

ENERGIE des VAGUES (houlomotrice)

Alain Clément
Directeur du

Laboratoire de Mécanique des Fluides

UMR 6598 du CNRS
ECOLE CENTRALE de NANTES



Bassin de génie océanique du LMF

Chiffres de l'énergie

Énergie solaire

Puissance totale reçue ($1,267 \cdot 10^{14} \times 1353$)	$1,7 \cdot 10^{17}$ W
Au niveau de la Terre et par an (8760 h)	$15,6 \cdot 10^{17}$ kWh
Reçue à la surface de la Terre et par an (météo)	$7,5 \cdot 10^{17}$ kWh
Reçue à la surface de la Mer et par an	$5,0 \cdot 10^{17}$ kWh
soit 3800 fois la consommation d'énergie primaire de l'humanité !!	

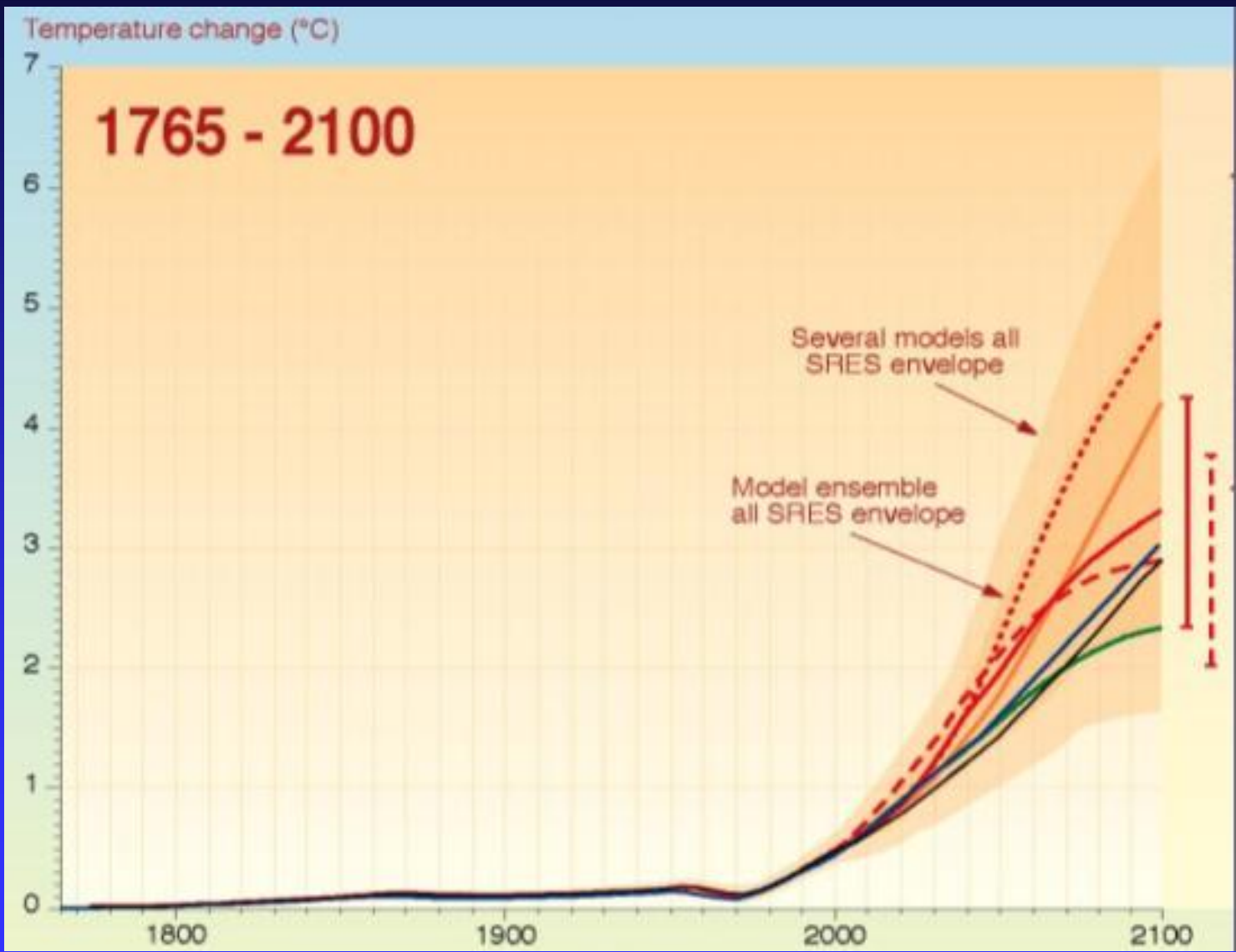
Consommation d'énergie mondiale	$1,4 \cdot 10^{14}$ kWh	(140 000 TWh = 12GTep)
55 % pays riches (1,4 milliards)	44 000 kWh/hab/an	
45 % pays pauvres (4,6 milliards)	10 600 kWh/hab/an	

Production mondiale d'électricité (2004) = 17 000 TWh (1,7 10¹³ kWh)

Source B.Multon ENS Cachan)



le réchauffement climatique



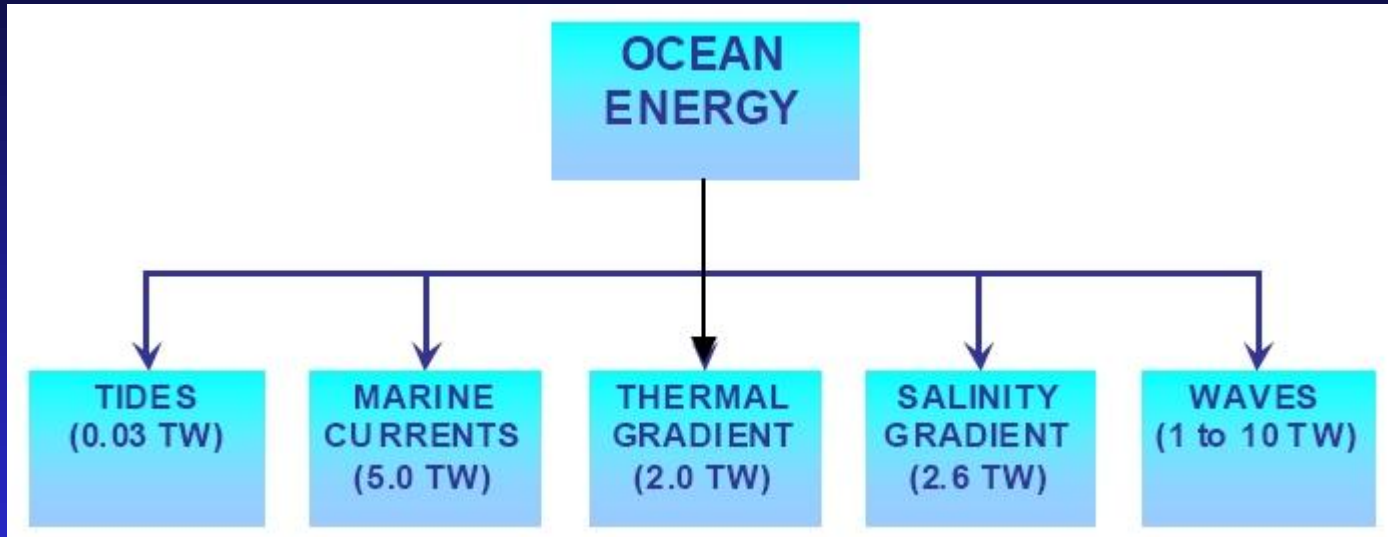
Les ENERGIES MARINES

- Énergie marémotrice
- Énergie des courants (*hydroliennes*)
- Énergie des vagues (*houlomotrices*)
- Énergie Thermique des Mers (*ETM*)
- Énergie osmotique (*gradients de salinité*)

- bio-Énergies marines
- Éolien - offshore

« décollage » depuis 15 ans

La ressource globale



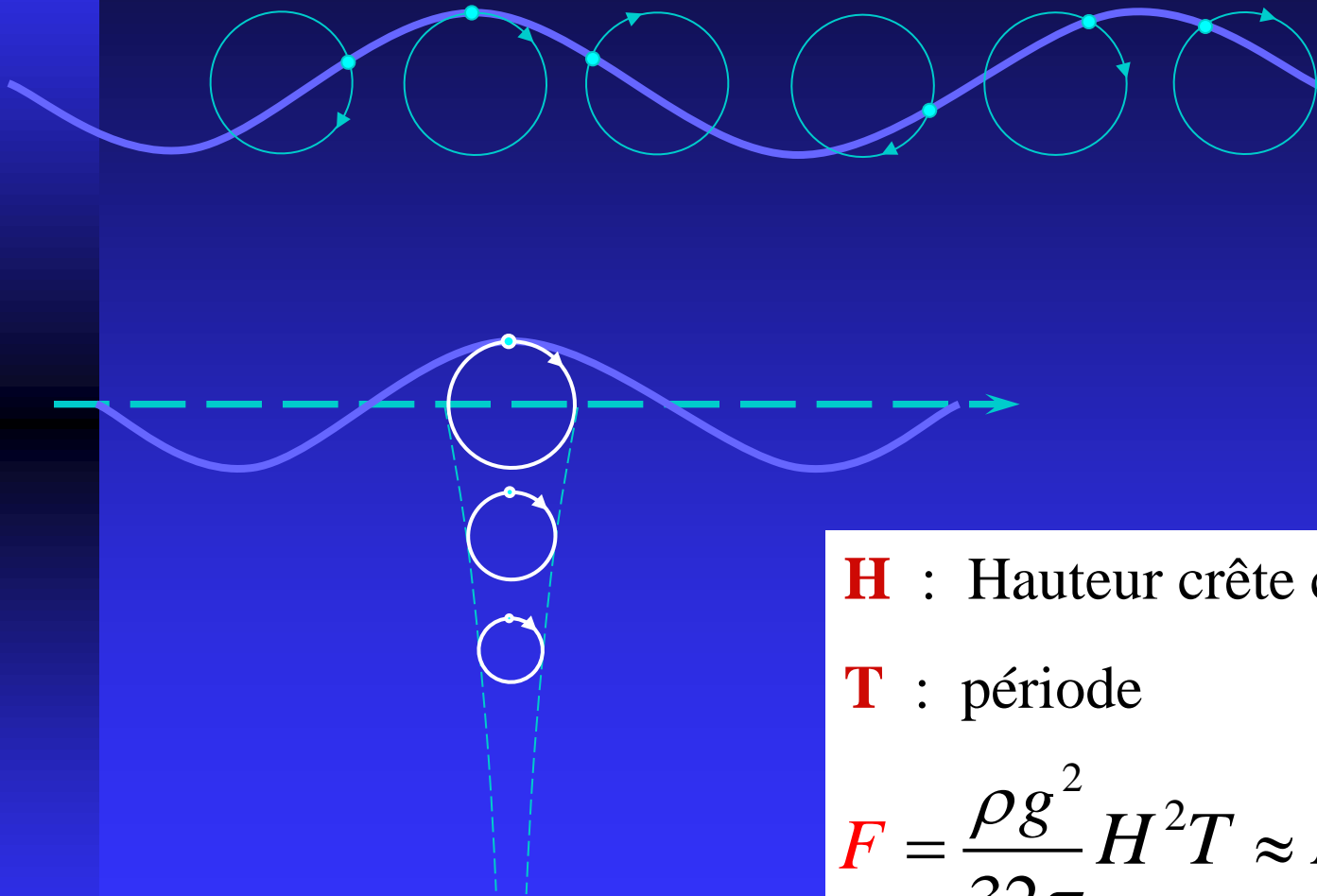
source: OREG (Canada 2004)

Vagues (global) : 1,3 à 2 TW (World Energy Council)

Techniquement exploitable : 150 à 750 TWh (WAVENET report 2003) (~200 GW)

