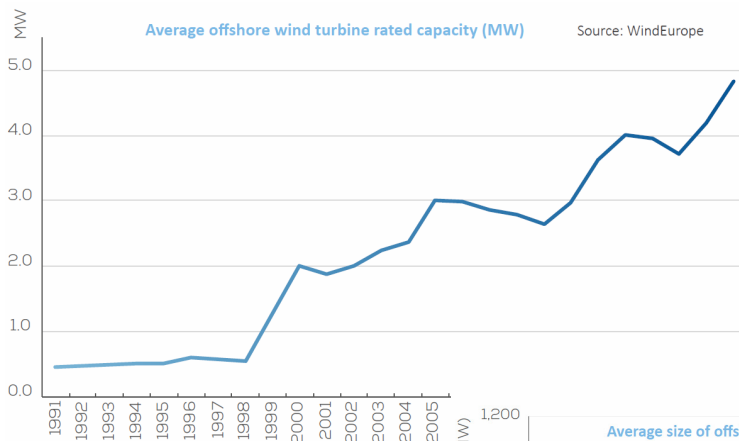
Des profondeurs et des distances à la côte toujours plus grandes (bilan fin 2016)



Source : Wind Europe, The European offshore wind industry – key trends and statistics 2016, feb. 2017

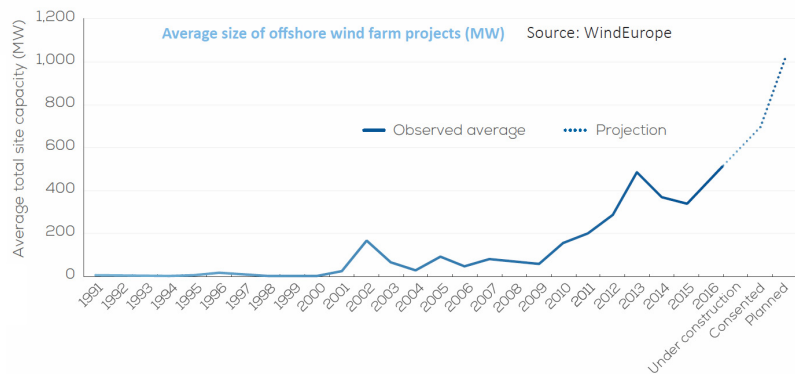
Evolution de la valeur moyenne des puissances

Puissances moyennes unitaires des éoliennes



Source : Wind Europe, The European offshore wind industry – key trends and statistics 2016, feb. 2017

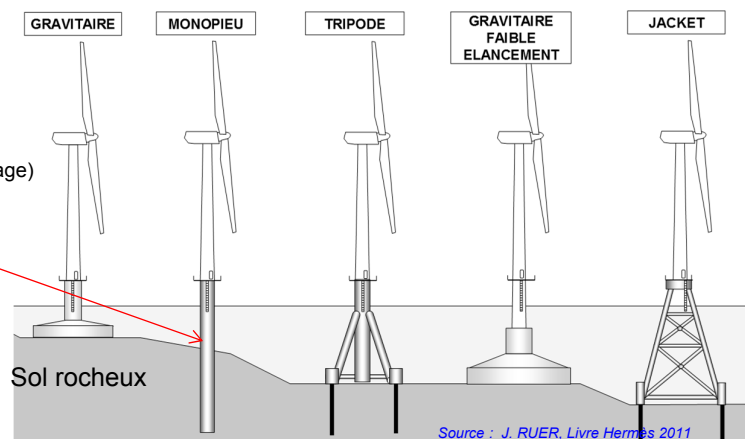
Puissance moyenne des fermes



Structures porteuses pour éoliennes offshore

Machines posées, structures :

Solution la plus courante (sol sédiments ou forage)



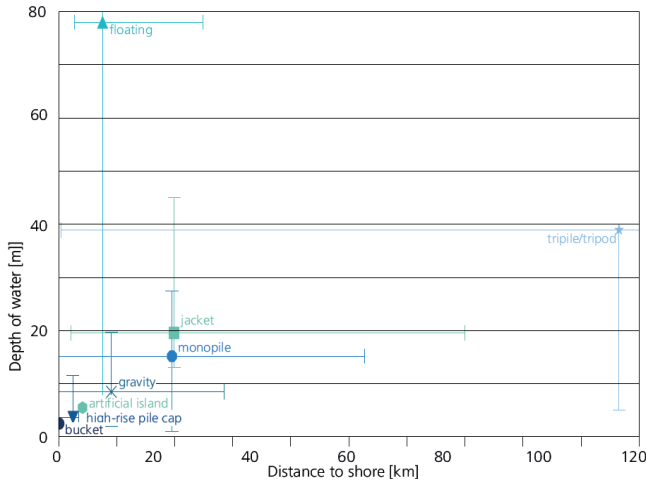
Pour une machine de **5 MW**, profondeur de **25 m** d'eau :
 Monopieu de **6 m** de diamètre enfoncé de **40 m** dans le sol
 Épaisseur paroi : **65 mm** au niveau du sol
 Masse du monopieu : **450 tonnes**

Exemples :

Projet	Scroby Sands (UK)	C-Power (B)	Alpha Ventus (D)	Beatrice (UK)
Eolienne	2MW	5MW	5MW	5MW
Profondeur d'eau	10m	27m	30m	50m
Type de structure support	Monopieu diamètre : 4m	Embase béton conique	Tripode	Jacket
Masse structure support	210t acier	2400 t béton	700 t acier – 3 fiches de 100t	750t acier + 4 fiches de 115t

Source : J. RUER, Chap. 5 Livre Hermès 2011

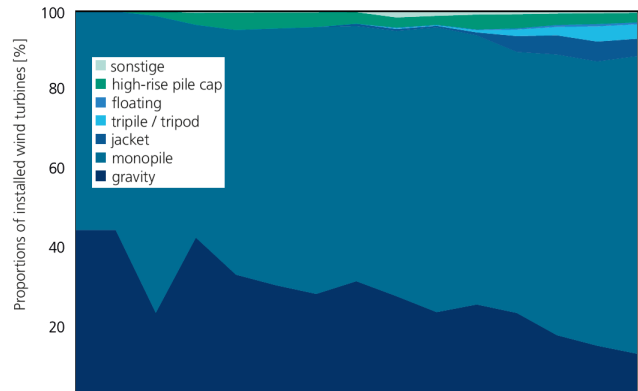
Fondations : relation avec la profondeur, évolutions



Water depths and distances to coast by foundation structure, data source: Fraunhofer IWES

Source : Wind Energy Report 2014, Fraunhofer IWES

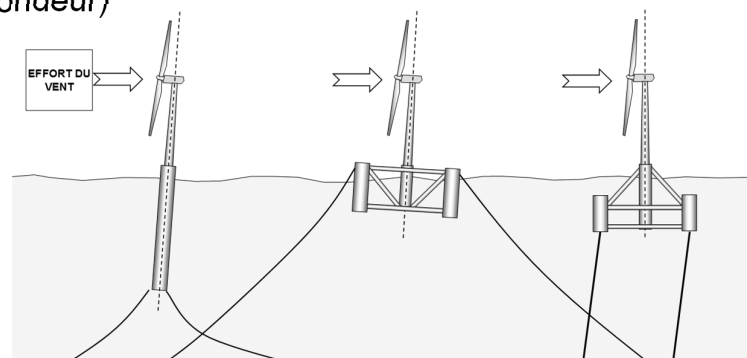
De 2000 à 2014 : une forte domination de la technologie monopile



Graph of foundation structures used for offshore installations data source: Fraunhofer IWES

Évolution des technologies offshore

Quelques configurations de **structures flottantes** (possible jusqu'à 800 m de profondeur)



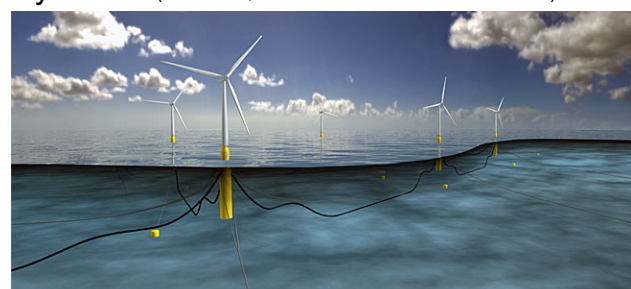
Source : J. RUER, Chap. 5 Livre Hermès 2011

Hywind (2,3 MW, StatoilHydro 2009)



Source : <http://www.statoil.com>

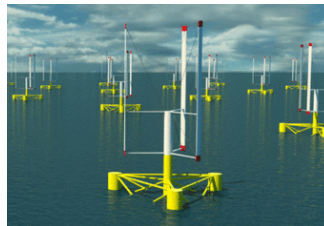
Hywind 2 (5 x 6 MW, Ecosse mise en service en 2017)



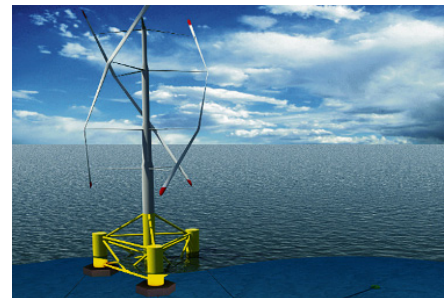
Technologies offshore flottantes

Vertiwind/Inflow (2010 Technip, Alstom, EDF, Nenuphar...),

retour des turbines à axe vertical ?



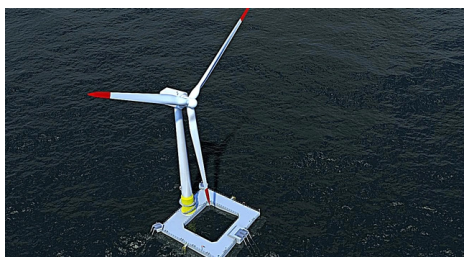
Source : Technip



Source : Inflow

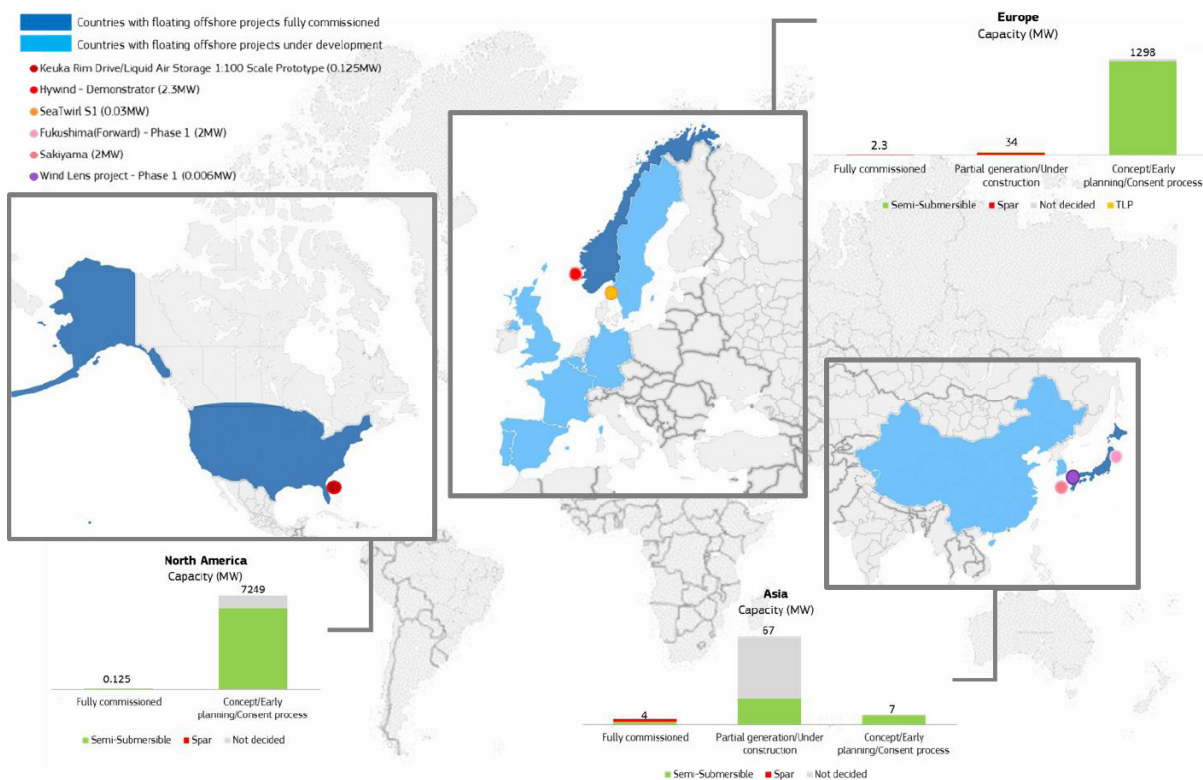
FloatGen (2013 Gamesa, Ideol...), une structure porteuse en anneaux, amortissant naturellement les mouvements du flotteur.

Test 2 MW prévu sur site SEMREV



Source : Floatgen

Projet d'éoliennes offshore flottantes dans le monde



Source : JRC Wind Energy Status Report 2016, march 2017

Exemple de ferme éolienne offshore « posée »

London Array : 1^{ère} phase (déc. 2012) 630 MW (875 MW à terme)
175 éoliennes Siemens SWT-3.6-120 sur monopieux
 sur 100 km², distance à la côte : 20 km,
 profondeur maxi : 25 m
 dimensionnement pour 20 ans



DONG Energy 50% - E-On 30% - Masdar 20%
 Productivité annuelle : 2500 h => 1,6 TWh

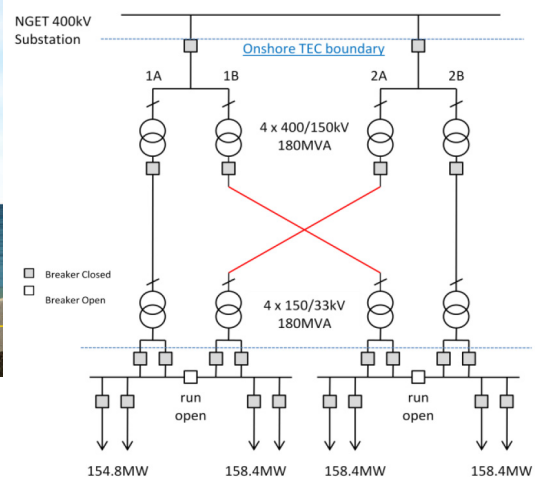
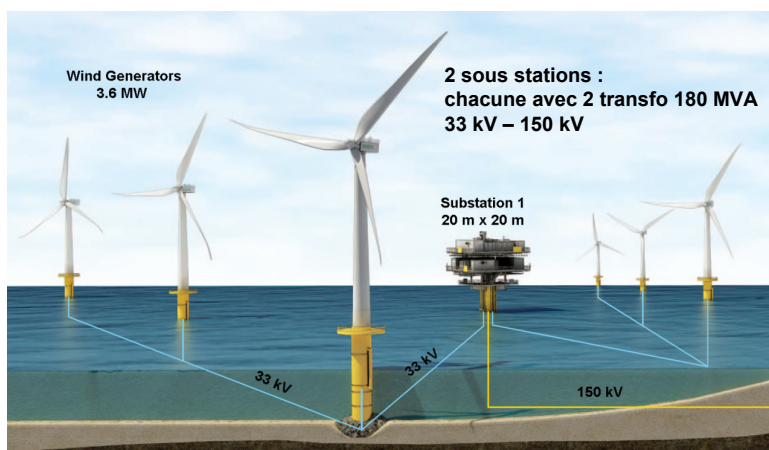
Turbines 120 m - 5 à 13 tr/min
 Génératrice asynchrone à cage
 Multiplicateur à 3 étages (1:119)

35

B. Multon ENS de Rennes

Exemple de ferme éolienne offshore

London array



Câbles Nexans (33 kV et 150 kV) : 220 km
 Entre les 2 sous-stations le site de raccordement à terre :
 4 câbles triphasés 54 km 630 mm² 150 kV

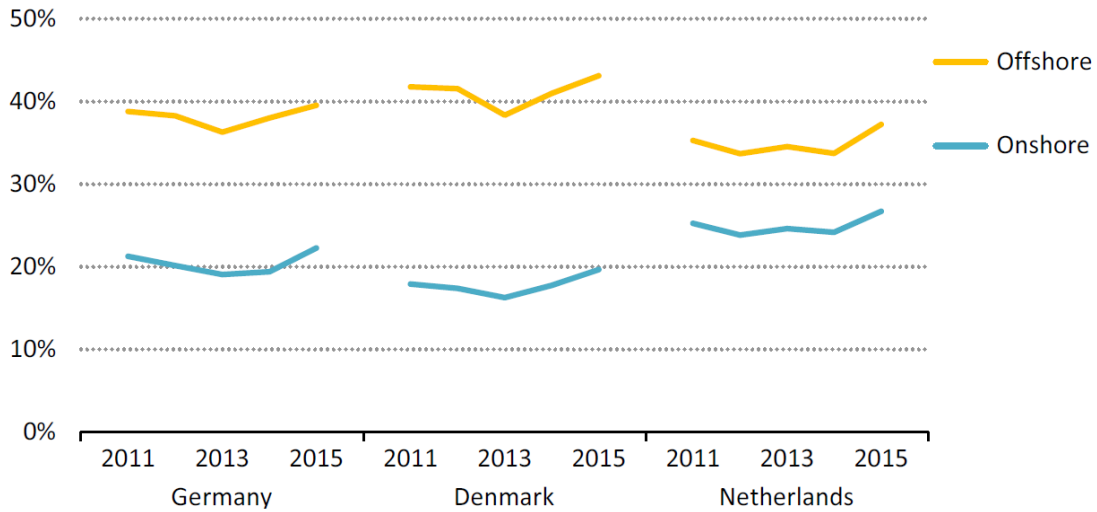
A terre : 4 transfo 180 MVA – 150 kV – 400 kV,
 compensateur statique de puissance réactive + filtres harmoniques

36

B. Multon ENS de Rennes

Evolution du facteur de charge en Europe

Offshore and onshore wind capacity factors in Germany, Denmark and Netherlands



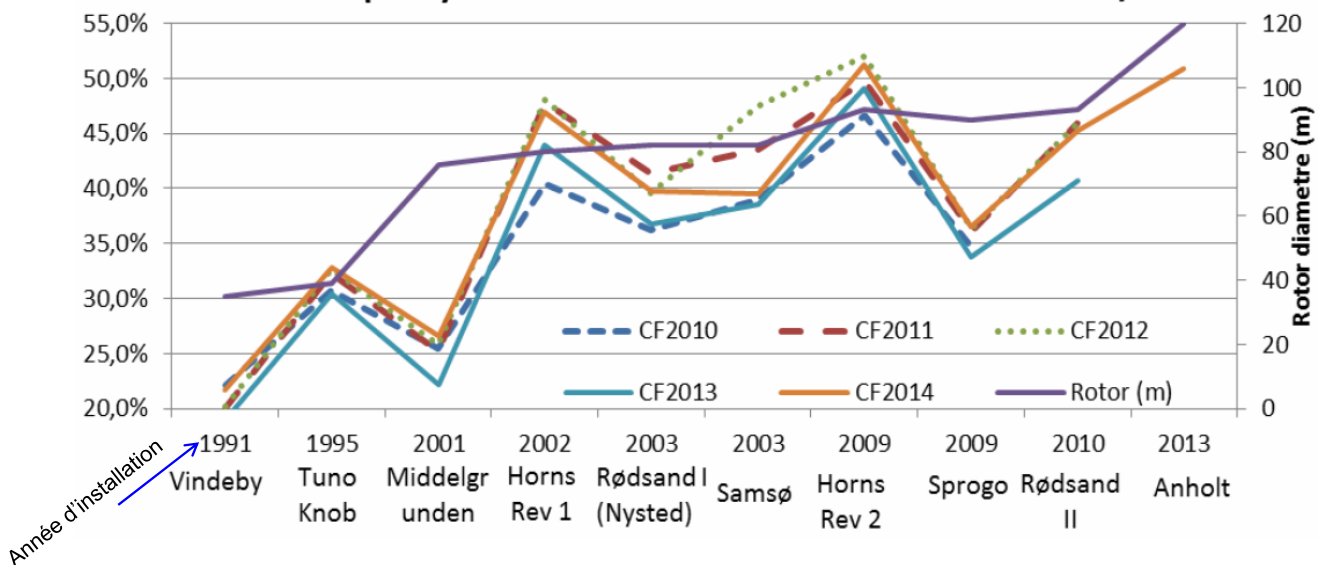
Access to higher and more consistent wind speeds give offshore wind the edge over its onshore equivalent, easing integration challenges

Sources: Gonzalez et al (2016); IEA analysis.

Source : IEA Offshore Energy Outlook 2018

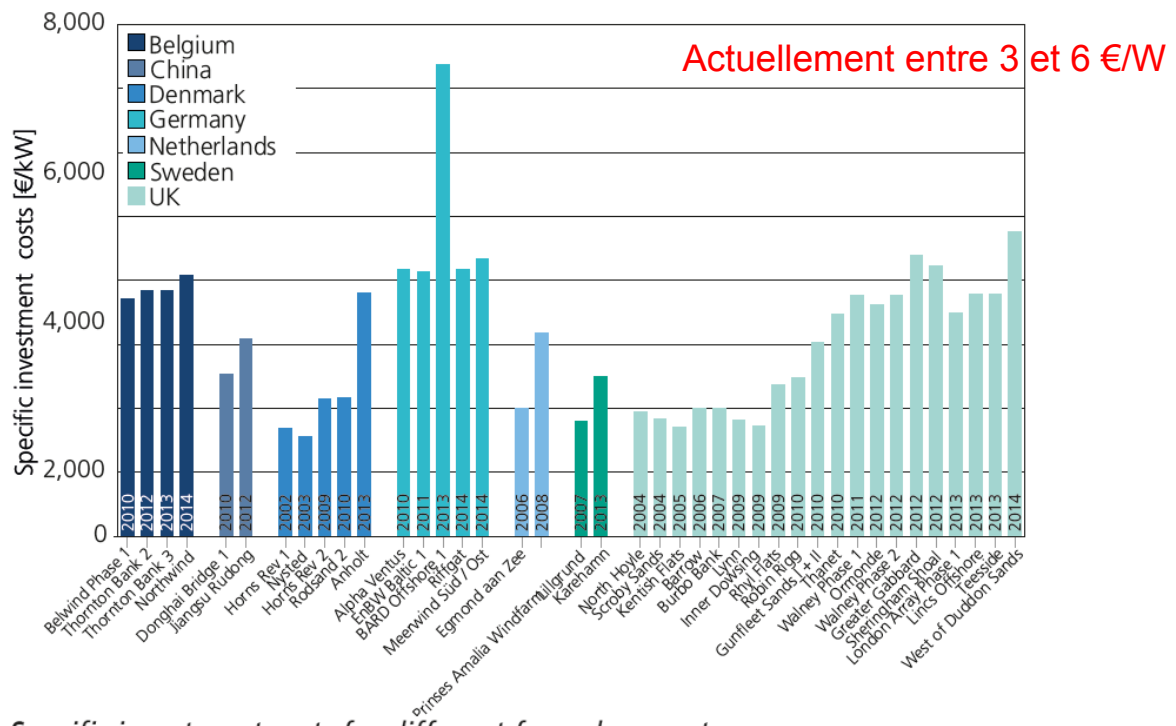
Evolution du facteur de charge de fermes offshore danoises

Capacity factors of Danish offshore wind farms 2010/14



Source : 2014 Wind Status Report, JRC (2015)

Coûts d'investissement : une tendance à la hausse

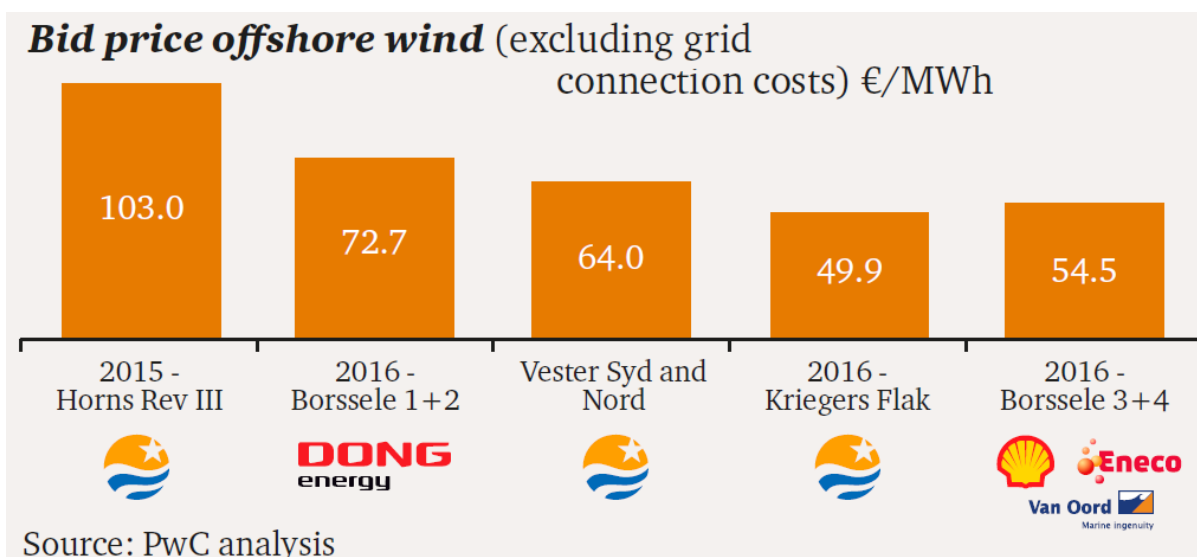


Specific investment costs for different farms by country with a minimum nominal capacity of 45 MW, data sources: varied public communication from operators and investors, summarized by Fraunhofer IWES

Source : Wind Energy Report 2014, Fraunhofer IWES

Mais des coûts de production qui commencent enfin à diminuer

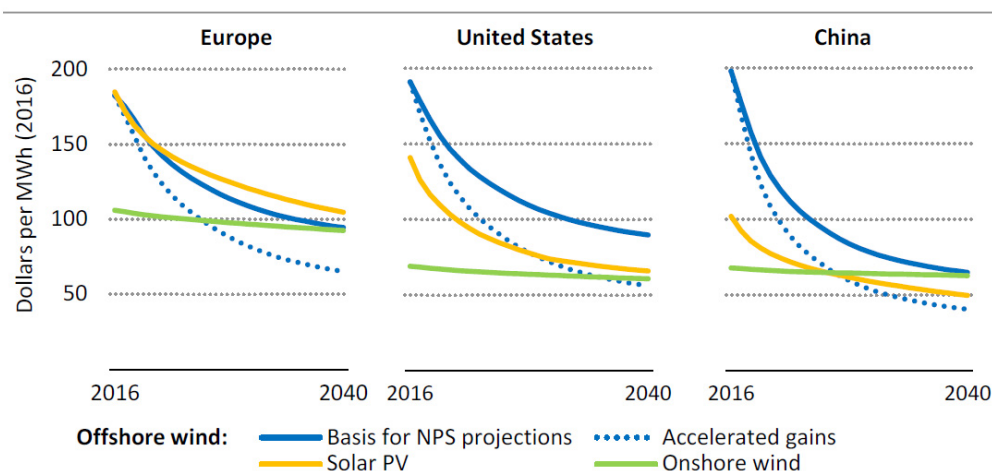
Prix de vente résultants d'appels d'offre : désormais sous la barre des **60 €/MWh** (hors coûts de connexion)