Parc mondial électrique installé : 1,3 TW

La houle



H : Hauteur crête creux

T : période

$$F = \frac{\rho g^2}{32\pi} H^2 T \approx H^2 T \text{ kW} / m$$

La houle : densité surfacique d'énergie

Énergie cinétique

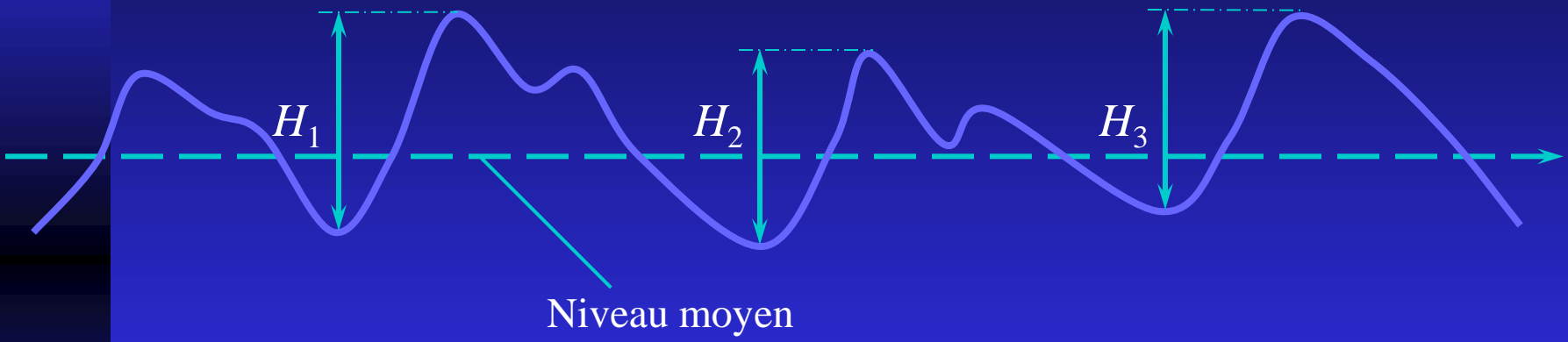
$$E_k = \frac{\rho g}{16} H^2$$

Énergie potentielle

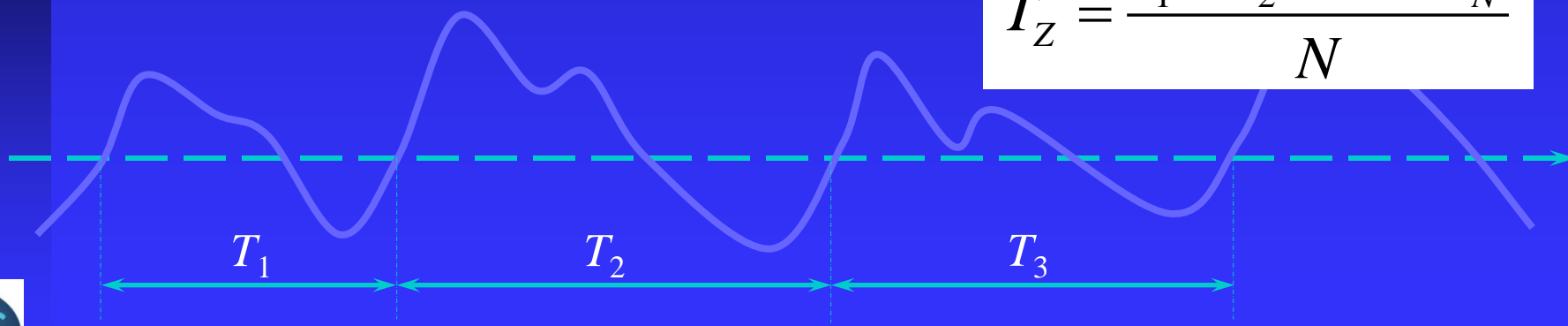
$$E_p = \frac{\rho g}{16} H^2$$

La houle irrégulière

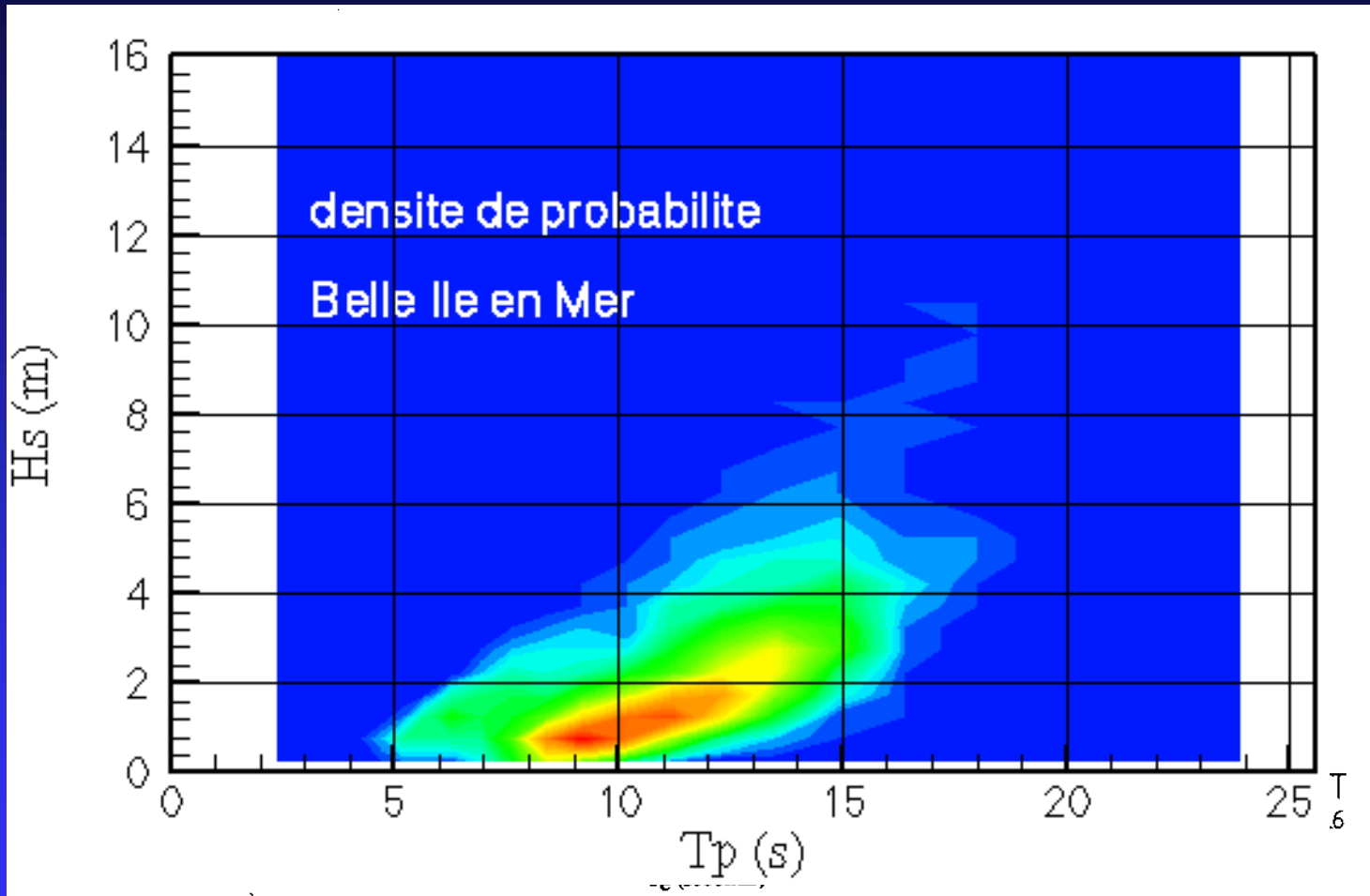
$$H_s = H_{1/3} = \frac{H_{j,1} + H_{j,2} + \dots + H_{j,N/3}}{N/3}$$