Source : Unlocking Europe's Offshore Wind Potential PwC march 2017

Mais des coûts de production qui commencent enfin à diminuer

Projected LCOEs of offshore wind, onshore wind and solar PV by region in the New Policies Scenario



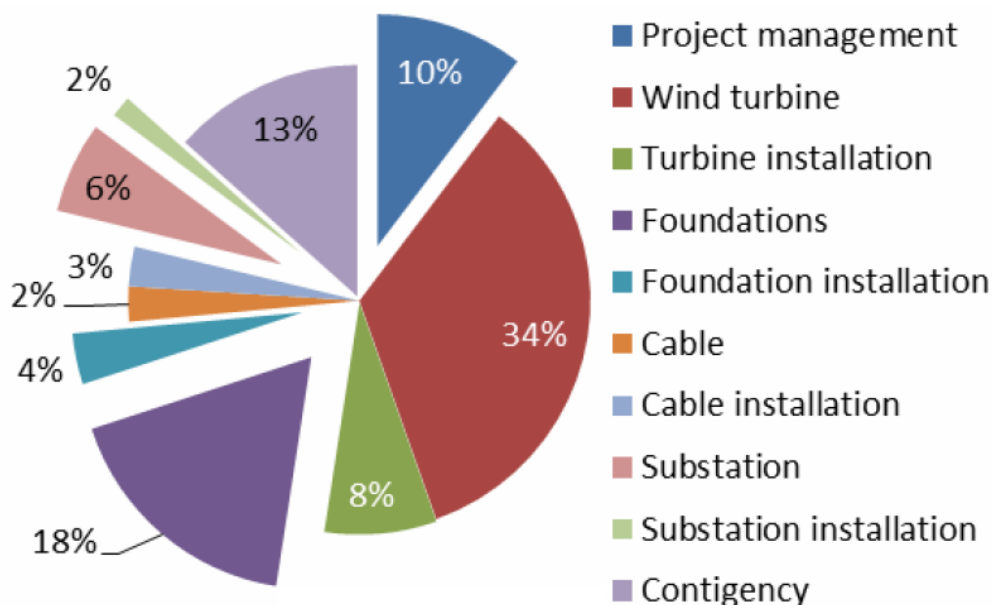
Although relatively expensive to date, falling costs for offshore wind are set to change its competitiveness among renewables, as well as with fossil fuels and nuclear power

Note: All technologies are evaluated based on the same WACC: 8% in real terms in Europe and the United States, and 7% in real terms in China.

Source : IEA Offshore Energy Outlook 2018!

Répartition des coûts d'investissement des fermes offshore

Répartition typique des coûts en Allemagne :

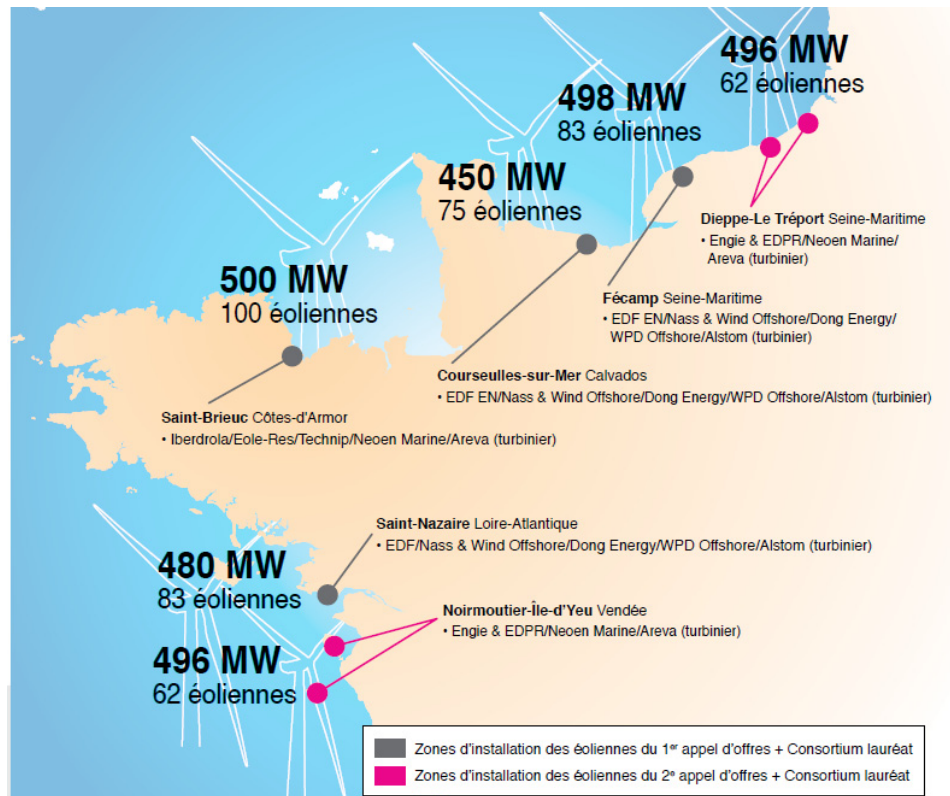


Source : 2014 Wind Status Report, JRC (2015)

Parcs éoliens offshore français prévus

Zones de développement éolien offshore définies lors des appels d'offre

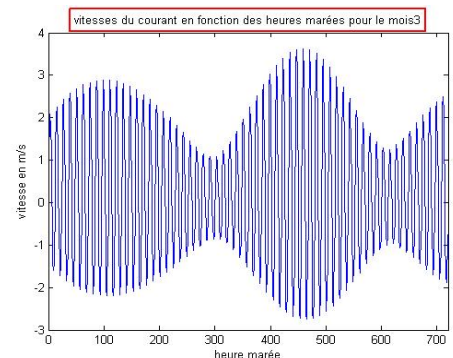
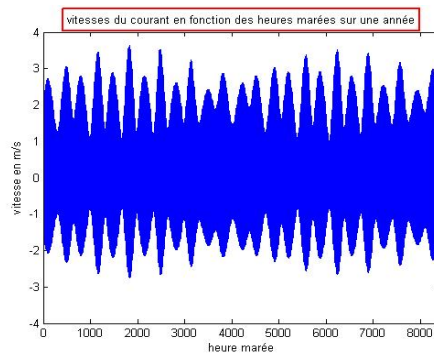
Près de 3 GW prévus
Mais 0 en service



Source : Baromètre 2015 des énergies renouvelables électriques en France, Obser'ER

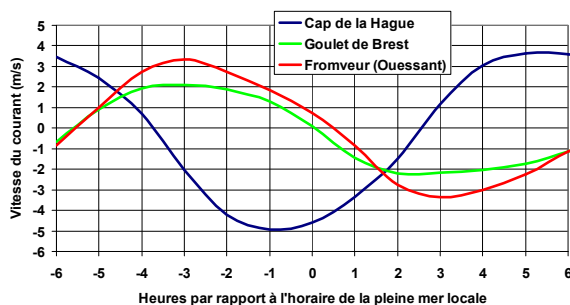
Récupération des courants de marée

Les courants de marée
(Raz de Sein)

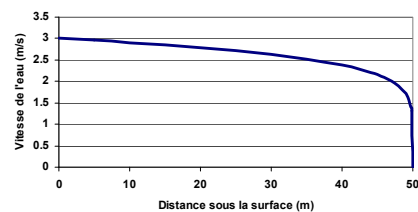


Source : Benbouzid et al. Concepts, Modélisation et Commandes des Hydroliennes, in Energies marines renouvelables, aspects généraux, éolien, marémoteur et hydrolien, Chap. 8 livre Hermès 2011.

Décalages temporels entre sites distants :



Effet de la profondeur :

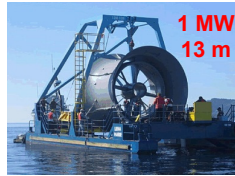


Source : J.F. Daviau, et al. "Divers aspects de l'exploitation de l'énergie des courants marins", Seatech Week Conf. Brest, oct. 2004.

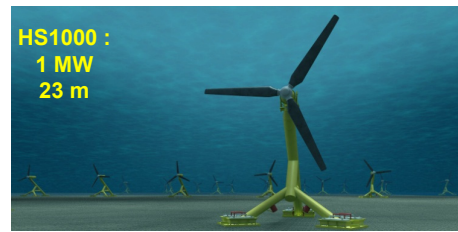
Turbines hydroliennes

Turbines : mêmes principes que les éoliennes :

- à axe horizontal



Source : Clean Current / Alstom Hydro



Source : Hammerfest Strøm

- à axe vertical



Turbine GORLOV



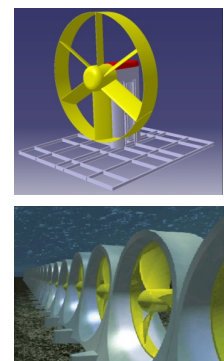
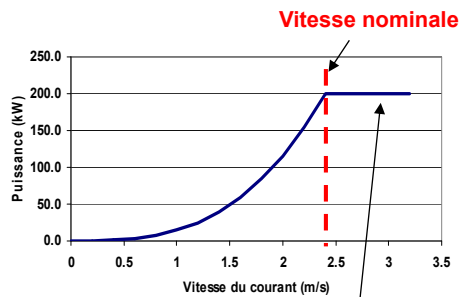
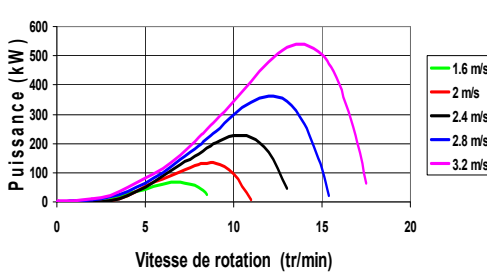
Turbine HARVEST (LEGI)

Particularités :

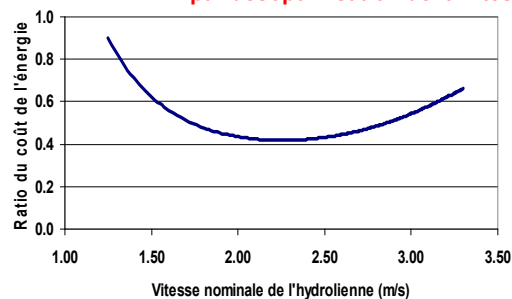
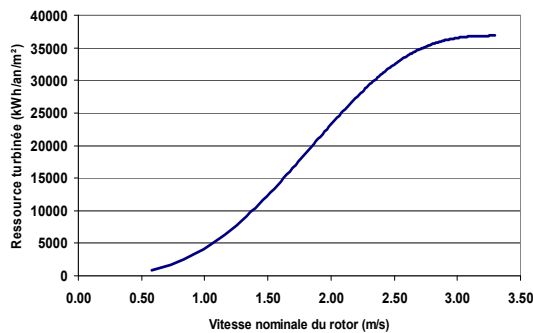
- moins de contraintes sur l'orientation face au courant
=> système d'orientation pas obligatoire
- des vitesses de courant plus faibles de valeurs bien délimitées
=> moins de contraintes d'écrêtage de la puissance
- des limites dues à la cavitation
=> vitesse périphérique plus faible qu'en éolien (10 m/s)

Hydroliennes : optimisation du dimensionnement

Optimisation économique : écrêtage de la puissance



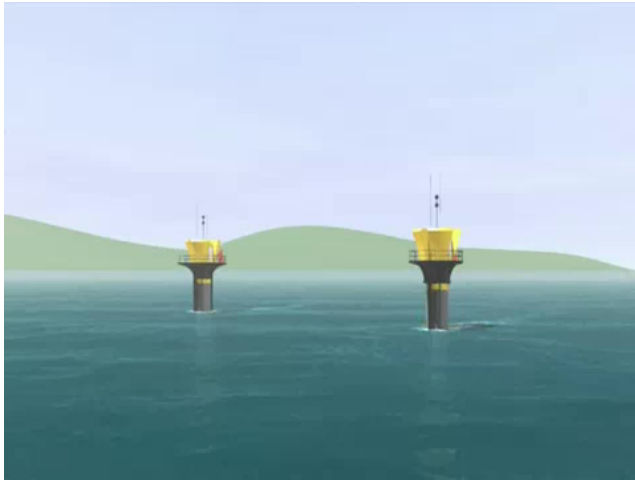
Écrêtage possible par pas variable ou par désoptimisation de la vitesse de rotation



Source : J.F. Daviau, et al. "Divers aspects de l'exploitation de l'énergie des courants marins", Seatech Week Conf. Brest, oct. 2004.