$$T_z = \frac{T_1 + T_2 + \dots + T_N}{N}$$



Répartition probabiliste



Scatter diagram / site océanique

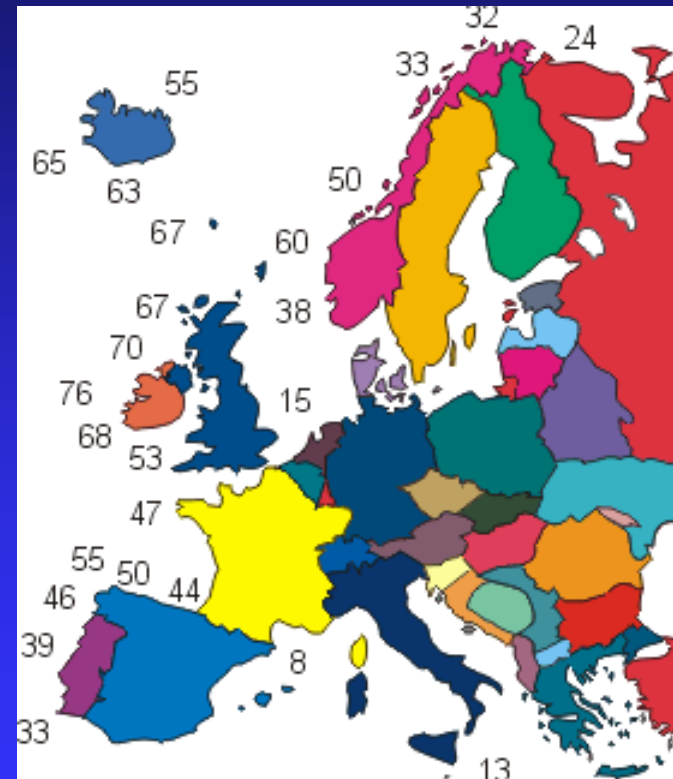
La ressource

✓ Puissance moyenne annuelle

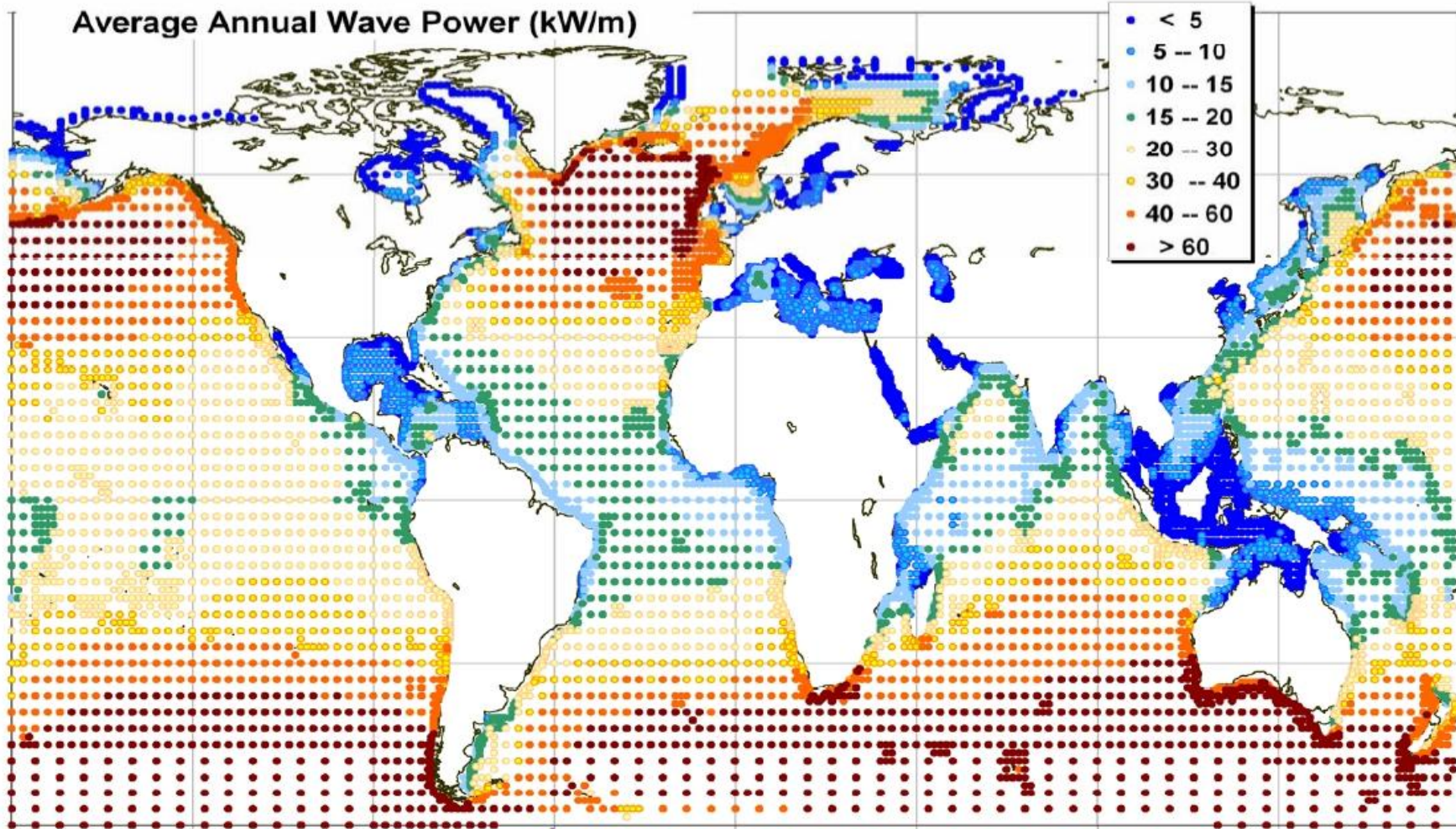
en kW/m

$$P \approx 0.55 H_s^2 T_Z$$

H (m)	T(s)	P
1	6	3.3
3	10	50
* 15	17	2380

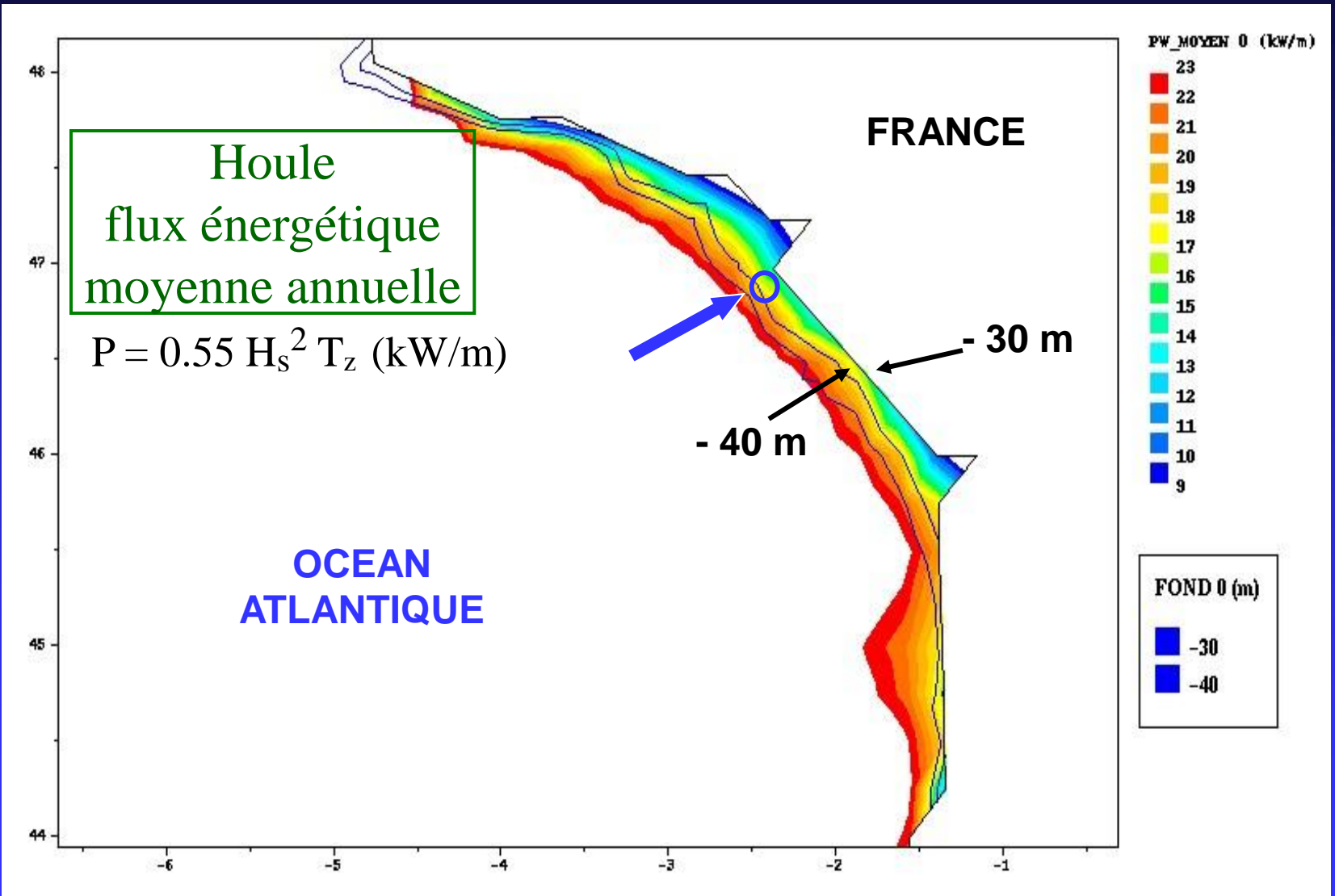


* Ouragan ISABEL – Floride
18/09/2003



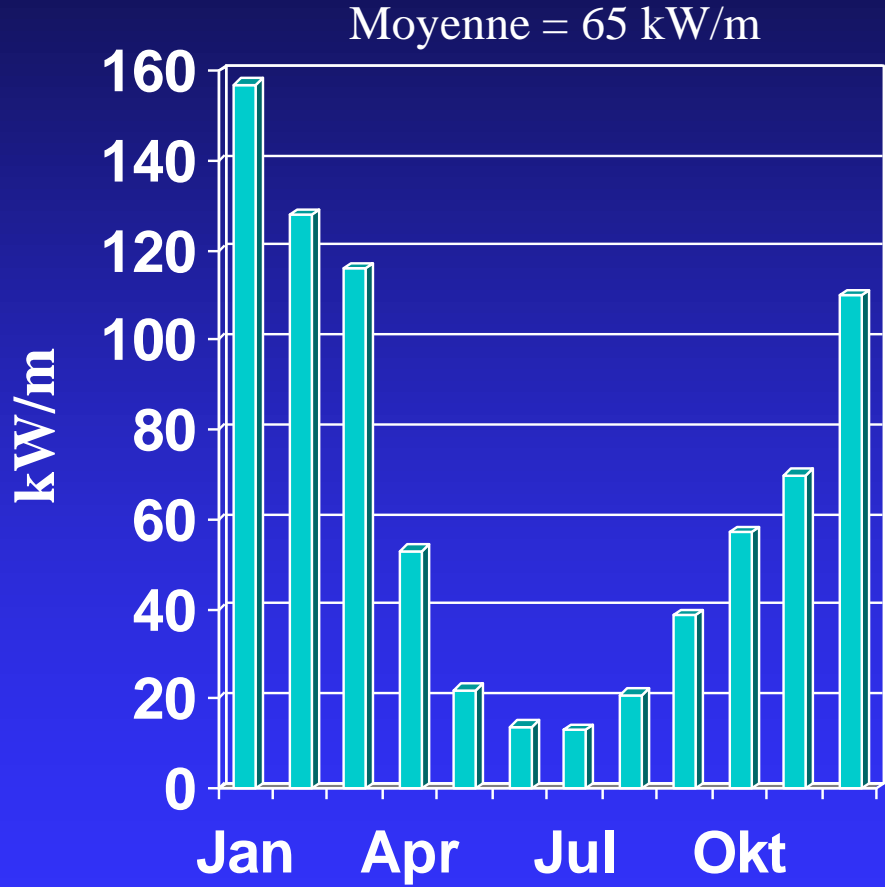
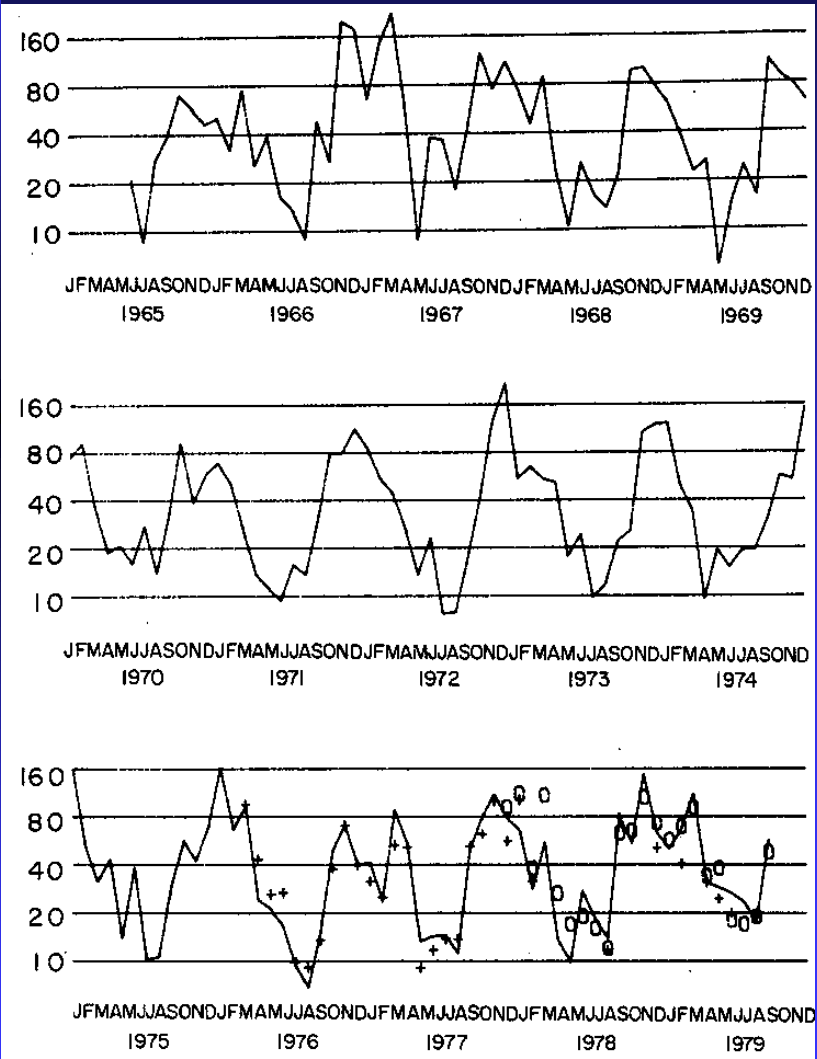
© WorldWaves data/OCEANOR/ECMWF

ressource façade Atlantique



By courtesy of EDF

Variabilité saisonnière



La ressource : comparaison littoral atlantique

✓ Flux énergétiques moyens annuels

solaire	150 W/m ²	
éolien	400 W/m ²	7 m/s moy à 50 m
houle	2500 W/m ²	(littoral proche)

Facteurs géographiques

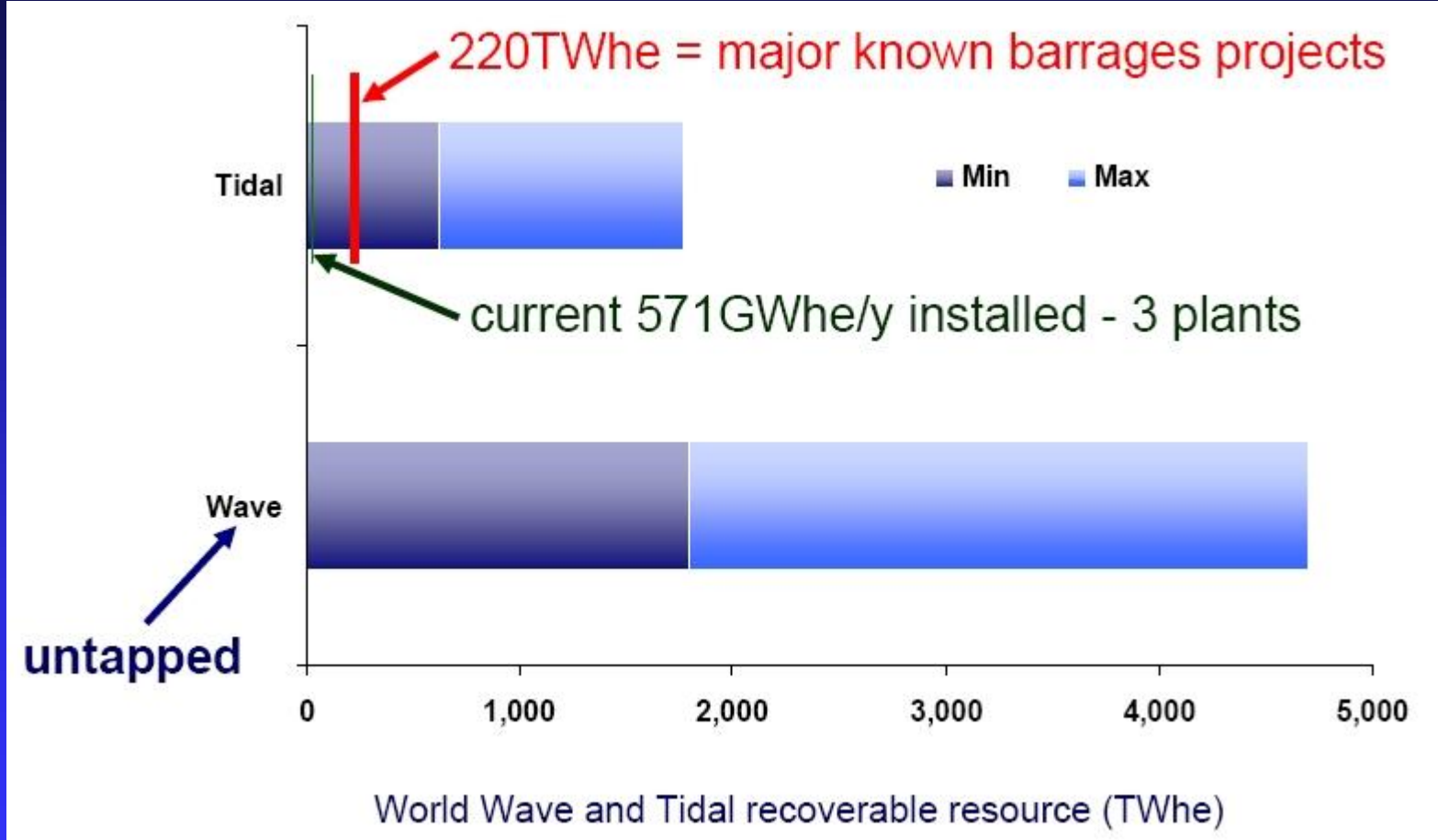
2000: 60% de la population mondiale vit à < 60km de la mer
(75% en 2025)

~100 000 îles habités sur la planète. (Indonésie 17 500)

La mer couvre 71% de la surface du Globe (360 Millions km²)

La zone d'influence économique de la France = 10 Millions km²

La ressource récupérable (global)



Rappel: production électrique mondiale= 17 000 TWh

4 grandes familles de systèmes

- rampe de déferlement (overtopping)
Maurice, Maré, Tapchan, Wave Dragon, FWPV, ...
- colonne d'eau oscillante (OWC)
Kvaerner, Pico, Islay, LIMPET, OSPREY, ...
- flotteurs
 - articulés (Cockerel raft, Pelamis,..)
 - sur ancrage (Salters duck, ...)
- posés au fond
OSPREY, CETO, AWS,..

+ les « inclassables »

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 mouvemens tous les corps qui surnagent, quels que soient leur poids et leur volume. La masse énorme d'un vaisseau de ligne, qu'aucune puissance connue ne serait capable de soulever, obéit cependant au moindre mouvement de l'onde. Qu'on suppose un instant, par la pensée, ce vaisseau suspendu à l'extrémité d'un levier, et l'on concevra l'idée de la plus puissante machine qui ait jamais existé.

C'est principalement sur ce mouvement d'ascension et d'abaissement des vagues, qu'est fondée la théorie des nouvelles machines que nous proposons.



et (déjà !) 3 générations

1995

● **SHORELINE** (à la côte)

Tapchan, Maré, ..

Première centrales OWC - Kvaerner, Pico, Limpet, ...

2001

● **NEARSHORE** (près de la côte)

Profondeur <50m, champ de modules , AWS, Pelamis, SEAREV

2020 ?

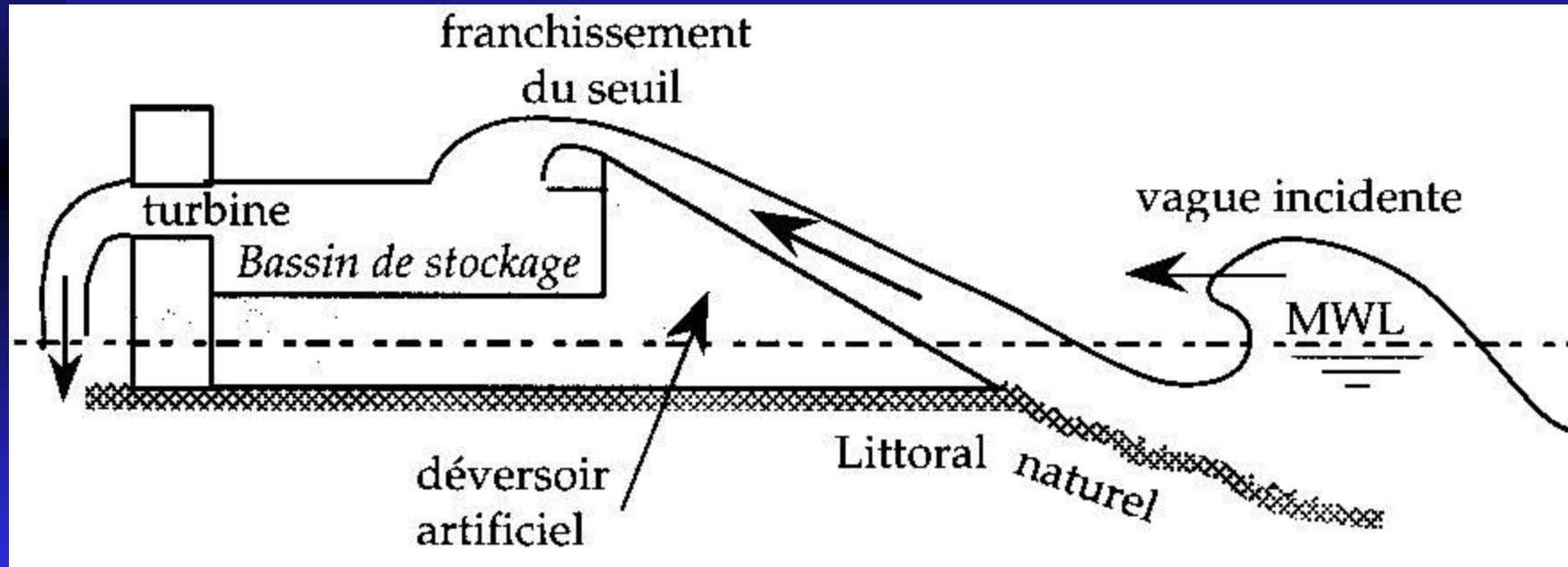
● **OFFSHORE**

Production massive « au large »