Hydroliennes : exemples européens

Seaflow project (Marine Current Turbines Ltd UK)



Source : SEAGEN <http://www.seageneration.co.uk/>

Turbines jumelles sur piles de diamètre 3 à 4 m
 Puissance : **2 * 600 kW** (total 1,2 MW)
 Diamètre : 16 m, Vitesse : 10 à 20 tours/min
 En service depuis nov. 2008 : Narrows Strangford (Irlande)

France :

Sabella



Source : Sabella

Sabella 10 (1MW à 3,7 m/s) : Ouessant 2015

Paimpol-Bréhat (EDF)



Source : EDF

4 machines OpenHydro OCT-16
 (850 kW ou 500 kW)
 1ère machine posée oct. 2011
 Mise en service de 2 machines en 2016

Installation de Paimpol Bréhat

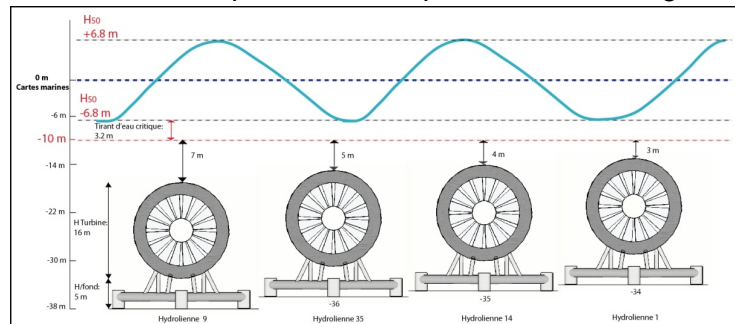
4 machines OpenHydro OCT-16 (16 m de diamètre) de 850 kW à 2,9 m/s (12 tr/min)
 (2 MW possibles)

Machine à Brest en sept. 2011:



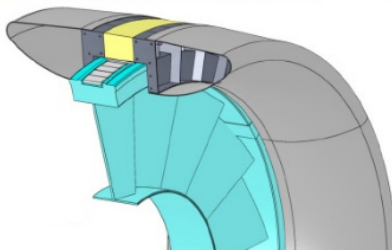
Source : DCNS

Profondeur d'implantation compte tenu du marnage

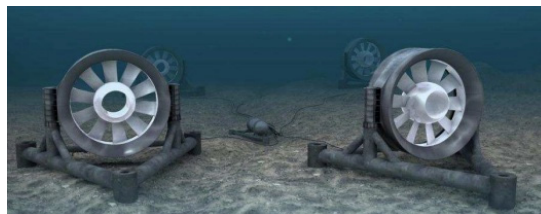


Source : P. BRUN, L. TERME, A. BARILLIER (EDF), Chap. 9 Livre Hermès 2011

Génératrice à aimants multipolaire 288 pôles
 diamètre rotor 13,6 m – entrefer 10 mm



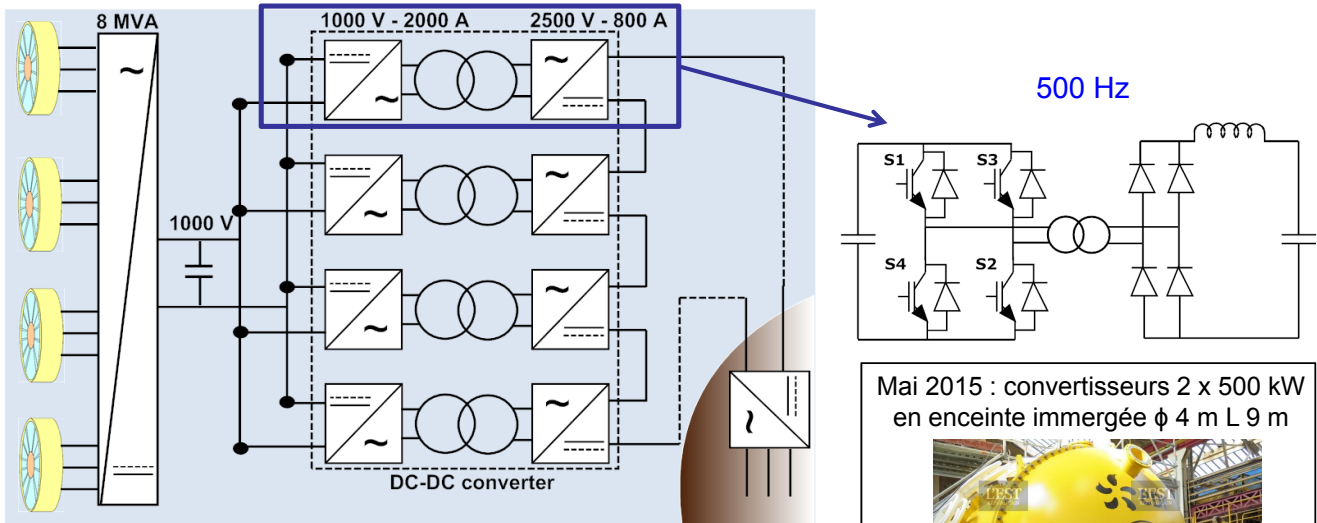
Source : Openhydro



Par machine : H 20 m - envergure 25 x 27 m
 masse totale \approx 900 tonnes dont 450 t de ballast,
 venturi externe ϕ_{ext} 16 m et L 7 m
 ogive creuse centrale ϕ_{ext} 6 m $\phi_{orifice}$ 3 m

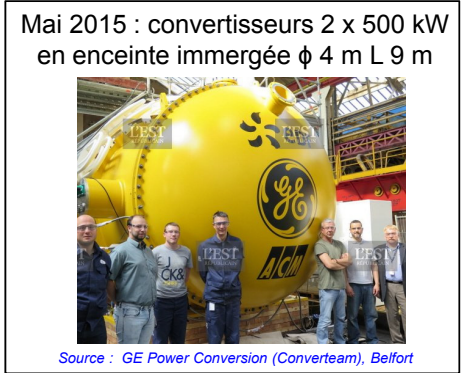
Installation de Paimpol Bréhat

4 ensembles machines (690 V maxi) - convertisseurs AC-DC 1 kV à vitesse variable
+ convertisseur DC-DC élévateur 1 kV -> 10 kV :



Source : P. MONJEAN, L2EP, 2012

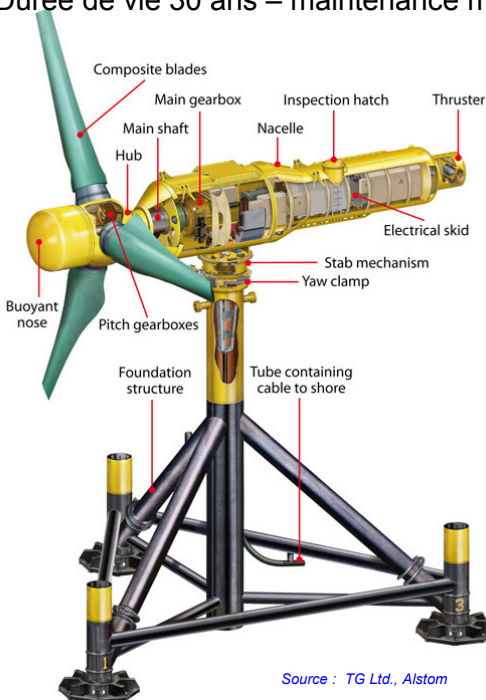
+ liaison DC 10 kV 15 km
+ poste de livraison à terre 20 kV-50 Hz



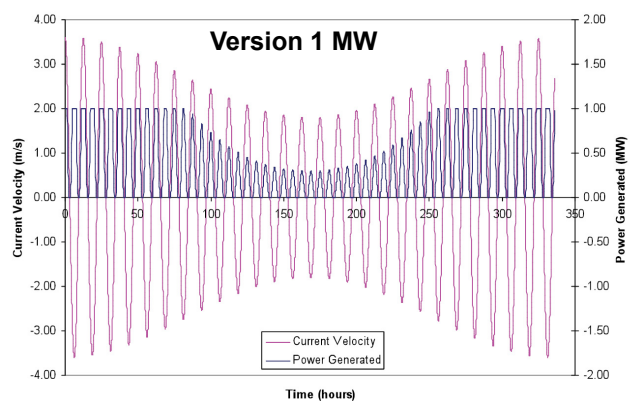
B. Multon ENS de Rennes

Technologie Alstom OCEADE 18 (ex. Tidal Generation Ltd., rachat par Alstom en 2012)

Technologie proche des éoliennes à multiplicateur et système pitch
1,4 MW (1^{ers} tests 2012 @ 1 MW) : pour profondeur 25 à 80 m
D 18 m - L 22 m – 150 tonnes - 14 tr/min à 2,7 m/s – générateur à induction à vitesse variable
Durée de vie 30 ans – maintenance mineure tous les 2 ans, remontée de la turbine en surface



Source : TG Ltd., Alstom



Usines marémotrices : exploitation de l'énergie potentielle

Des « barrages à marée » : peu de sites favorables et peu de réalisations

Pays	Centrale	Turbines	Puissance totale	Production annuelle	Année de mise en service	Surface du bassin	Marnage moyen
France	La Rance	24 groupes bulbe (10 MW)	240 MW	540 GWh	1967	22 km ²	8,5 m
Canada	Annapolis	1 groupe Straflo (20 MW)	20 MW	50 GWh	1984	15 km ²	6,4 m
Chine	Jiangxia	5 groupes bulbe (1 x 500 kW, 1 x 600 kW et 3 x 700 kW)	3,2 MW	11 GWh	1980	1,4 km ²	5 m
Russie	Kislogubskaya (Kislaya Guba)	1 groupe bulbe (400 kW) + 1 turbine « orthogonale » (1,5 MW)	1,9 MW	NC	1968/2007	1,1 km ²	2,3 m
Corée du Sud	Sihwa	10 groupes bulbe (25,4 MW)	254 MW	550 GWh (estimation)	2011	43 km ²	5,6 m

Source : V. DELALEU (EDF), Chap. 9 Livre Hermès 2011

Groupes bulbes réversibles :

470 tonnes

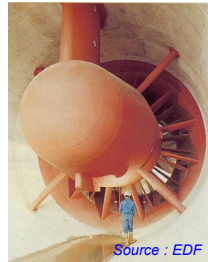
débit : 275 m³/s - chute nominale : 5,65 m

vitesse de rotation : 93,75 tr/min (64 pôles)

Pn : 10 MW

4 pales avec inclinaison de - 5° à + 35

survitesse maximale : 260 tr/mn



Source : EDF

Usine de la Rance (1966)

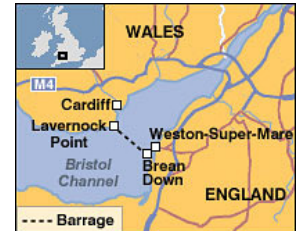
Source : Conseil Régional Bretagne



Autres projets de barrage d'estuaire qui ne verront peut-être jamais le jour (oppositions, impact environnemental, investissement).

Estuaire de la **Severn** (canal de Bristol) :

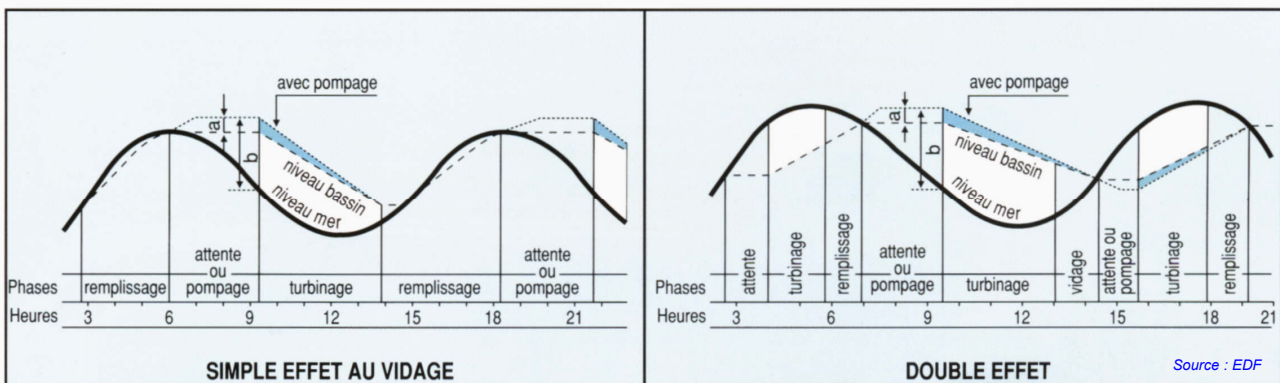
8 000 MW (17 TWh, eq. 2200 h) – 29 G€



B. Multon ENS de Rennes

51

Usine de la Rance : 2 cycles de fonctionnement



Source : EDF

Simple effet : aux marées de faible et moyenne amplitude

- **marée montante**, vannes ouvertes, l'estuaire se remplit avec un très léger décalage en suivant le niveau de la mer ;
- à marée haute atteinte, les vannes sont fermées et les groupes fonctionnent en pompage pour élever le niveau de l'eau dans l'estuaire (par exemple de 2 m)
- **marée descendante**, lorsque le niveau de la mer atteint environ sa valeur moyenne, les groupes sont enclenchés en turbinage et la production s'effectue avec un bon dénivelé jusqu'à ce que la mer soit remontée au voisinage de son niveau moyen.

L'énergie dépensée lors du pompage est ainsi restituée avec un facteur 2 grâce à l'augmentation de la hauteur de chute.

Double effet : aux fortes marées (coefficients supérieurs à 105, environ 20% des marées à Saint Malo)

- durant la **marée montante** et même un peu au-delà, l'eau est turbinée et produit de l'électricité ;
- puis les groupes sont arrêtés, les vannes sont ouvertes pour accélérer le remplissage du bassin jusqu'au moment où le niveau de la mer atteint sa valeur moyenne ;
- **marée descendante** : on revient au fonctionnement du cycle à simple effet.

Dans le cycle à double effet, le niveau d'eau dans le bassin varie quasi-sinusoïdalement avec un déphasage d'un quart de période par rapport à celui de la mer et sa valeur maximale reste inférieure à celle en mer.

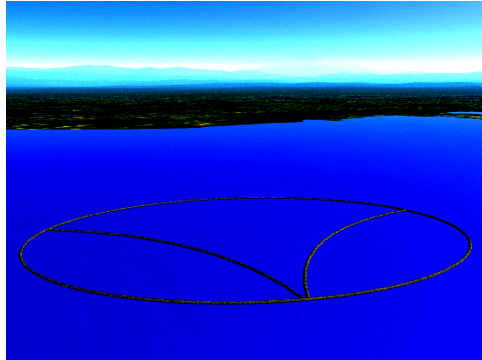
52

Source : V. DELALEU (EDF), Chap. 9 Livre Hermès 2011

B. Multon ENS de Rennes

Usines marémotrices à lagons artificiels

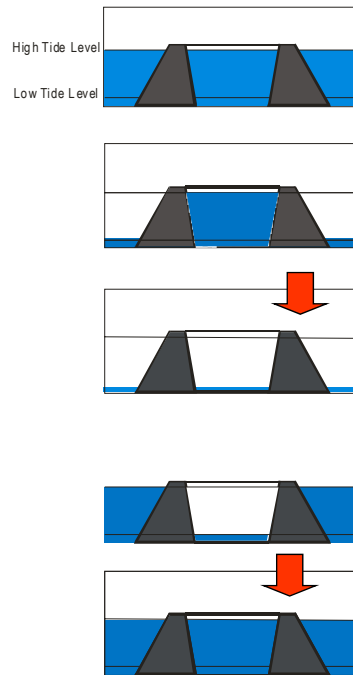
À l'état de projet
Intérêt : moins d'impact environnemental



Projet : Site de Swansea Bay
(Pays de Galles)
30 MW 5 km²

Source : Tidal Electric Ltd (UK)
www.tidalelectric.com

Cycle de génération de puissance

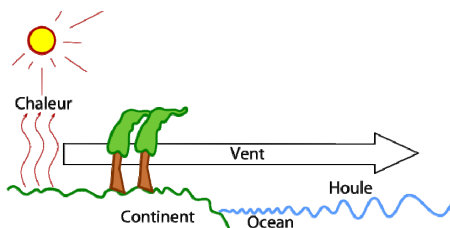


53

B. Multon ENS de Rennes

Houlogénération : caractérisation de la houle

Ondes de houle : des ondes de gravité, lentes (quelques secondes)
avec des amplitudes allant jusqu'à quelques mètres



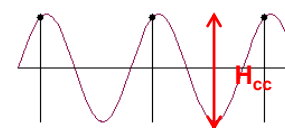
Source : J. Aubry, doctorat 2011



Densité d'énergie d'une colonne d'eau de section
avec une variation de hauteur H_{cc} :

$$\frac{E}{S} = \frac{1}{8} \rho \cdot g \cdot H_{cc}^2$$

J/m^2



Source : Penn State Univ.
http://phys23p.si.psu.edu/phys_anim/waves/indexer_waves.html

$\rho > 1000 \text{ kg/m}^3$ et $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Puissance cinétique (onde parfaite sinusoïdale) ramenée à la surface de colonne :
2,4 kW/m² avec 1000 kg/m^3 et $H_{cc} = 4 \text{ m}$ et $T = 8 \text{ s}$ (moyennes annuelles : 500 W à 2 kW/m²)

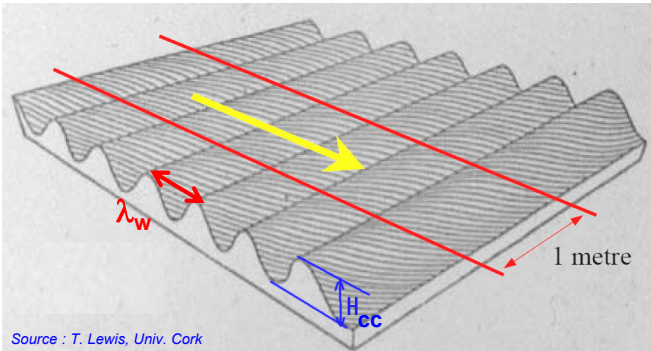
54

B. Multon ENS de Rennes

Houlogénération : caractérisation de la houle

Puissance incidente **ramenée à la longueur de front de vague**

Cas d'une houle unidirectionnelle et monochromatique (H crête à creux, T période) :



Densité linéique de puissance :

$$P_w = \frac{\rho \cdot g}{8} \cdot H_{cc}^2 \times \frac{g}{4 \cdot \pi} \cdot T$$

W/m Densité d'énergie surfacique **J/m²** Vitesse de groupe en eaux profondes (> $\lambda_w/2$) **m/s**

Ondes de gravité, longueur d'onde : $\lambda_w = \frac{g}{2 \cdot \pi} \cdot T^2$ (si T = 8 s : $\lambda_w = 100$ m)

Vitesse de phase (Célérité) : $c_w = \frac{g}{2 \cdot \pi} \cdot T$

Vitesse de groupe (énergie) : $c_g = \frac{c_w}{2}$ (si T = 8 s : $c_g = 6$ m/s)

$$P_w \cong \frac{\rho \cdot g^2}{32 \cdot \pi} \cdot H_{cc}^2 \cdot T$$

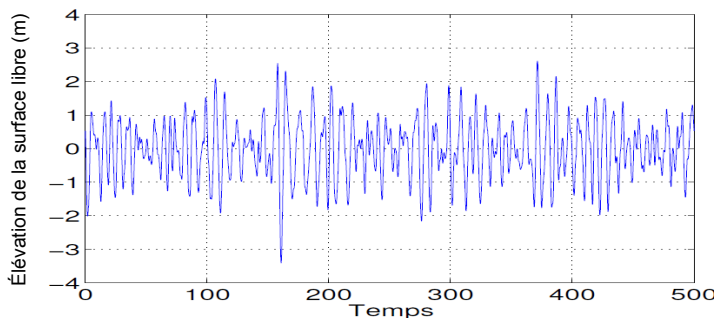
Un « **état de mer** » (stationnaire) est caractérisé par H_{cc} et T

Sa puissance est d'autant plus élevée

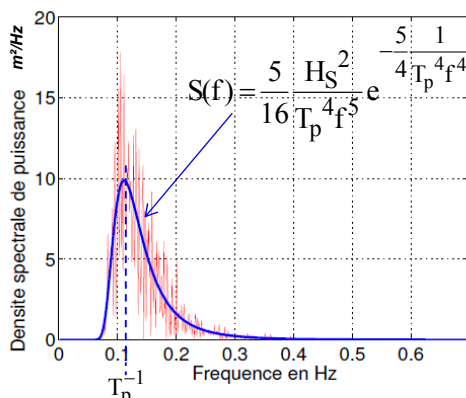
que sa hauteur crête à creux et que sa période sont grandes.

Houlogénération : caractérisation de la houle

En réalité, la houle est polychromatique et aléatoire :



Modélisation d'un état de mer par spectre de Pierson-Moskowitz



H_s et T_p caractérisent l'état de mer

Avec : H_s = hauteur (crête à creux) significative

T_p = période pic

Ce qui donne l'expression suivante de la puissance

par mètre de

front de vague :

$$P_w \cong 0,42 \cdot \frac{\rho \cdot g^2}{32 \cdot \pi} \cdot H_s^2 \cdot T_p$$

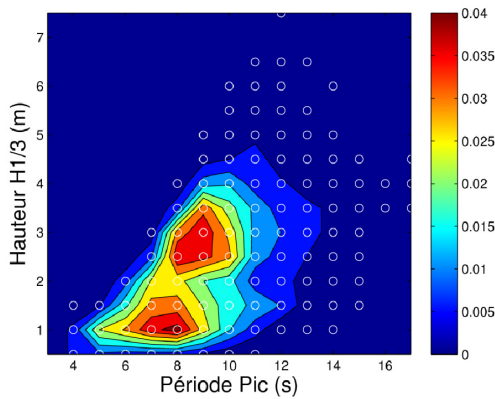
Houlogénération : caractérisation de la houle

Exemple d'états de mer et de la puissance associée :

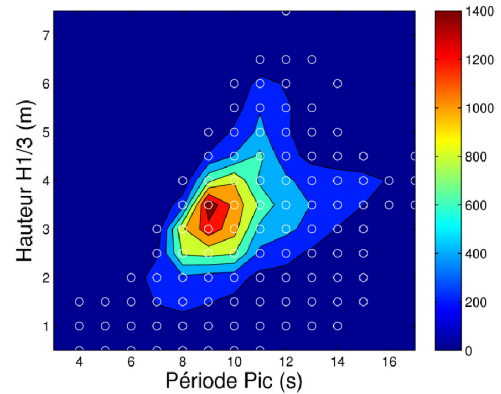
Echelle de Beaufort	4	5	6	8
H_s (m)	1	2	3	5.5
T_p (s)	6	8	10	14
P_w (kW/m)	2,5	13	37	170

Caractérisation de la ressource (exemple Ile d'Yeu sur 1 an, $H_{1/3} \cong H_s$)

($H_{1/3}$ = moyenne des hauteurs crête à creux du tiers des plus fortes vagues)



Probabilité d'occurrence des états de mer



Puissance linéique moyenne annuelle des état de mer

(en W/m, à multiplier par 8760 h pour avoir des Wh/m/an)

Source : J. Aubry, doctorat 2011

57

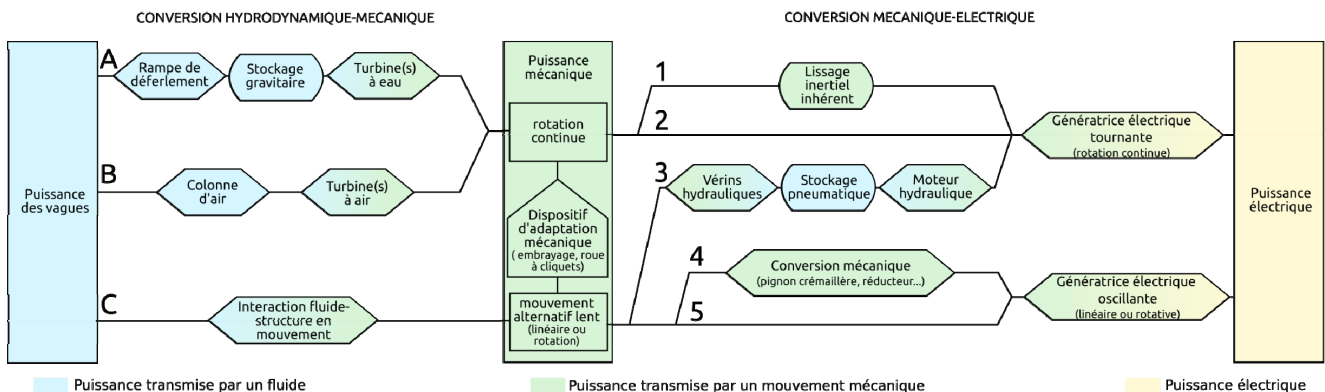
B. Multon ENS de Rennes

Houlogénérateurs : classification

Selon le principe de **conversion hydro-mécaniques** (A, B et C)

et des chaînes de **conversion mécano-électriques** (types 1 à 5).

- **houlogénérateurs indirects** : conversion hydro-mécanique indirecte de *type A ou B*
- **houlogénérateurs directs** : une conversion hydro-mécanique directe de *type C*



- **houlogénérateurs à conversion mécano-électrique indirecte** : *types 1 à 4.*
- **houlogénérateurs à conversion mécano-électrique directe** : *type 5.*

Source : J. AUBRY et al., Chap. 1 Livre Hermès 2012

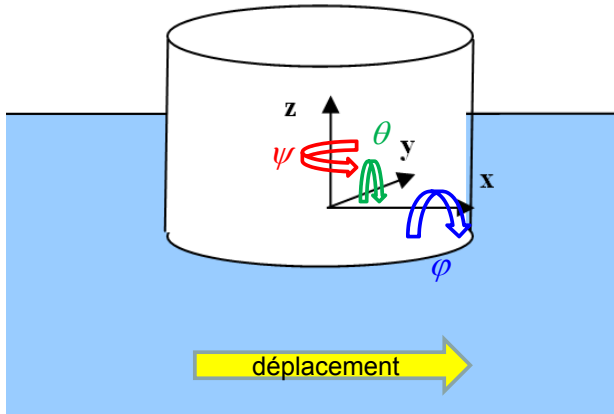
58

B. Multon ENS de Rennes

Les mouvements sollicités par la houle

6 degrés de liberté :

- 3 translations x_G, y_G, z_G du centre de gravité G :
cavalement, embardée et pilonnement
(surge, sway, heave)



- 3 rotations φ, θ, ψ autour des axes x, y, z : (roulis, tangage et lacet)
(roll, pitch, yaw)

59

Source : A. Babarit., Chap. 3 Livre Hermès 2011

B. Multon ENS de Rennes

Houlogénérateurs : différentes technologies

Systemes à rampe de déferlement (overtopping WEC)

Phénomène de déferlement :
(port de Cannes nov. 2011)



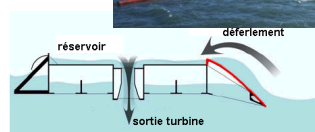
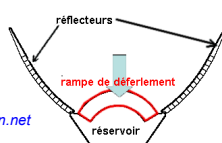
Source : anonyme, vidéo Youtube

Principe : la houle, concentrée via un canal convergent ou des déflecteurs, déferle dans un bassin surélevé d'où l'eau est turbinée

Technologies onshore et flottantes :

Exemple :
Wave Dragon

Source : www.wavedragon.net



A l'échelle 1 : 300 m entre bras, 170 m (longueur) et 17 m (hauteur)
dont 3 à 6 m au-dessus du niveau de la mer.