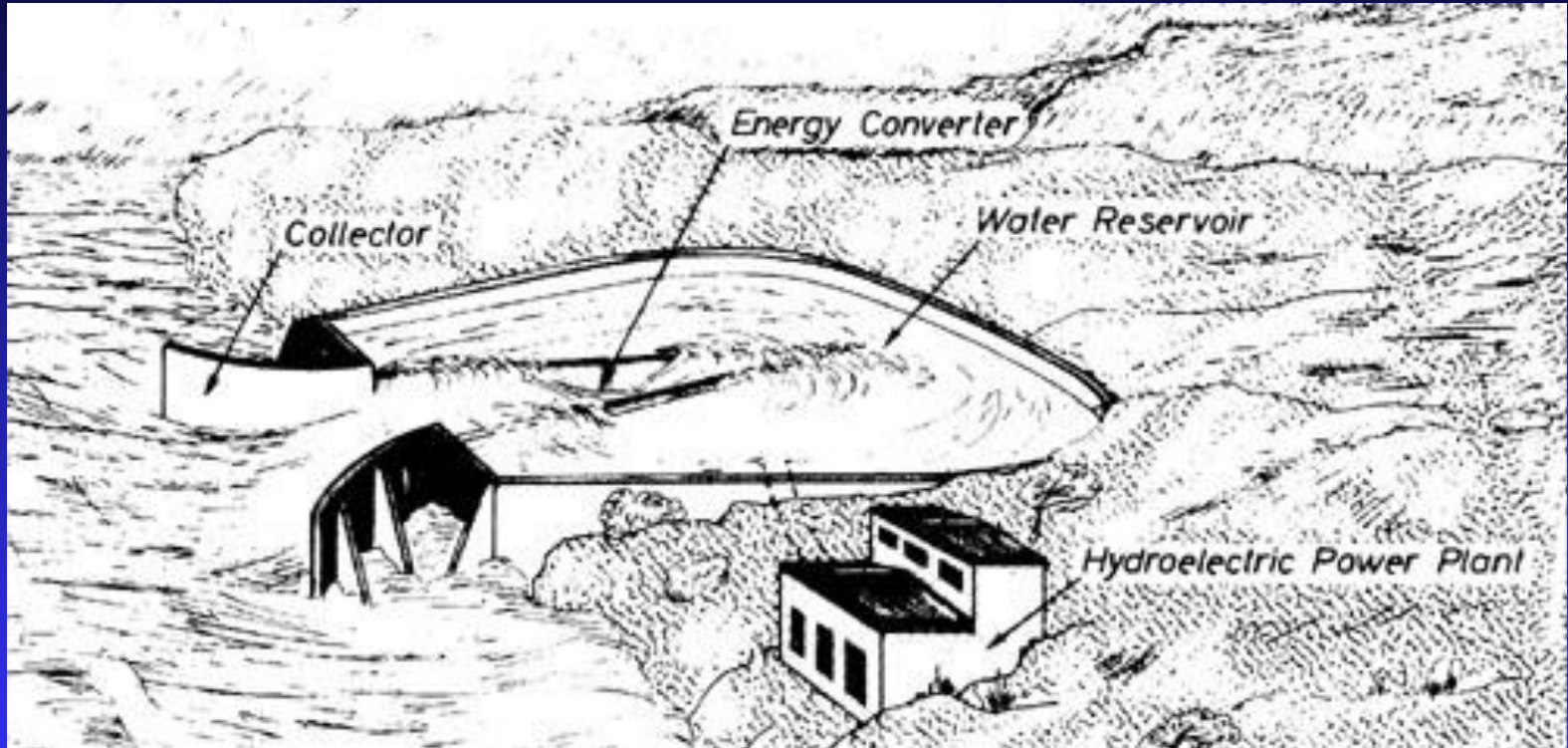
● Rampes à déferlement

(« overtopping »)

Le principe



TAPCHAN (Norvège)

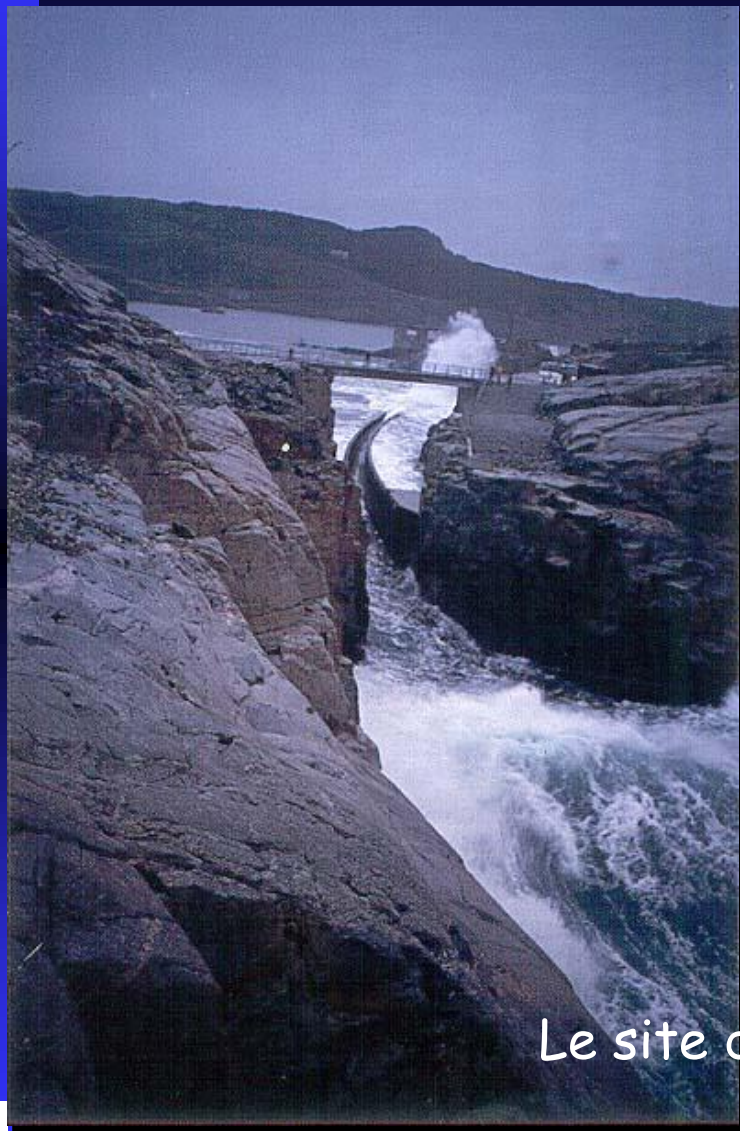


- Construit en 1985 près de Bergen
- 350kW
- arrêté en 1991

6,3 M€
0,07 €/kWh

Associé à un système de focalisation de la houle par réfraction

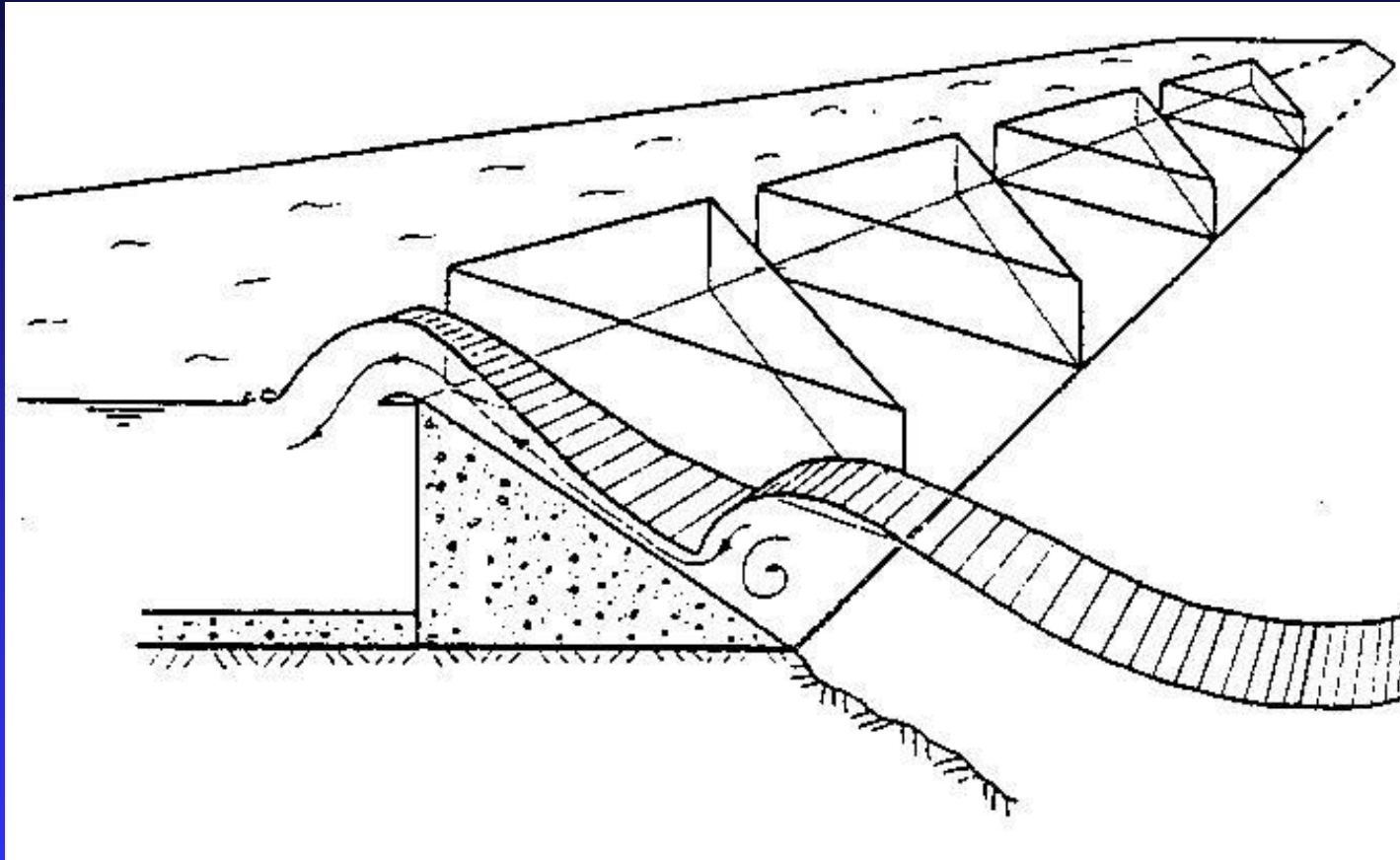
TAPCHAN (suite)



Le site de Toftestallen

Maré (N^{elle} Calédonie)

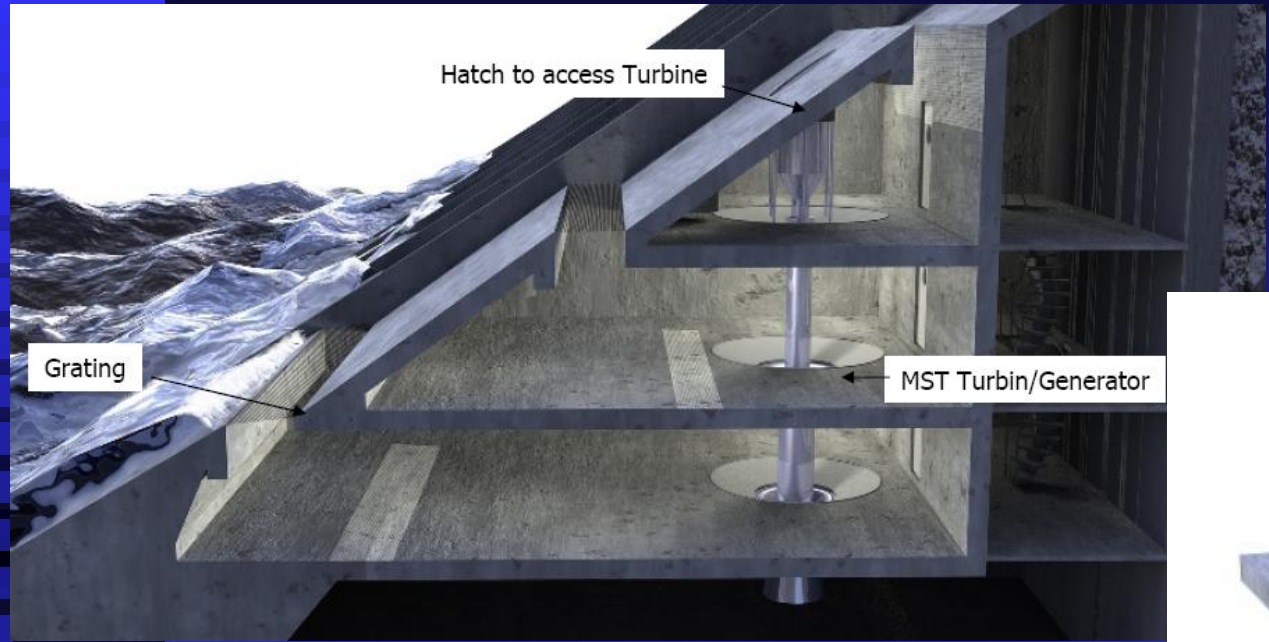
IFREMER - L.M.F (Nantes) 1983



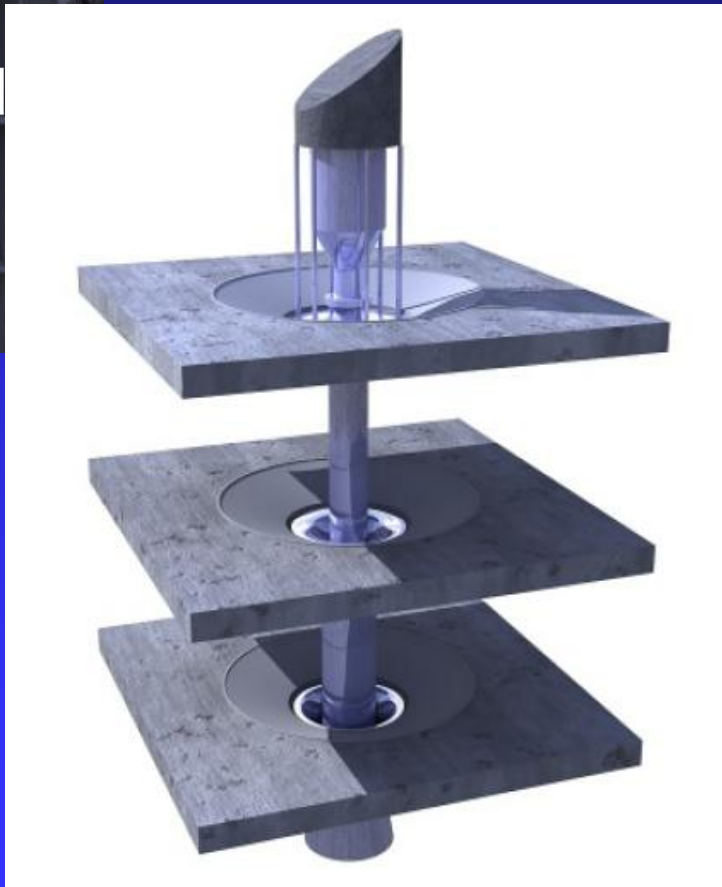
- Bassin: 100m x 25m
- Trièdres -> 40% d'énergie supplémentaire
- 0,8 FF/kWh, 35ans de service, taux 8%

Seawave Slot-cone Generator

(Norvège)
www.waveenergy.no



the Multi-Stage Turbine



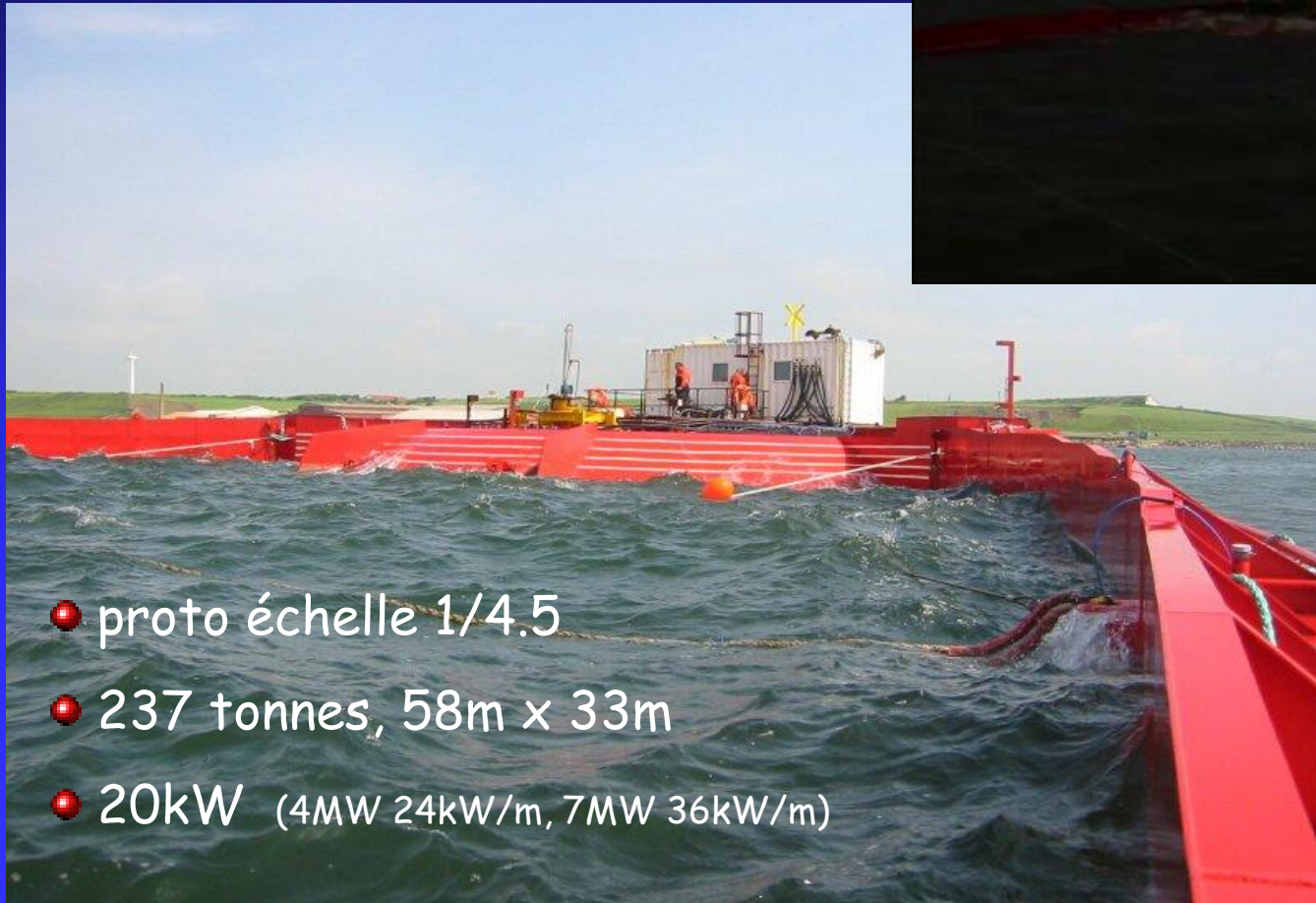
the SSG concept

- 2005: 1/15 Wave tank tests of SSG
- R&D on Multi stage turbine to be performed at NTNU (Trondheim)

Wave Dragon

Danemark www.wavedragon.net

Mars 2003



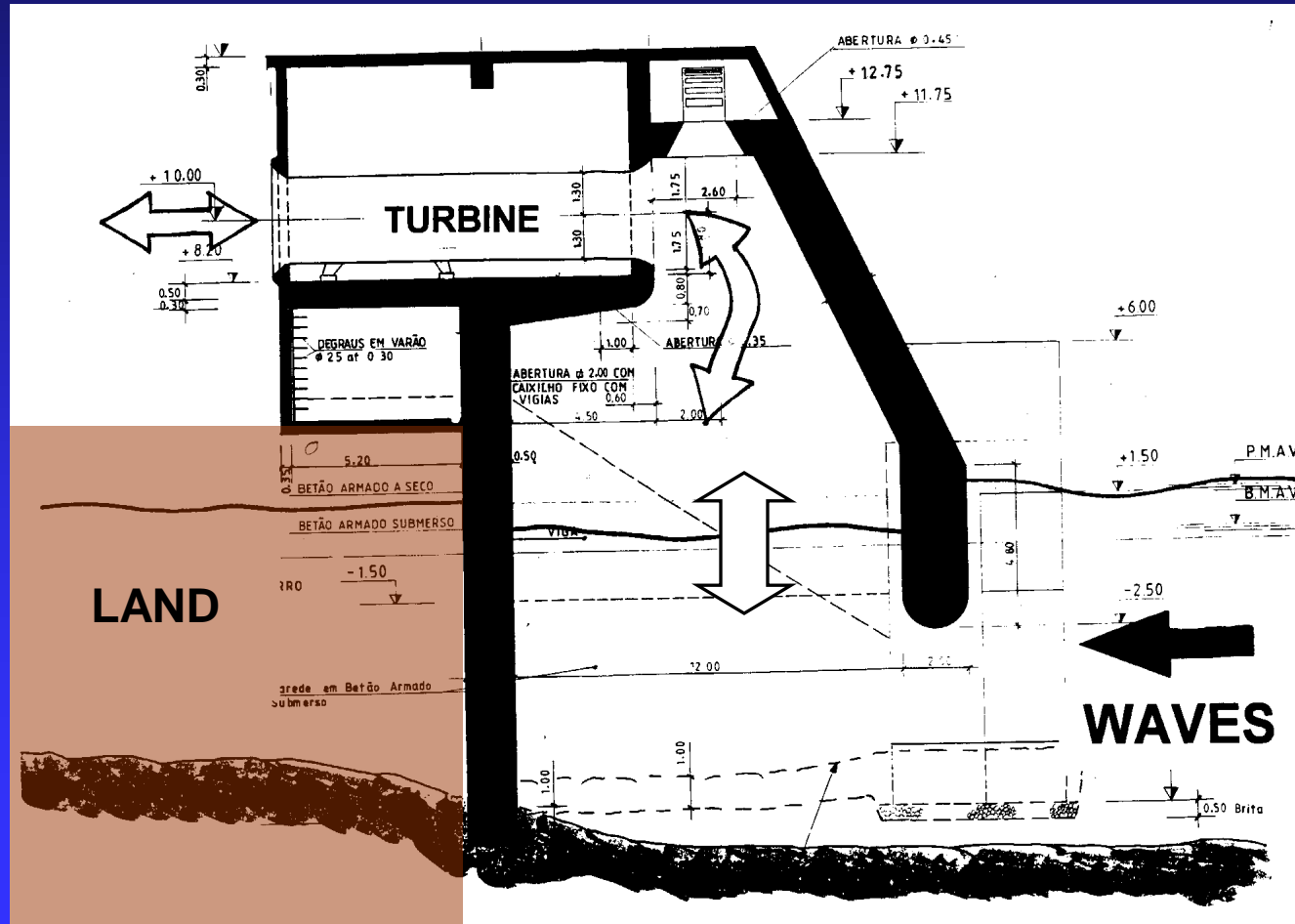
- proto échelle 1/4.5
- 237 tonnes, 58m x 33m
- 20kW (4MW 24kW/m, 7MW 36kW/m)



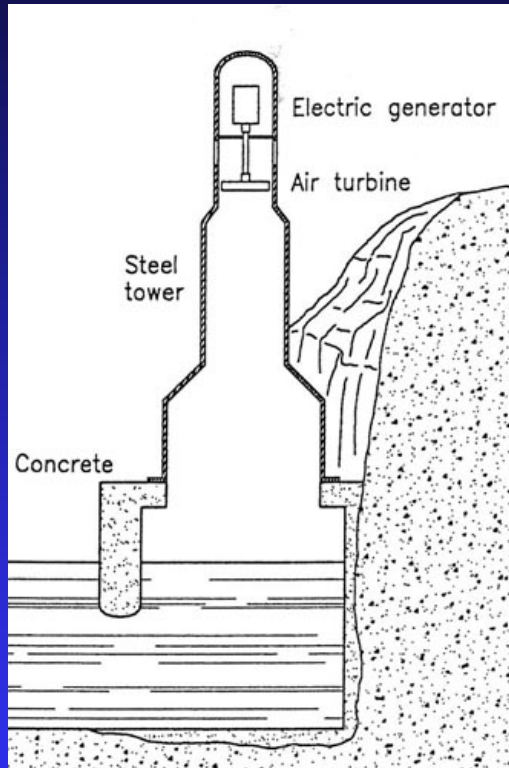
Colonne d'eau oscillante

« OWC »

Le principe



La colonne Kvaerner (Norvège 1985 -> 1988)



- hauteur totale 25m
- surface libre interne 56m²
- turbine 500kW (1500 t/mn)

Pico Açores (PT)



- turbine Wells
- 400 kW
- 2nde turbine à pas variable

- chambre: 12m x 12m
- 8m profondeur d'eau



Pico (suite)



Turbine et générateur
400kW

- Prod.élec: 0.54 GWh/an
- 1,3 M€
- 0,23 €/kWh



Montage de la turbine

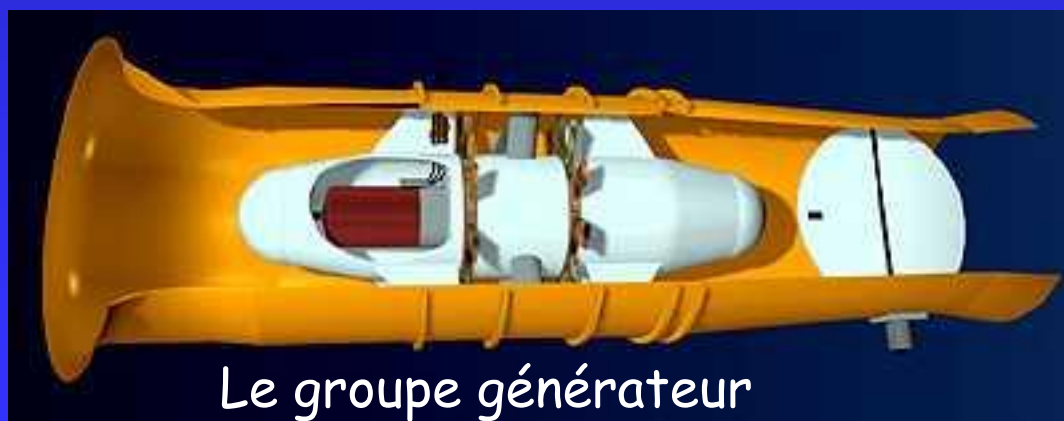


LIMPET WAVEGEN

(suite)



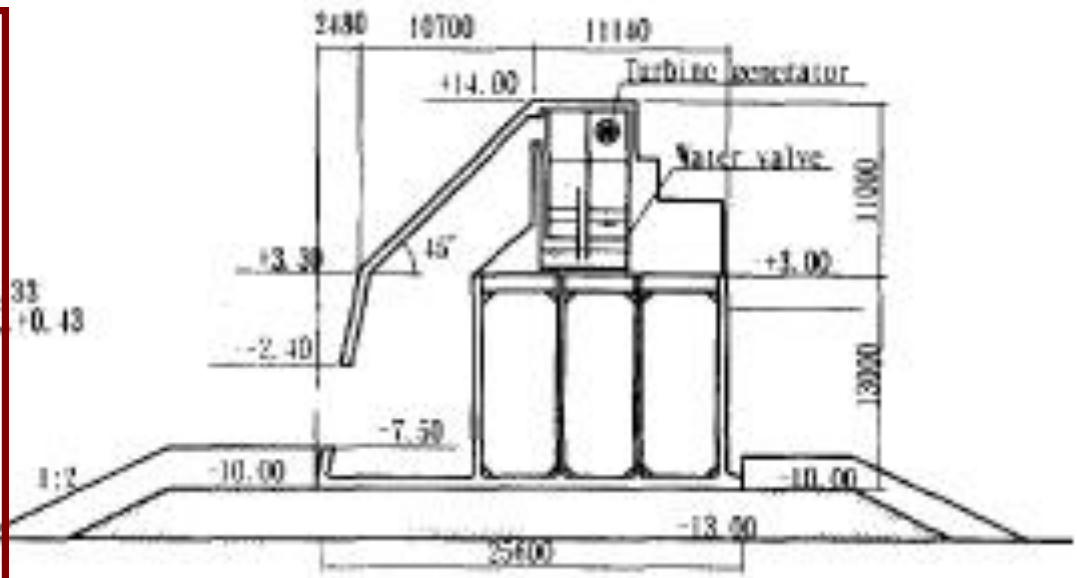
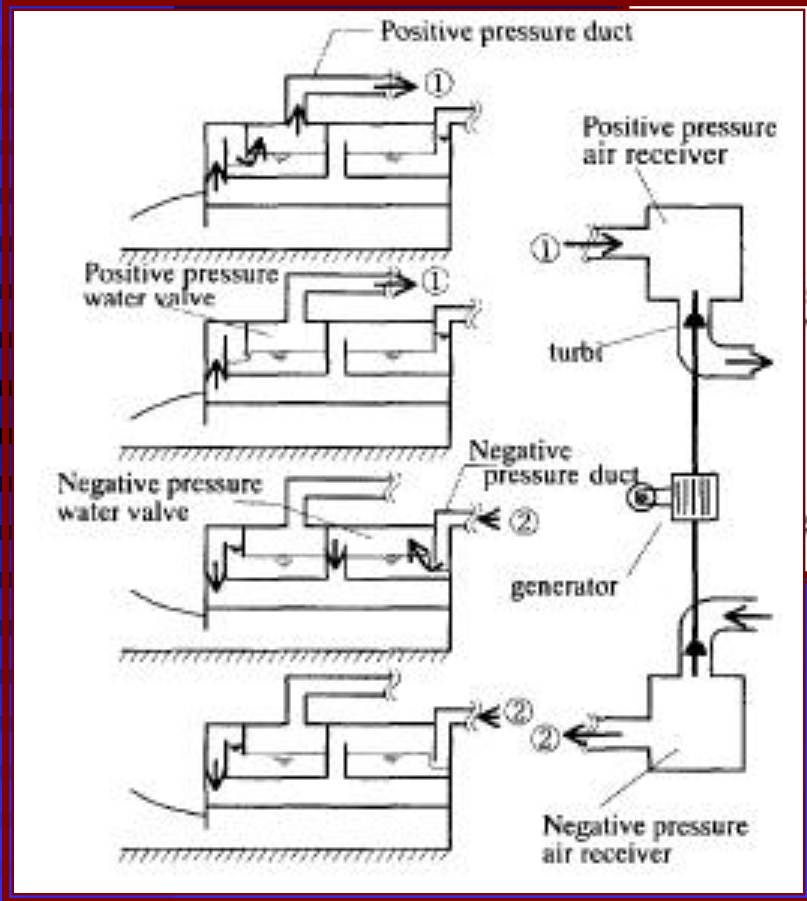
La turbine en cours de montage



Le groupe générateur

www.wavegen.com

OWC incluse dans une digue Site d'Haramashi (Japon)



- 40m x24m x24m (exterieur)
- construit en 1996 dans une jeteé
- Turbines à flux axial
- 130 kW installés

OWC incluse dans une digue Sakata Harbor (Japon)