Masse totale 33 000 tonnes, réservoir 8 000 m³,

Turbines Kaplan + générateurs à aimants. Puissance maximale 7 MW
(20 GWh avec ressource de 36 kW/m)

Source : <http://vimeo.com/attentionalaterre>

60

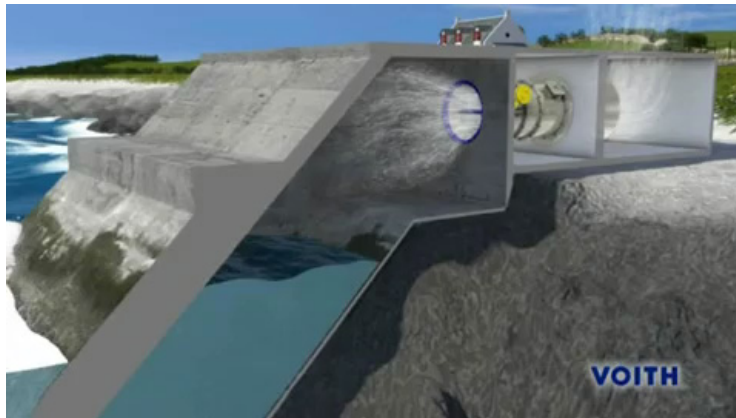
B. Multon ENS de Rennes

Houlogénérateurs : différentes technologies

Systèmes à colonne d'eau oscillante (OWC)

Exemple on shore : **LIMPET**

(Land Installed Marine Powered Energy Transformer)

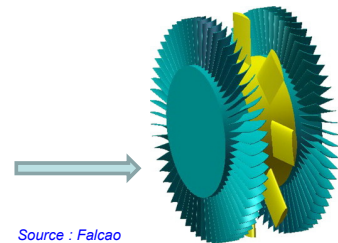


Source : Voith Hydro

Source images et vidéo : www.wavegen.co.uk/



Raccordé au réseau (Islay Ecosse) depuis 2001 : **500 kW**
 Surface totale de captation de 169 m²
 2 turbines Wells (pas fixe) 2,6 m en contre rotation à 1050 tr/min
 + volant d'inertie (1300 kg.m²)
 + 2 génératrices asynchrones de 250 kW à vitesse variable



Source : Falcao (Renewable and Sustainable Energy Reviews Elsevier 2010)

B. Multon ENS de Rennes

Houlogénérateurs : différentes technologies

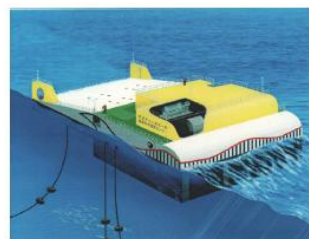
Systèmes à colonne d'eau oscillante (OWC)

Autres exemples

en **technologies flottantes** :

- Sperboy (UK 1997)
- Mighty Wale (Japon 1998)
- Oceanlinx (Australie) 1 MW
- OceanEnergy Ltd (OE Buoy) :

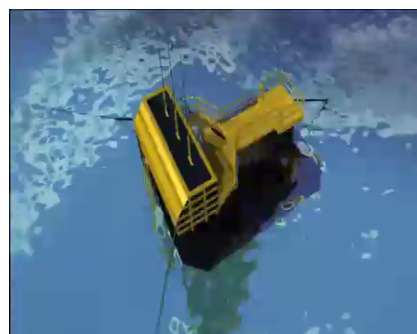
En test en Irlande (Wave Hub)
 1,5 MW - 650 tonnes,
 Lon. 37,5 m – Largeur : 18 m
 Tirant d'eau : 9,8 m



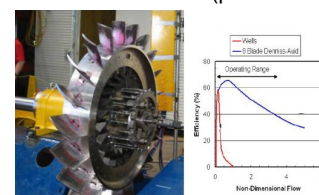
Source : JAMSTEC



Source : <http://www.oceanlinx.com>



Turbine Dennis-Auld (pas variable)



Source : report E2I EPRI – 006B - SF, 2004

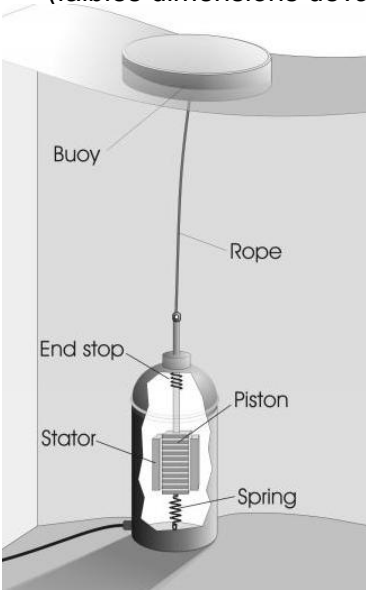
B. Multon ENS de Rennes

Houlogénérateurs : différentes technologies

Systèmes à corps flottant à référence externe, exemple 1 :

Seabased (Suède, Uppsala) :
bouée pilonnante ou « point absorber »
(faibles dimensions devant la longueur d'onde de la houle)

Bouées de 4 à 6 m
Course de 2 à 6 m
Générateur linéaire à aimants
20 à 100 kW/unité
Profondeurs : 25 à 300 m



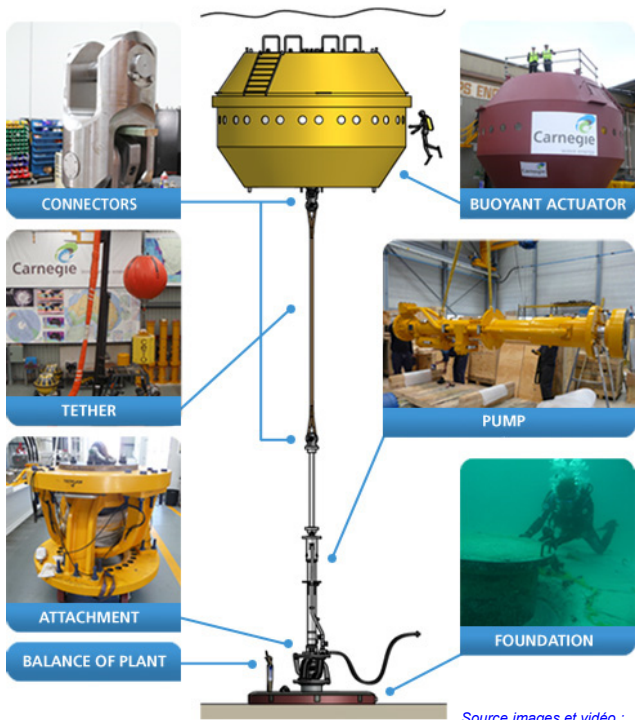
Source images et vidéo : <http://www.seabased.com>

Houlogénérateurs : différentes technologies

Systèmes à corps flottant à référence externe, exemple 2 :

CETO (Cylindrical Energy Transfer Oscillator)
Carnegie, Australie

CETO 5 : Bouées diamètre 11 m - hauteur 5 m,
une pompe transmet de l'eau
via un réseau hydraulique
à une turbine Pelton, environ 240 kW.
1^{er} test en nov. 2014.



CETO Commercial Scale Unit

Source images et vidéo : Carnegie

CETO 6 : prévu pour 2016, avec 1 MW (bouée de 20 m)

Houlogénérateurs : différentes technologies

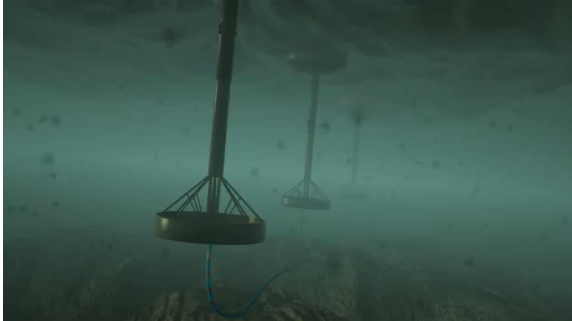
Systemes à corps flottant à référence interne

Exemple (encore une bouée pilonnante) :

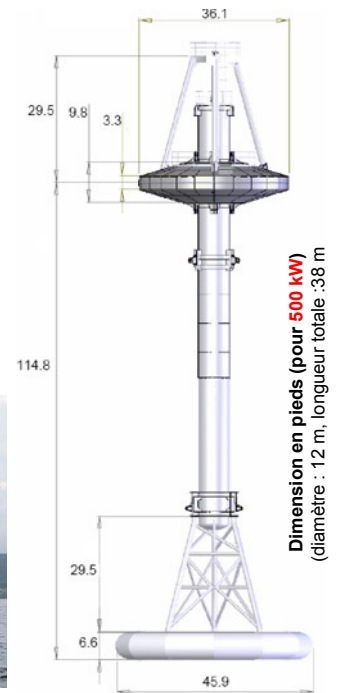
PowerBuoy (Ocean Power Technologies USA, UK)

PB150 : 150 kW

(PB 500 : 500 kW
en développement 2013)



Source images et vidéo : <http://www.oceanpowertechnologies.com/>



B. Multon ENS de Rennes

Houlogénérateurs : différentes technologies

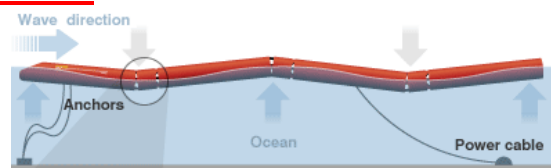
Systemes à corps flottants à référence interne

Pelamis (Ecosse)

4 cylindres : diamètre 3.5 m, total 150 m

750 kW – 2,7 GWh (houle de 55 kW/m, équiv. 3600 h/an)

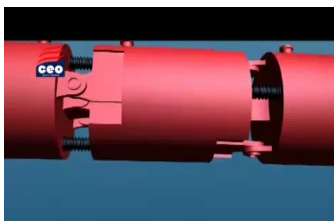
(Version P2 : ensemble de 5 boudins diamètre 4 m, longueur totale 180 m,
20 mois de d'amortissement énergétique avec 40 kW/m)



Vérins hydrauliques + stockage sous pression

+ moteurs hydrauliques + générateurs asynchrones

Source images et vidéo : <http://www.pelamiswave.com/>



A single device is composed of four articulated sections that move up and down as the waves pass along it.

Ferme d'Aguçadoura
(Portugal, 2008)

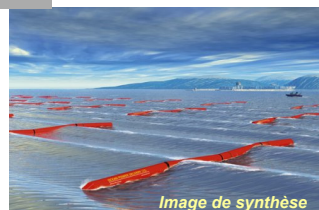


Image de synthèse

« Wavefarm » 30 MW – 1,3 km²

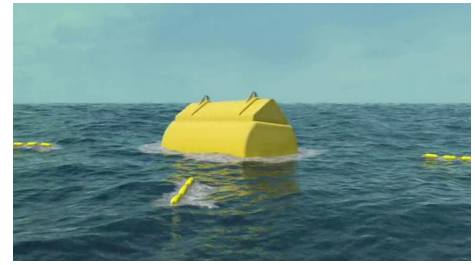
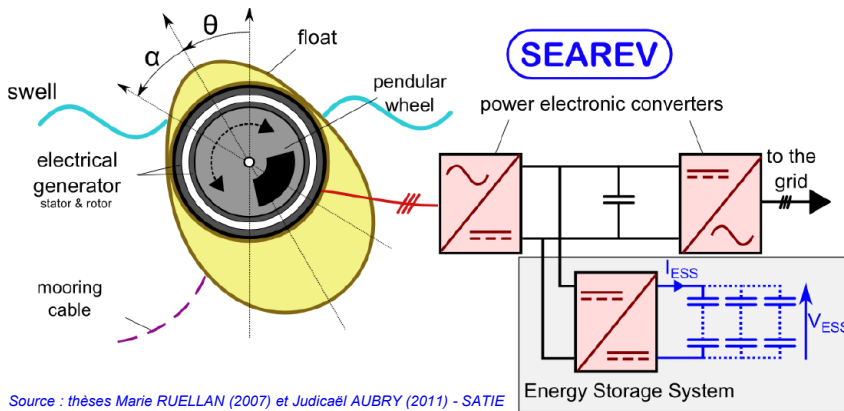


Houlogénérateurs : différentes technologies

Systèmes à corps flottant à référence interne

Searev (Ecole Centrale de Nantes – LMF / ENS de Rennes – SATIE)

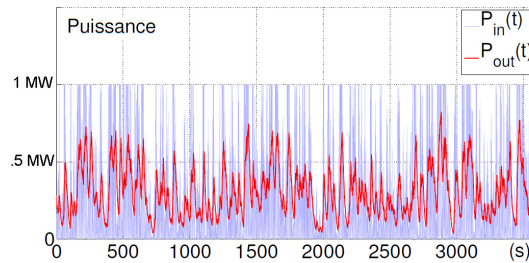
Houlogénérateur direct à chaîne de conversion directe