OWC embarquées

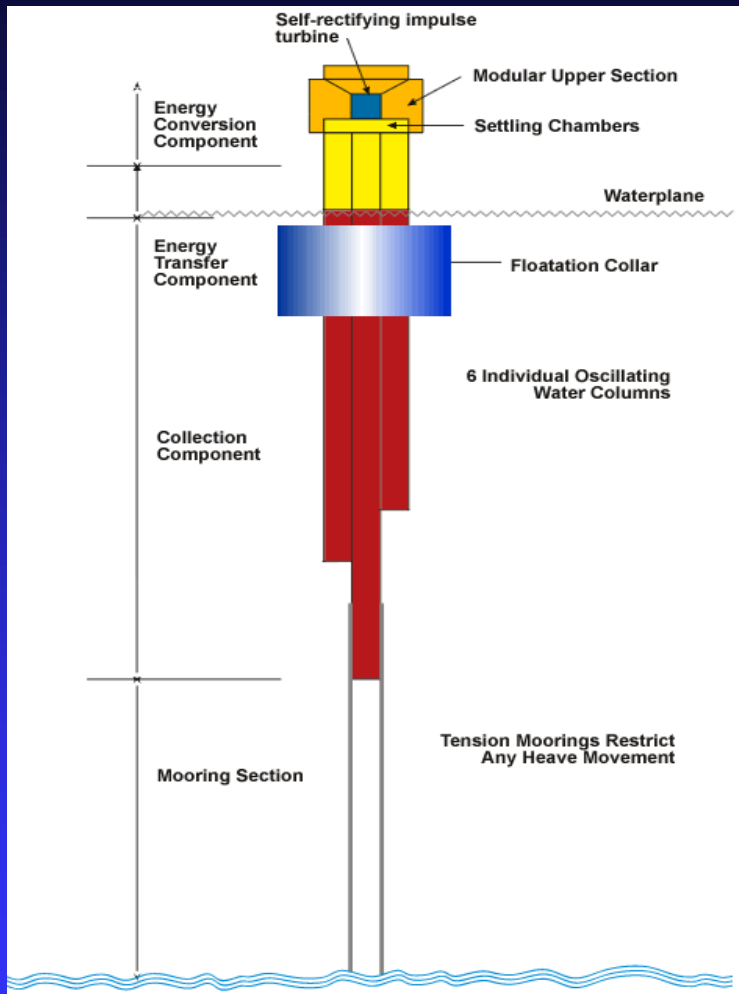
The "Mighty Whale" (Japon)



- 50m x30m x12m
- lancé en Sept. 1998
- Turbines Well's
- 4 générateurs : 10, 30, 30, 50 kW
- Énergie incidente 4 kW/m sur le site

OWC embarquées

SPERBUOY (UK)



- diam: 4m
- hauteur 12+3m
- ~ 140 kW

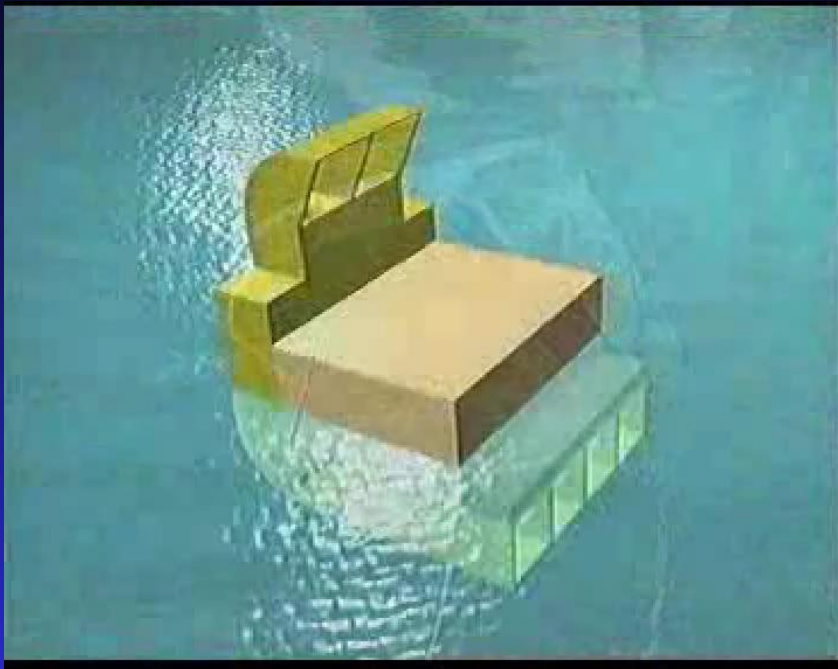
Embley Engng

SPERBUOY (UK)

- Proto 5kW 2002 kW
- meme chose que ORECON



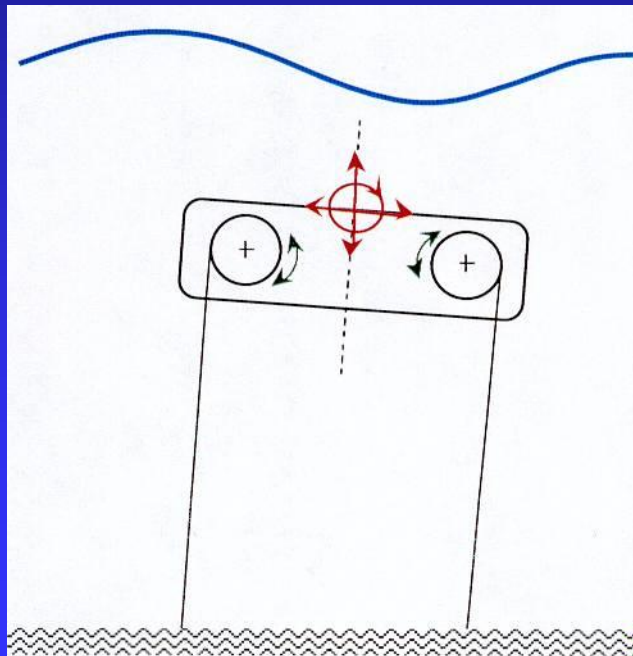
BBDB



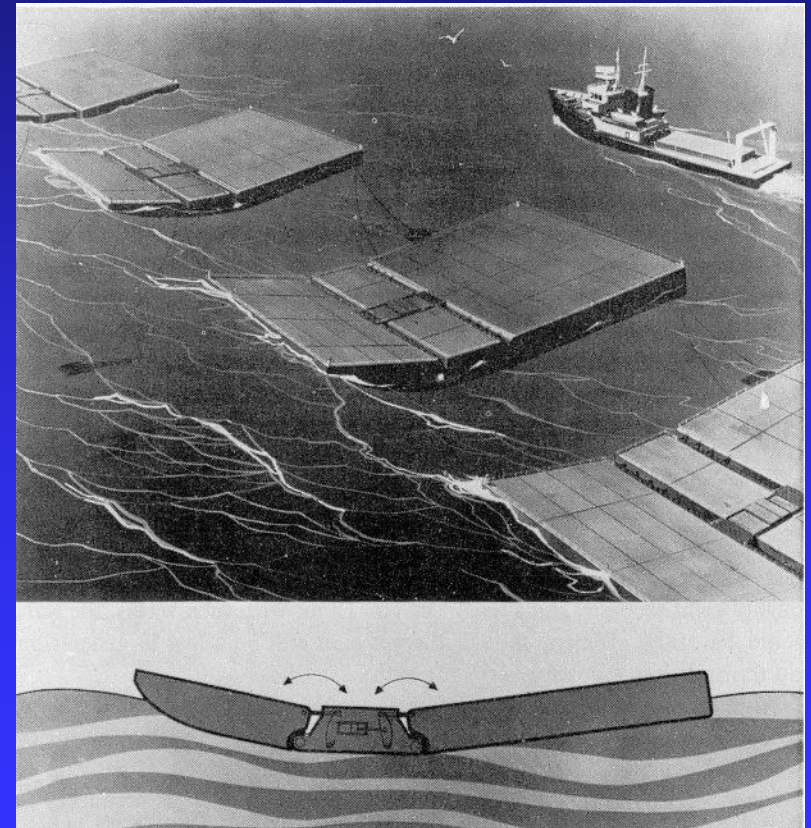
● systèmes à flotteurs

Le principe:
corps mis en mouvement
par la houle

- travail sur ancrage
référence externe



- travail sur mouvement relatif
référence interne



Les radeaux de Cockerell (1978)



Figure 7.2 The ship with a broken back. Cockerell's 1/10th scale raft working in the Solent.

- 100m de long -> 2MW
- le premier systeme a avoir effectivement produit de l'électricité à partir des vagues

WAVE STAR

(Danemark)

www.WaveStarEnergy.com



- 2004: 1/40 Wave tank tests
- 2005: 1/10 tests at sea (?)

McCabe wave pump

(Irlande)



- 1996 - prototype de 40m mis à l'eau à Kilbaha (Irl)
- 60 kW ~ 300 000m³ / an (0.2 € /m³)

FO3

(Norvège)

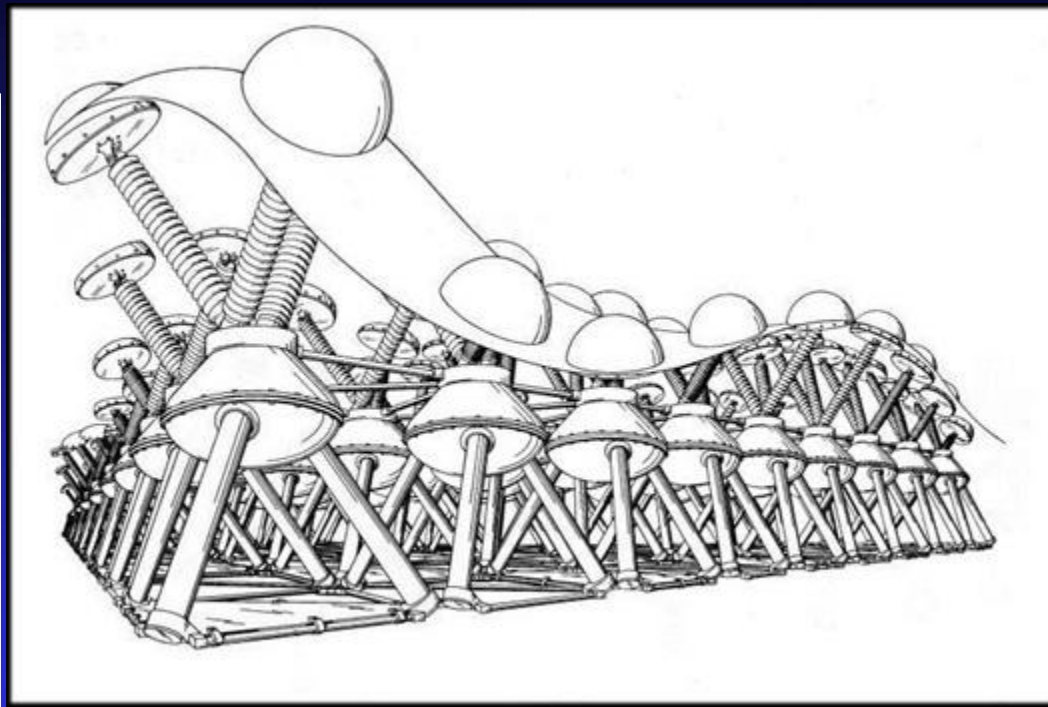
BULDRA
Prototype 1/3



- 21 flotteurs/plateforme: (1,5 à 2,5 MW) (PTO hydraulique)
- 2004 - prototype (BULDRA) ech 1/3
- 4 unités annoncées en 2007 (?)

OWEC

(brevet US 1987)



développement ?

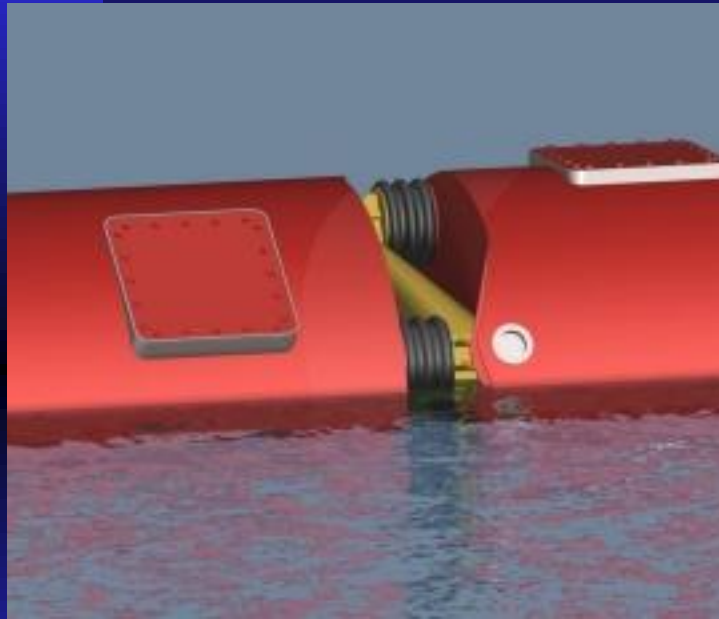
PELAMIS

Ocean Power Delivery
(Edimbourg - Ecosse) www.oceanpd.com

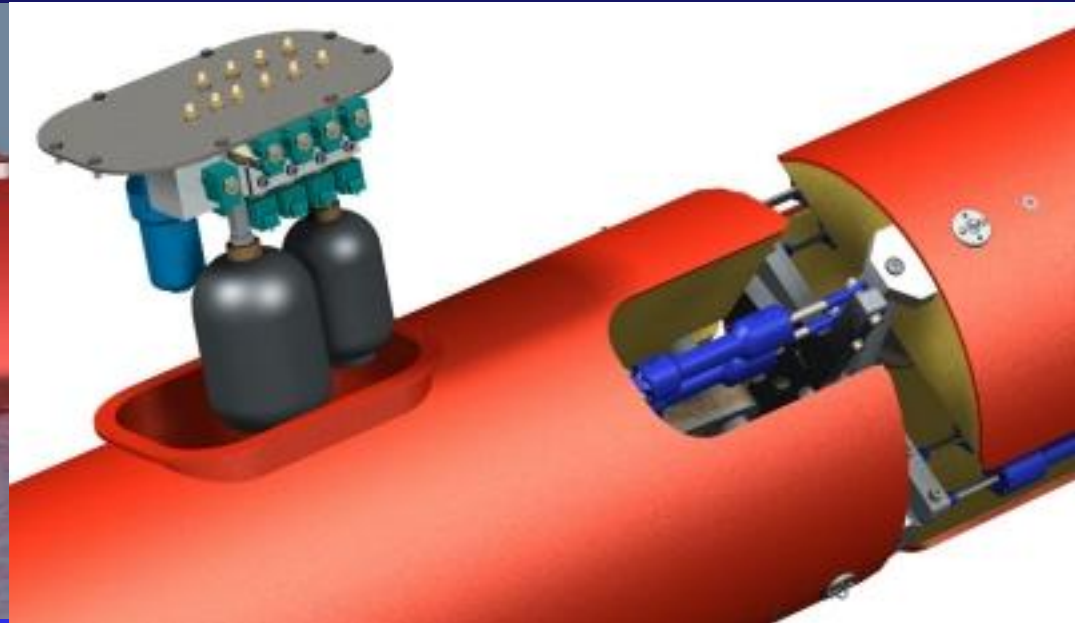


PELAMIS

Ocean Power Delivery
 (Edimbourg - Ecosse) www.oceanpd.com



Articulation 2 DoF



pompes hydrauliques + accumulateurs +
 générateur

- Contrôle: tuning ou detuning par
 precontraintes dans l'articulation

PELAMIS

Ocean Power Delivery
(Edimbourg - Ecosse) www.oceanpd.com



*Mars 2004:
Mise à l'eau*



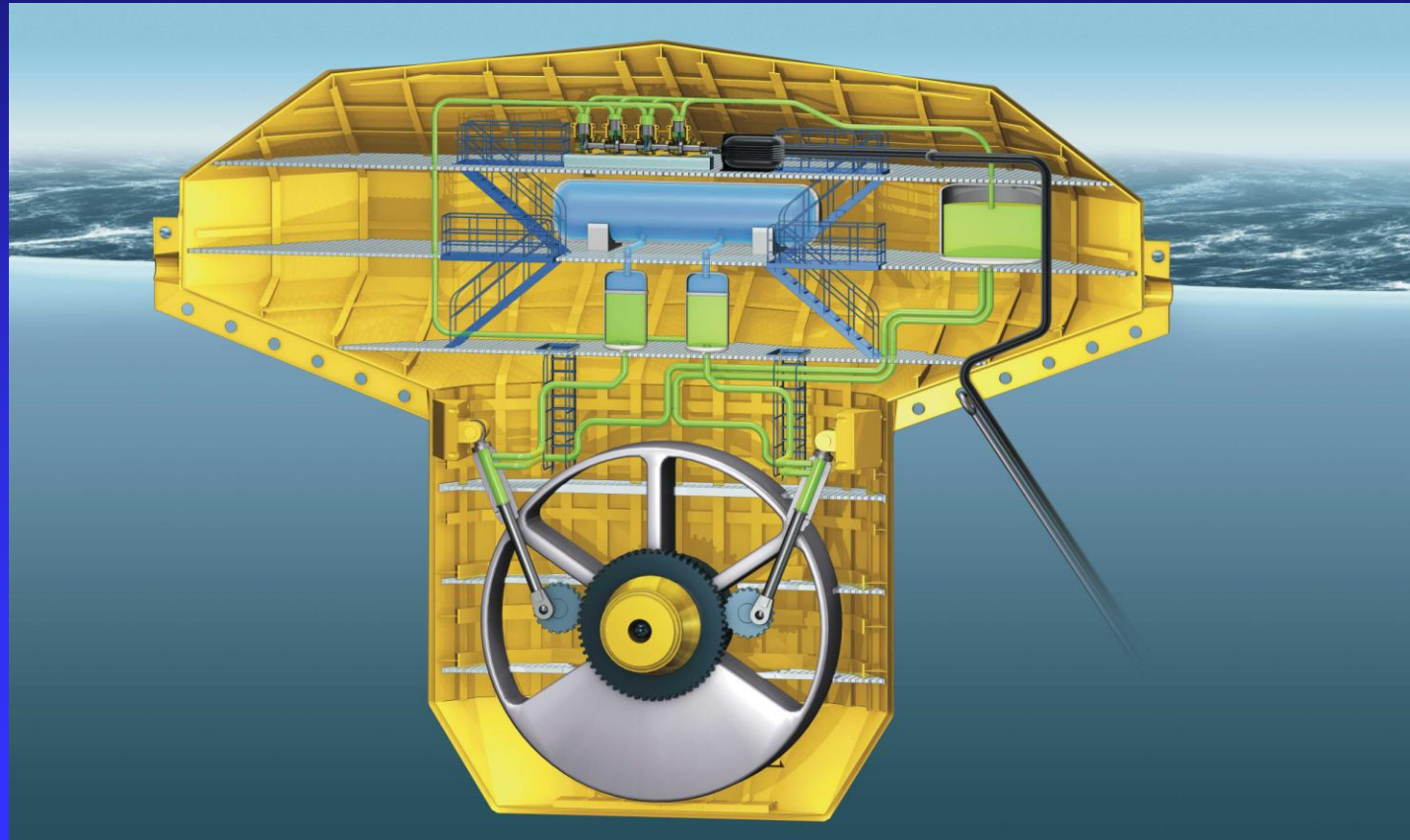
Avril 2004: premiers essais à la mer

SEAREV (FR)

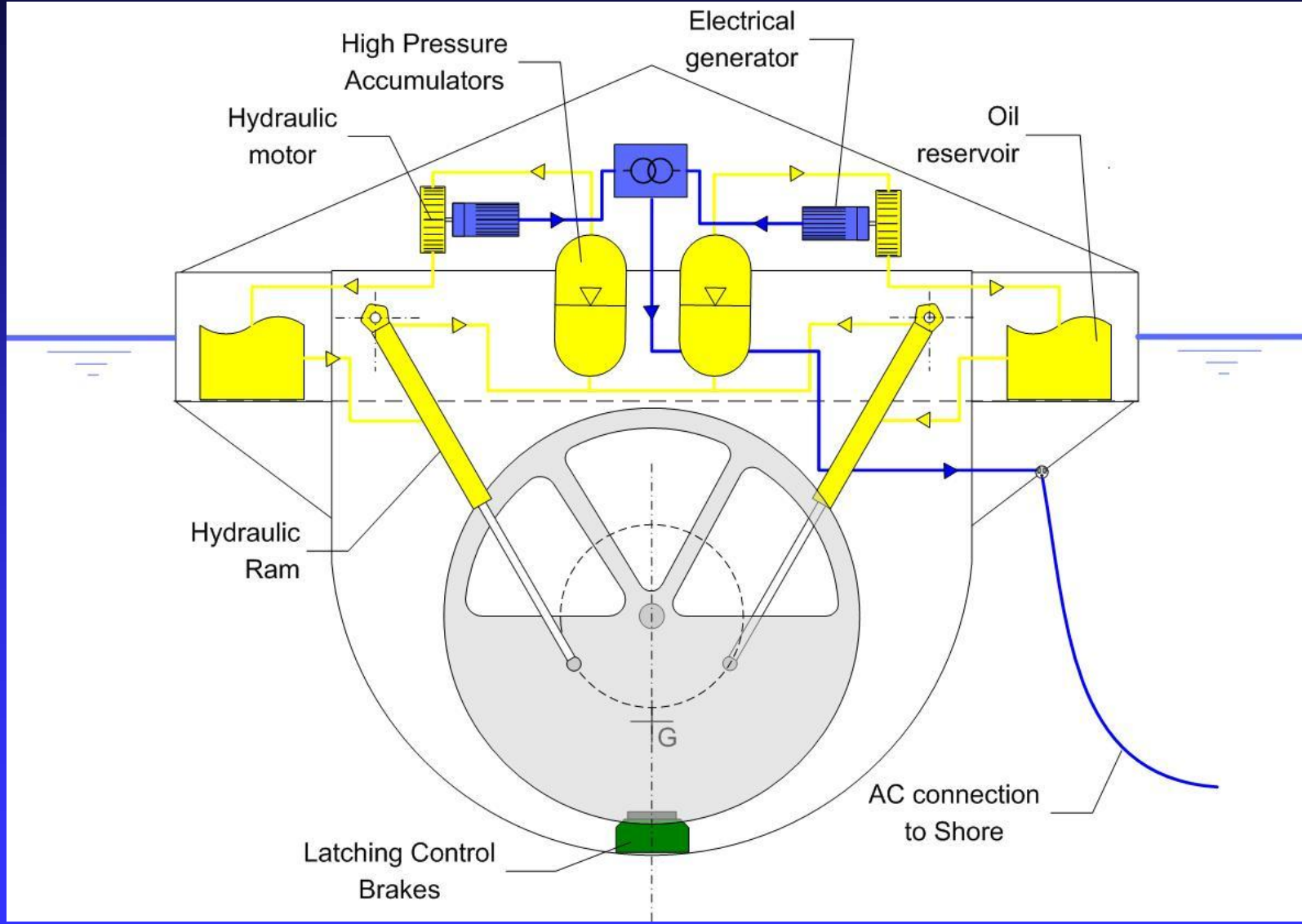
CNRS
ECN
SAIPEM
L&L TECHNOLOGIES

.....

- 25m x 15m
- 1000 T
- 500 kW
- 20 MW/km²
- $cp = 0.35$



SEAREV principe



SEAREV (FR)



- maquette au 1/12
- tests à l'École Centrale de Nantes (2006)

● systèmes posés au fond

Le principe:

- corps mis en mouvement par la houle
- le système est solidaire du fond qui fournit la référence fixe
- systèmes totalement submergés (invisibles)

AWS www.waveswing.com

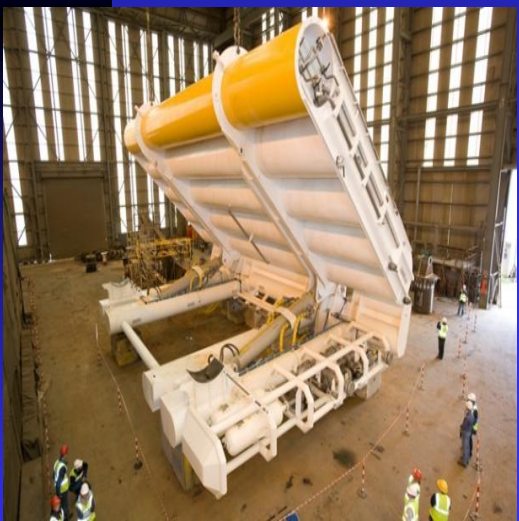
Teamwork Technology (NL)

Mise à l'eau
été. 2004
Leixoes
(Portugal)

Démonstra
teur
Échelle 1/1
2MW



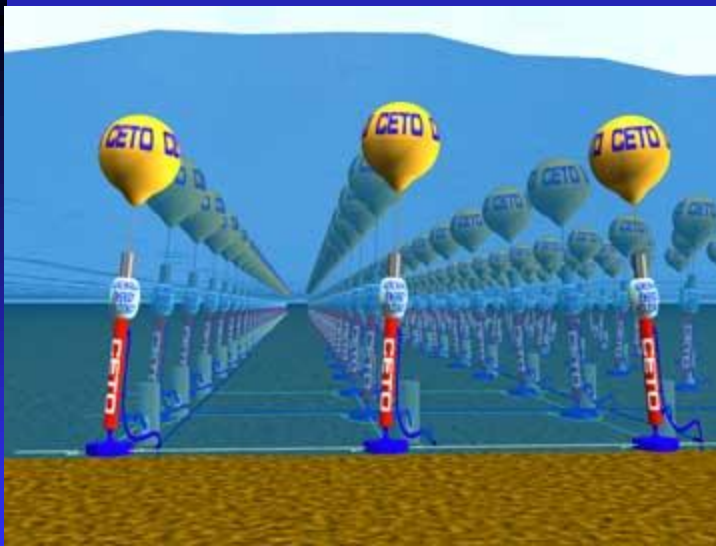
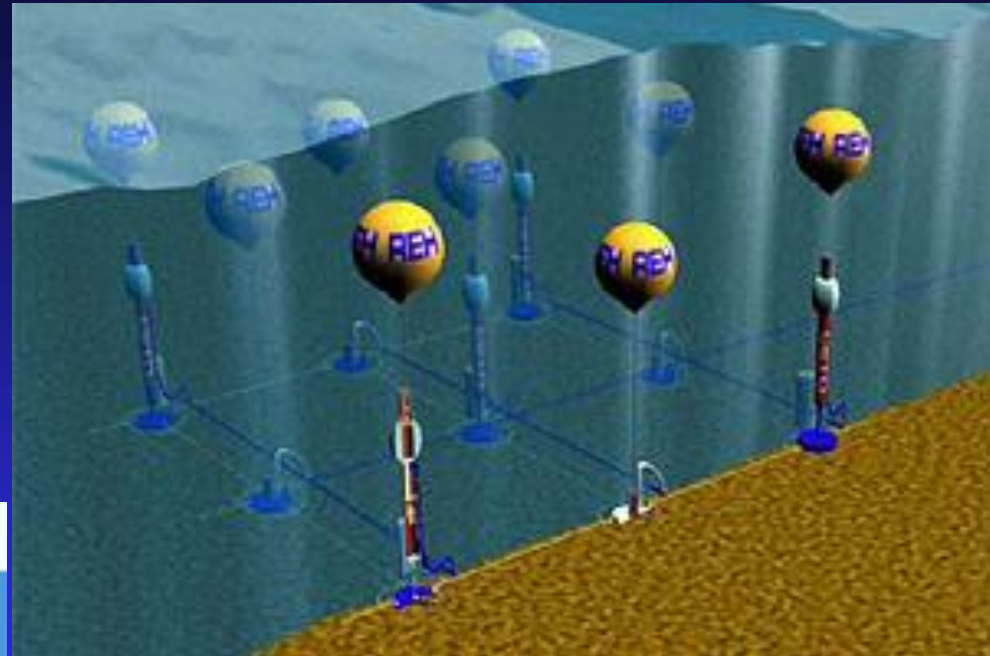
OYSTER (UK)



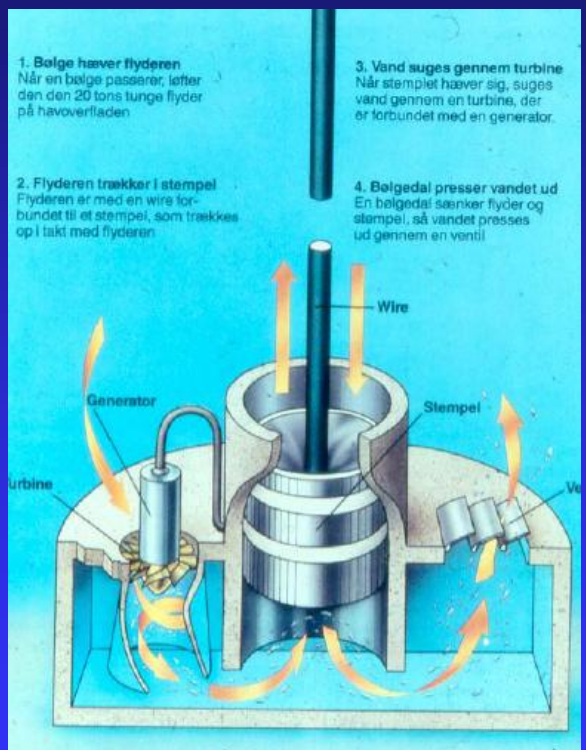
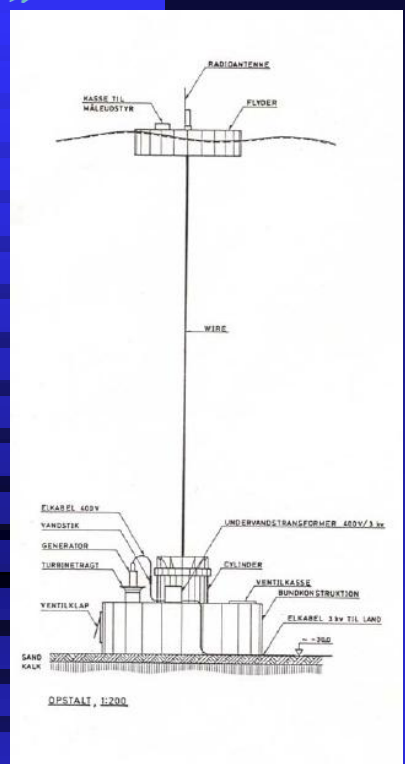
CETO