Source : <http://www.semrev.fr>

Source : thèses Marie RUELLAN (2007) et Judicaël AUBRY (2011) - SATIE

Profil de puissance lissé :



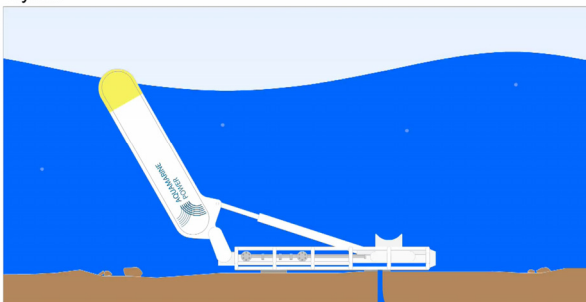
Source : thèse Judicaël AUBRY (2011) - SATIE

67

B. Multon ENS de Rennes

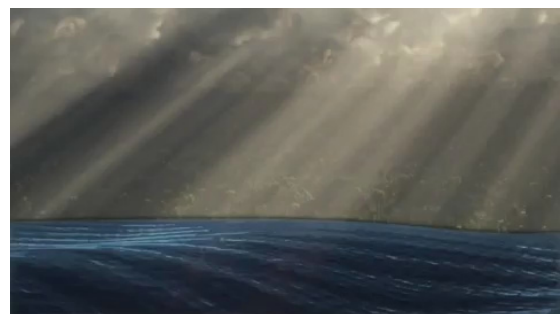
Houlogénérateurs : autres technologies

Oyster (Ecosse, 310 kW)



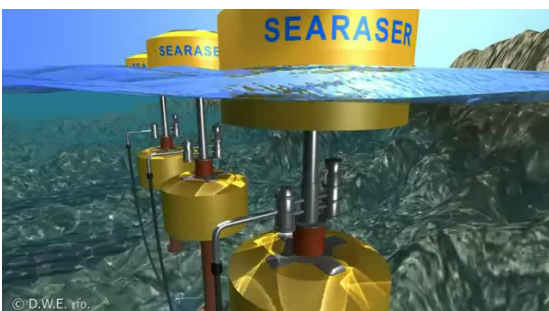
Source : <http://www.aquamarinepower.com/>

BioWave (Australie, 250 kW)



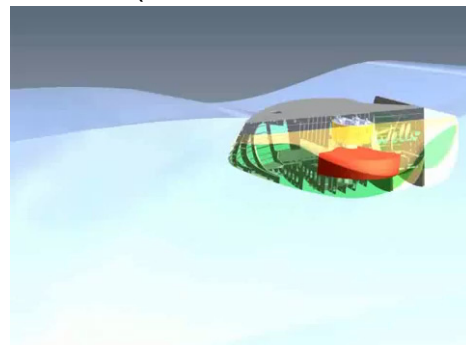
Source : <http://www.biopowersystems.com>

Searaser (UK, pompe, réservoir et turbine)



© D.W.E. 1996

PENGUIN (Wello Finlande, 500 kW)



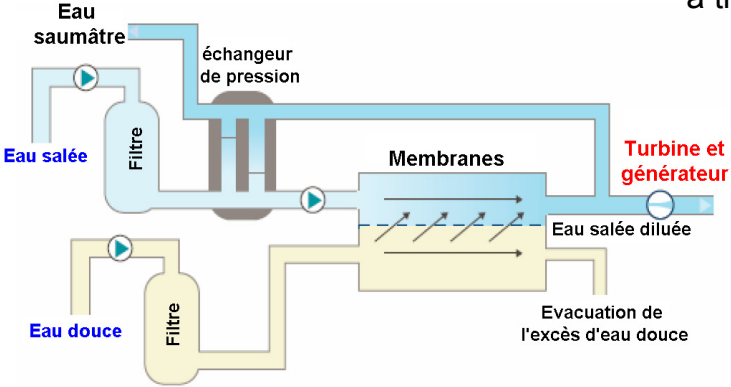
Source : <http://www.wello.fi/>

68

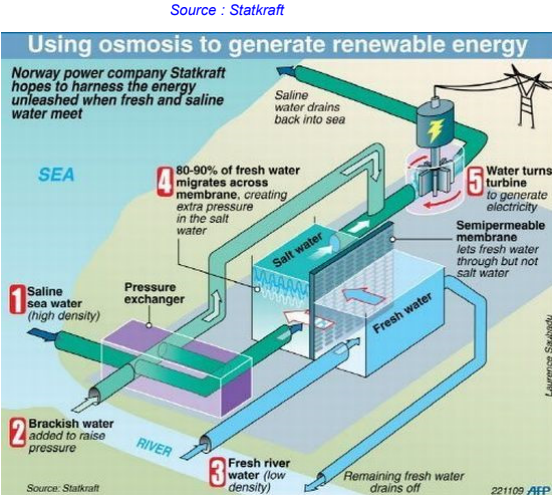
B. Multon ENS de Rennes

Récupération de la pression osmotique

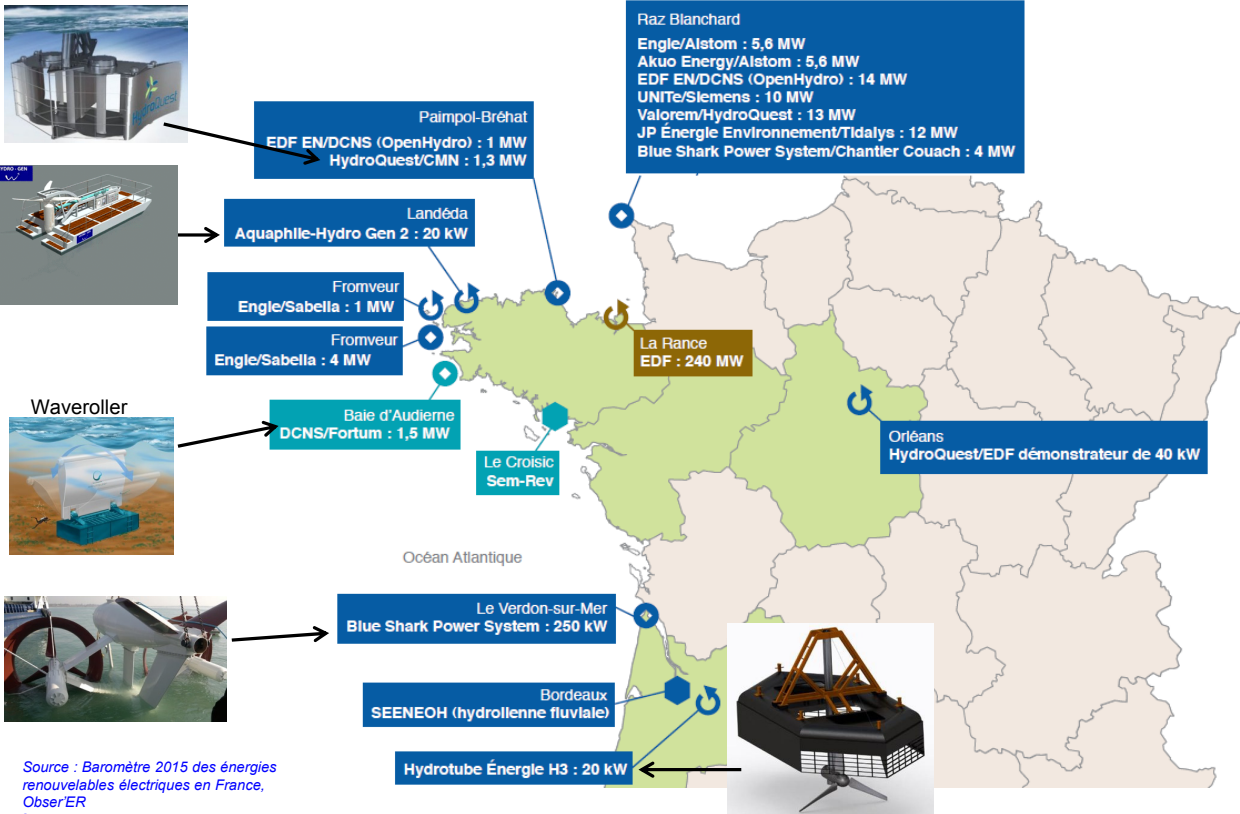
Principe : exploitation de la pression (26 bars) entre eau douce et eau salée à travers des membranes perméables (environ $2,6 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}$)



Source : Soerensen - Weinstein, "Ocean energy: Position paper for IPCC", Conference on Renewable Energy, Lübeck, 2008



Projets français EMR (hors éolien)



Source : Baromètre 2015 des énergies renouvelables électriques en France, ObserER

Chaînes de conversion électromécaniques

Objectifs :

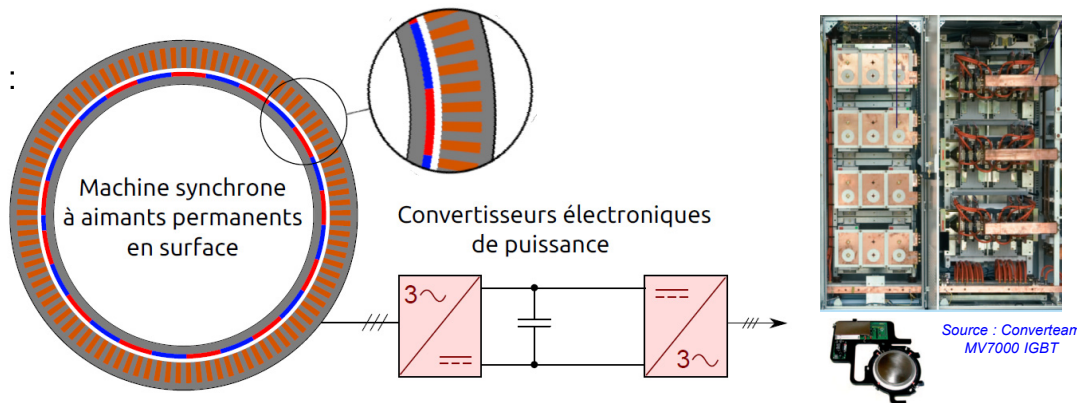
- convertir l'énergie mécanique en électricité avec une **très haute fiabilité**
- maximiser l'efficacité de la récupération (Maximum Power Point Tracking)

Principes : tournantes ou linéaires, indirectes (engrenages) ou directes

Les ingrédients :

structure électromagnétique + convertisseur électronique de puissance

Exemple :



Source : thèse Judicaël AUBRY (2011) - SATIE

71

B. Multon ENS de Rennes

Structures électromagnétiques

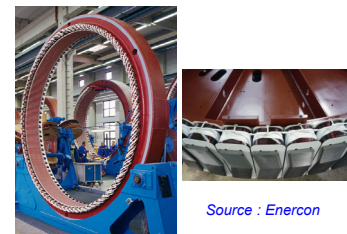
Actuellement,

- la vitesse variable s'est généralisée
- mais avec des solutions de conversion insuffisamment fiables
(machines à double alimentation)

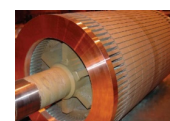
L'avenir est aux machines :

- **synchrones à aimants** avec la possibilité d'entraînements directs (linéaires ou tournants)
mais problème (conjoncturel ?) d'approvisionnement en terres rares

- **synchrones à inducteur bobiné** (à excitation brushless)

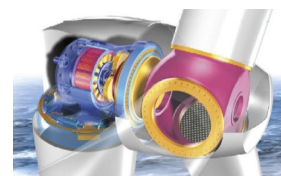


- **asynchrones à cage** rapides avec multiplicateurs de vitesse



- des solutions hybrides avec **machines semi-rapides**

Avec des convertisseurs électroniques de puissance...



72

Multibrid : Source : Areva

B. Multon ENS de Rennes

Structures électromagnétiques (générateurs)

Des niveaux d'effort élevés (mouvements lents)

Exemple éoliennes à 13 m/s : 2 MW (70 m) @ 22 tr/min => 870 kN.m

5 MW (110 m) @ 14 tr/min => 3,4 MN.m

Des pressions magnétiques limitées à quelques N/cm² =>

structures à entraînement directe plus lourdes et encombrantes

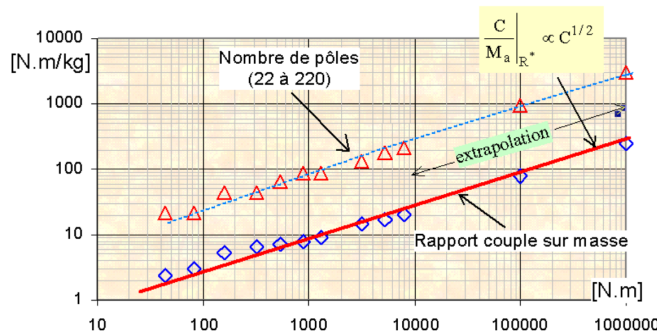
Avec des machines classiques (à faible nombre de pôles) : $\frac{C}{M} \propto C^{1/7}$ (2 à 3 N.m/kg)

Pour 3,4 MN.m => machine de plus de 1000 tonnes (inacceptable)

Structures annulaires synchrones à grand nombre de pôles :
à aimants :



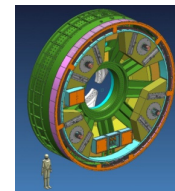
Source : Enercon



Avec aimants haute énergie

Environ 35 tonnes masse active
dont 4 à 5 tonnes d'aimants
+ structures mécaniques (jantes)
=> 100 tonnes

Alstom Haliade 150 6 MW (2012)



Source : Alstom



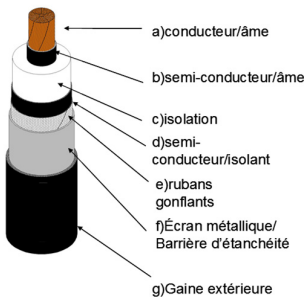
B. Multon ENS de Rennes

Câbles de transport sous-marin

Câble AC HTB (> 50 kV, isolation synthétique polyéthylène jusqu'à 500 kV)

Unipolaires : âmes conductrices jusqu'à 3000 mm² (typiquement 800 à 2500 mm²)

pour plus de 1000 MVA



Tripolaires (si possible) : jusqu'à 245 kV



Pose des tubes de protection
avant tirage des câbles
(400 kV triphasé)



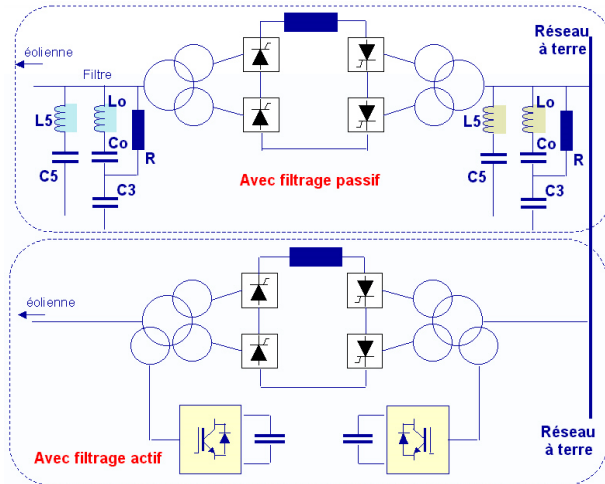
En AC (effet de peau) : âme segmentée à partir de 1000 mm² (cuivre) ou 1600 mm² (alu.)

Câble DC : jusqu'à 525 kV (ABB 2014, contre 250 kV précédemment),
mêmes sections réalisables

Transport en courant continu

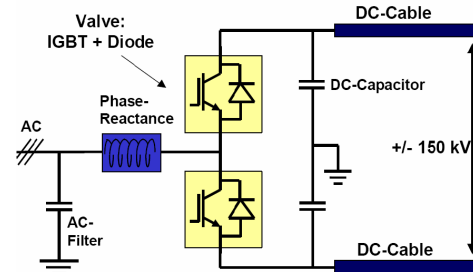
Envisagé pour des distances supérieures à 50 km et quelques 100 MW
(rentabilité par rapport au transport AC)

Avec convertisseurs à thyristors
LCC (Line Commutated Converters)



Source : J. Courault, GIRCEP march 2002

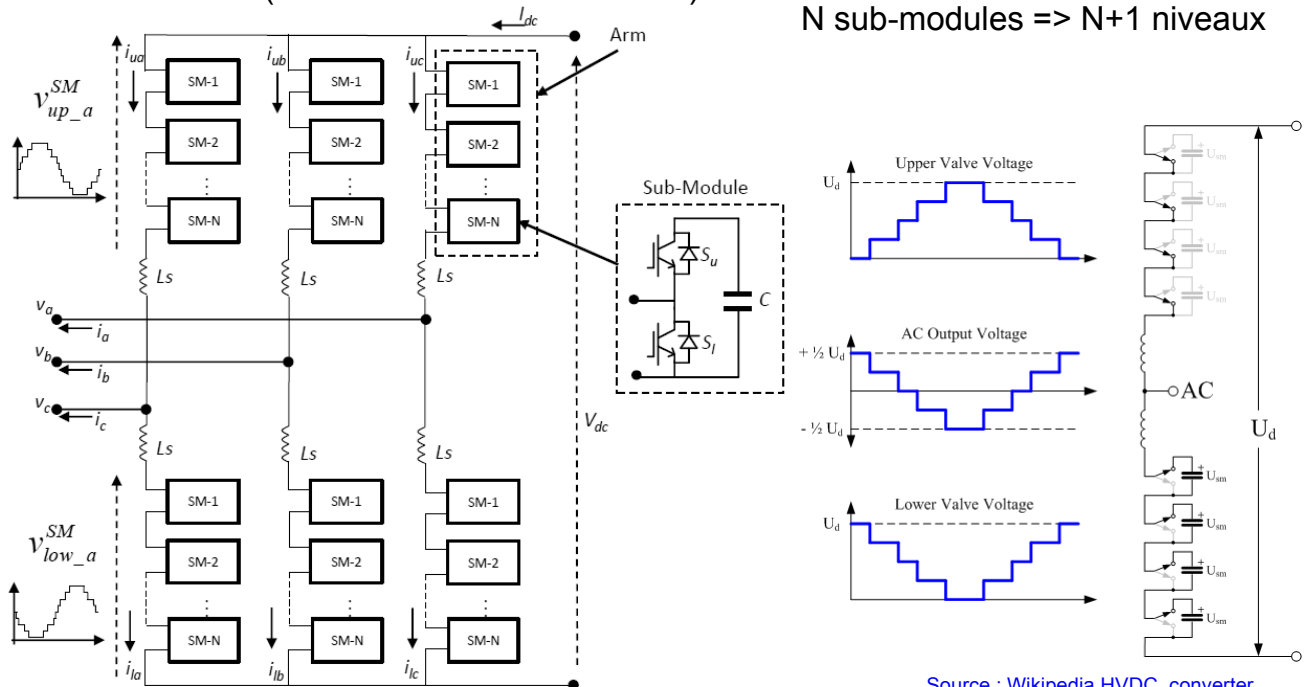
Avec convertisseurs à MLI
VSC (Voltage Source Converters)



Source : P. Sandeberg, L. Stendius, EWEK 2008

Transport en courant continu à convertisseurs de tension multi-niveaux

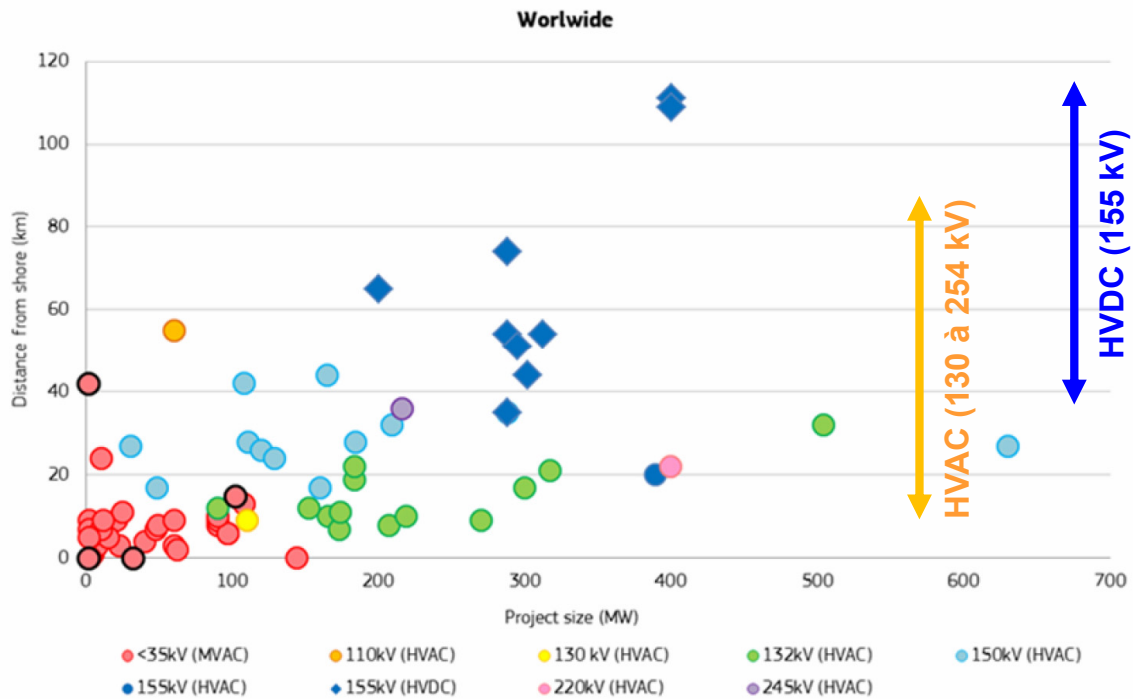
Structures MMC (Modular multilevel converter)



Source : Wikipedia HVDC_converter

Exemple : parc BorWin2 (Allemagne, 120 km de la côte) 800 MW +/- 300 kV

Solutions de transport de l'énergie : situation des installations en 2016



Source : JRC Wind Energy Status Report 2016, march 2017

77

B. Multon ENS de Rennes

Et le stockage d'énergie en mer ?

Le stockage d'énergie constitue un instrument de flexibilité parmi d'autres.

Il est possible qu'un stockage de masse en mer soit une solution pertinente.

Pour cela, les STEP marines constituent une voie à explorer (d'après Hydrocoop) :

- bassin plus bas que le niveau de la mer : 0,2 ou 0,3 GWh/km² envisageables
(10 à 15 m sous les basses mers et un niveau moyen de la mer de 6 m au dessus)
- bassin plus haut (adossé à une falaise) : jusqu'à 10 GWh/km² , plus coûteux,
nécessité de très grandes capacités pour amortir



Source : J.P. Vigny HYDROCOOP, sept. 2012

Source : source: Gottlieb Paludan Architects

Projets :

- Danemark (Risø) : STEP de 3,3 km², capacité utile de 2,75 GWh d'électricité
- Belgique : 4,9 km² (2,5 km) 10 mètres au-dessus du niveau de la mer.

78

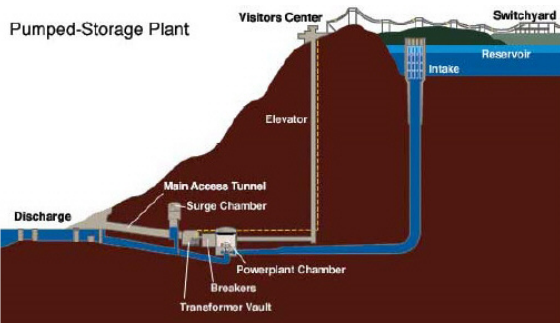
B. Multon ENS de Rennes

STEP en bord de mer ?

À l'eau de mer : bassin (étanche) supérieur à terre, bassin bas : la mer

Okinawa (Japon, 1999) : 180 MWh (590 000 m³ – 136 m)

31,8 MW en pompage et 31,4 MW en turbinage



79

Guadeloupe (projet depuis 2011) : 50 MW

1 GWh (20h) (6,5 Mm³ – 52 à 61 m) – 250 M€



Source : J.P. Vigny HYDROCOP, sept. 2012

B. Multon ENS de Rennes

Bibliographie

E. HAU, « *Wind-Turbines* », Springer, 2000.

J. MARTIN, « *Energies éoliennes* », Techniques de l'Ingénieur, Traités Energétique B8585, janv. 1997, 22p.

B. MULTON, X. ROBOAM, B. DAKYO, C. NICHITA, O. GERGAUD, H. BEN AHMED, « *Aérogénérateurs électriques* », Techniques de l'Ingénieur, Traités de Génie Electrique, D3960, nov. 2004.

J. CRUZ, *Ocean wave energy : current status and future perspectives*, Springer Verlag, 2008.

G. JOURDEN, P. MARCHAND (rapporteurs), « *Des énergies marines en Bretagne : à nous de jouer !* », rapport Conseil économique et social de Bretagne, Région Bretagne, mars 2009.

B. MULTON, A. CLÉMENT, M. RUELLAN, J. SEIGNEURBIEUX, H. BEN AHMED, « *Systèmes de conversion des ressources énergétiques marines* », Chapitre 7 du tome 1 du livre « *Les Nouvelles Technologies de l'Energie* », dirigé par J.C. Sabonnadière, Hermès, 2006, 45p.
Version auteurs sur Hal : <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00676240>

J. AUBRY, « *Optimisation du dimensionnement d'une chaîne de conversion électrique directe incluant un système de lissage de production par supercondensateurs. Application au houlogénérateur SEAREV* », Mémoire de thèse de doctorat, 3 novembre 2011 : <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00662488>

B. MULTON (coordonateur), 2 volumes sur les énergies marines renouvelables :
« *Energies marines renouvelables, aspects généraux, éolien, marémoteur et hydrolien* », Hermès, oct. 2011.
« *Energie thermique, houlogénération et technologies de conversion et de transport pour les énergies marines* », Hermès, fev. 2012.

B. MULTON (coordonateur), « *Marine Renewable Energy Handbook* », Wiley ISTE, nov. 2011, 672 p.

T. KOVALTCHOUK, « *Contributions à la co-optimisation contrôle-dimensionnement sur cycle de vie sous contrainte réseau des houlogénérateurs directs* », Mémoire de thèse de doctorat, 9 juillet 2015 : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01206269>

The European Wind Energy Association (EWEA) : <http://www.ewea.org/>

Global Wind Energy Council (GWEC) : <http://www.gwec.net/>

Global Offshore Wind Farms Database : <http://www.4coffshore.com/offshorewind/>

Joint Research Centre (JRC), European Commission's science and knowledge service (Wind Status Report): <https://ec.europa.eu/jrc/en>

80

B. Multon ENS de Rennes