(Australie)

- pompage d'eau de mer
- turbinage à terre (Pelton)
- et/ou eau douce (osmose inverse)

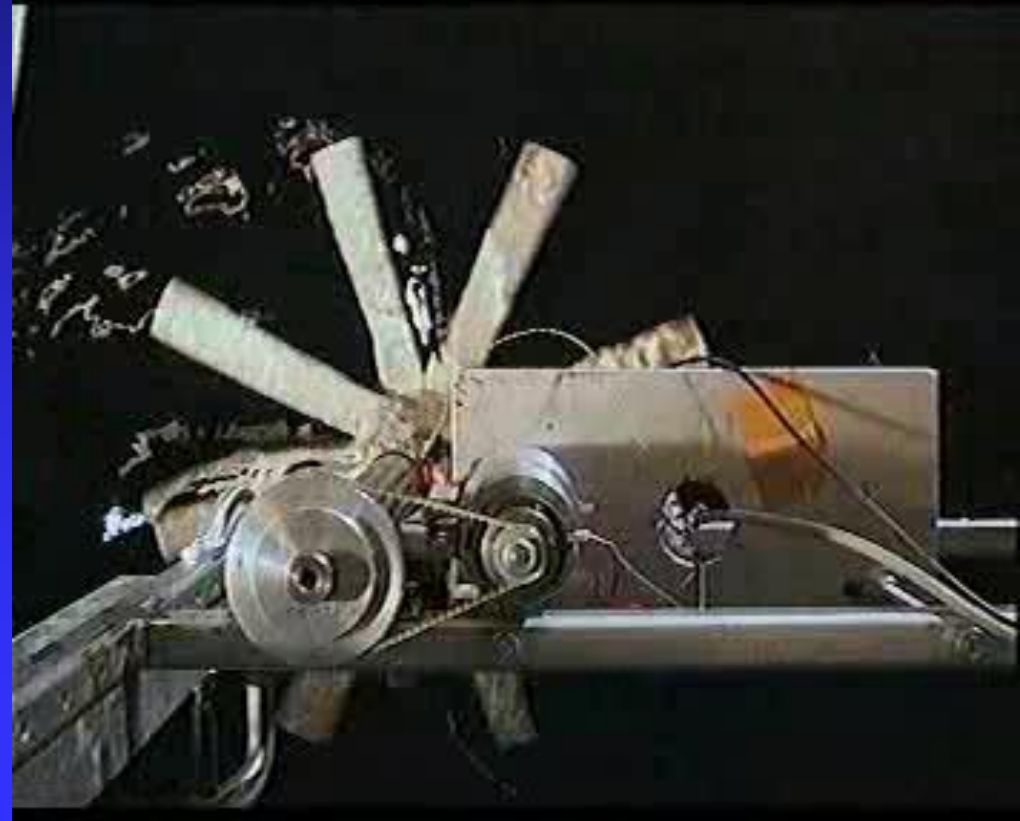
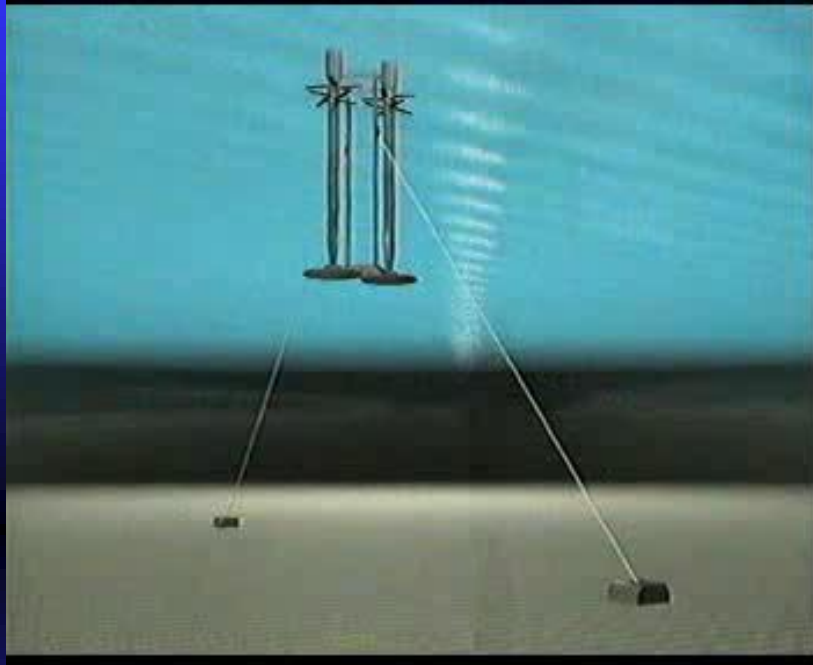


Danish Wave Power (Danemark) 1998



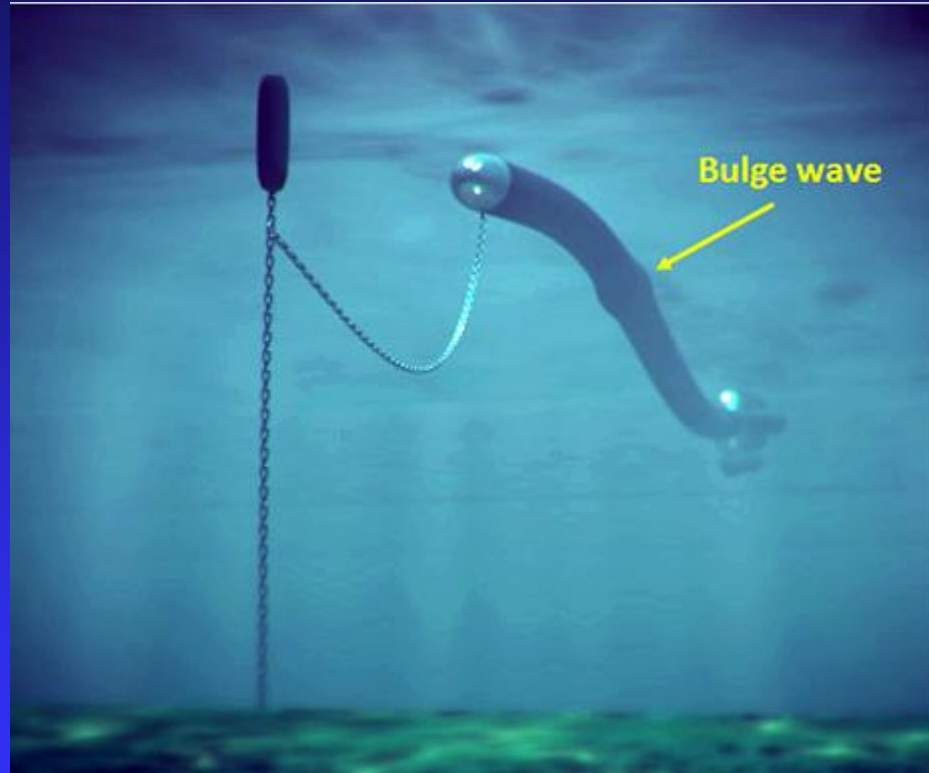
● diamètre ~ 8m : 20kW

Les « INCLASSABLES »



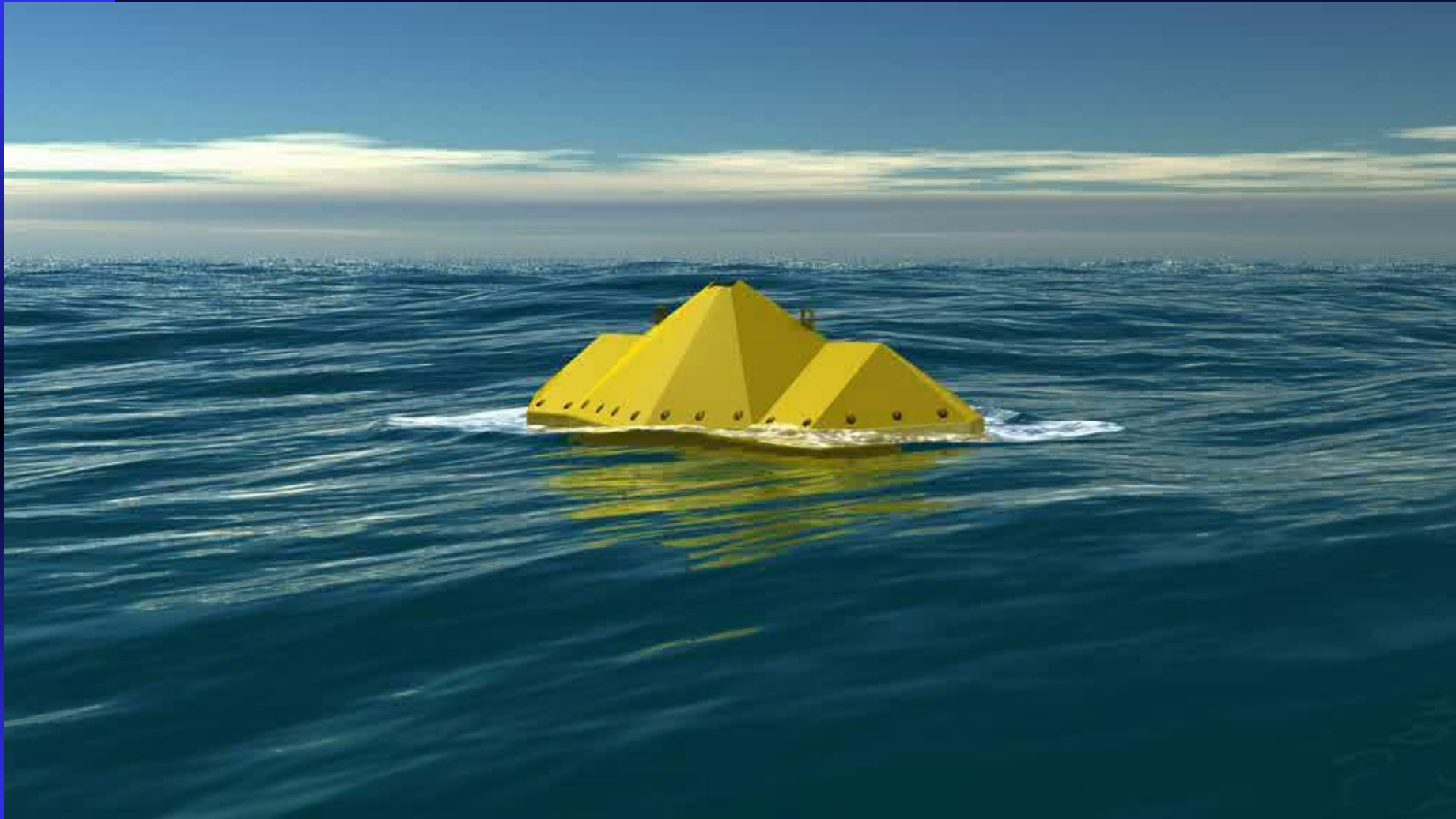
Les « INCLASSABLES »

ANACONDA (UK)



www.bulgewave.com

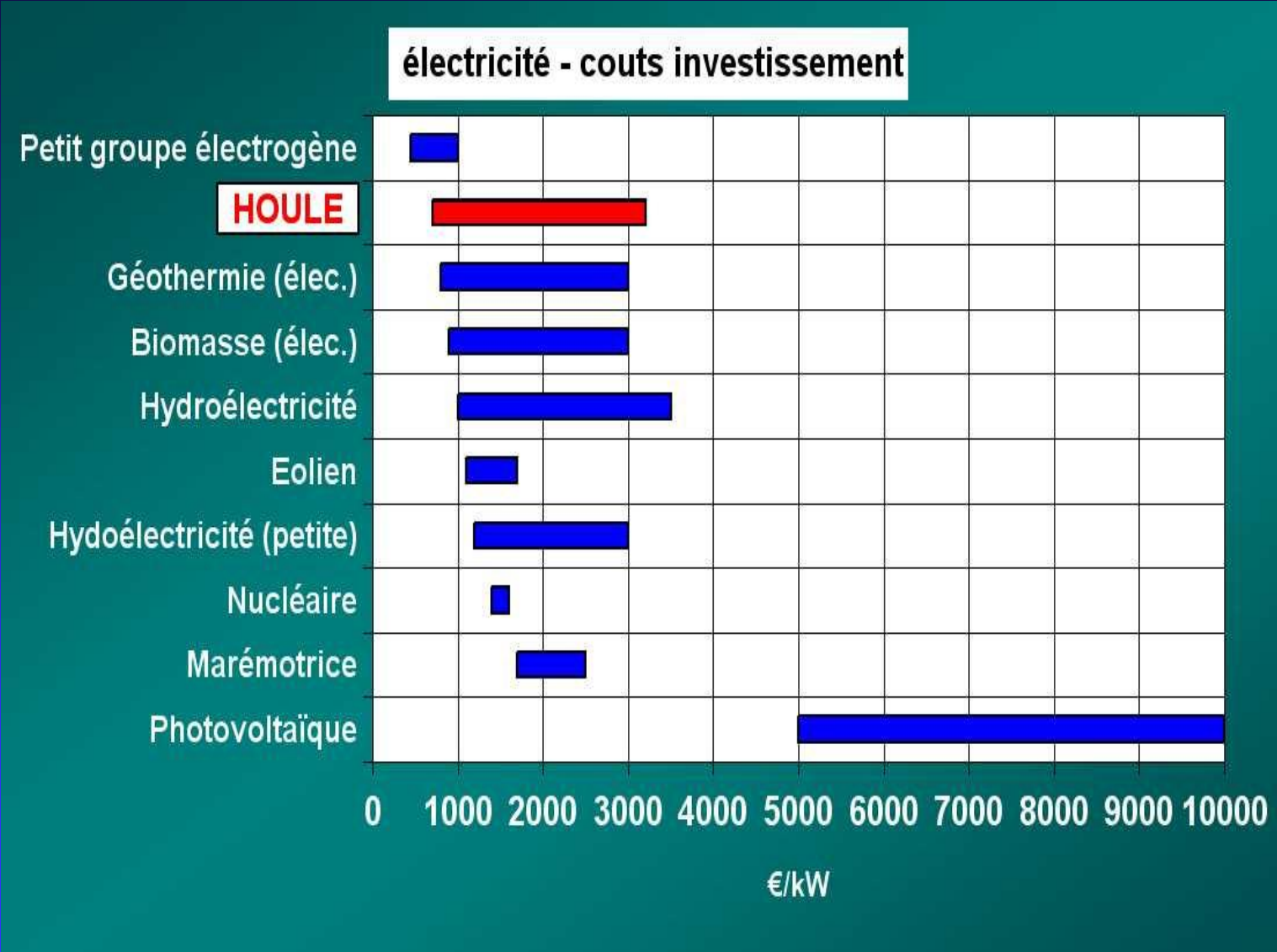
THALASSO-ENERGIES - 6000 MW en 2020?



MERCI DE VOTRE ATTENTION

Données économétriques

investissement / kW installé



Données économétriques

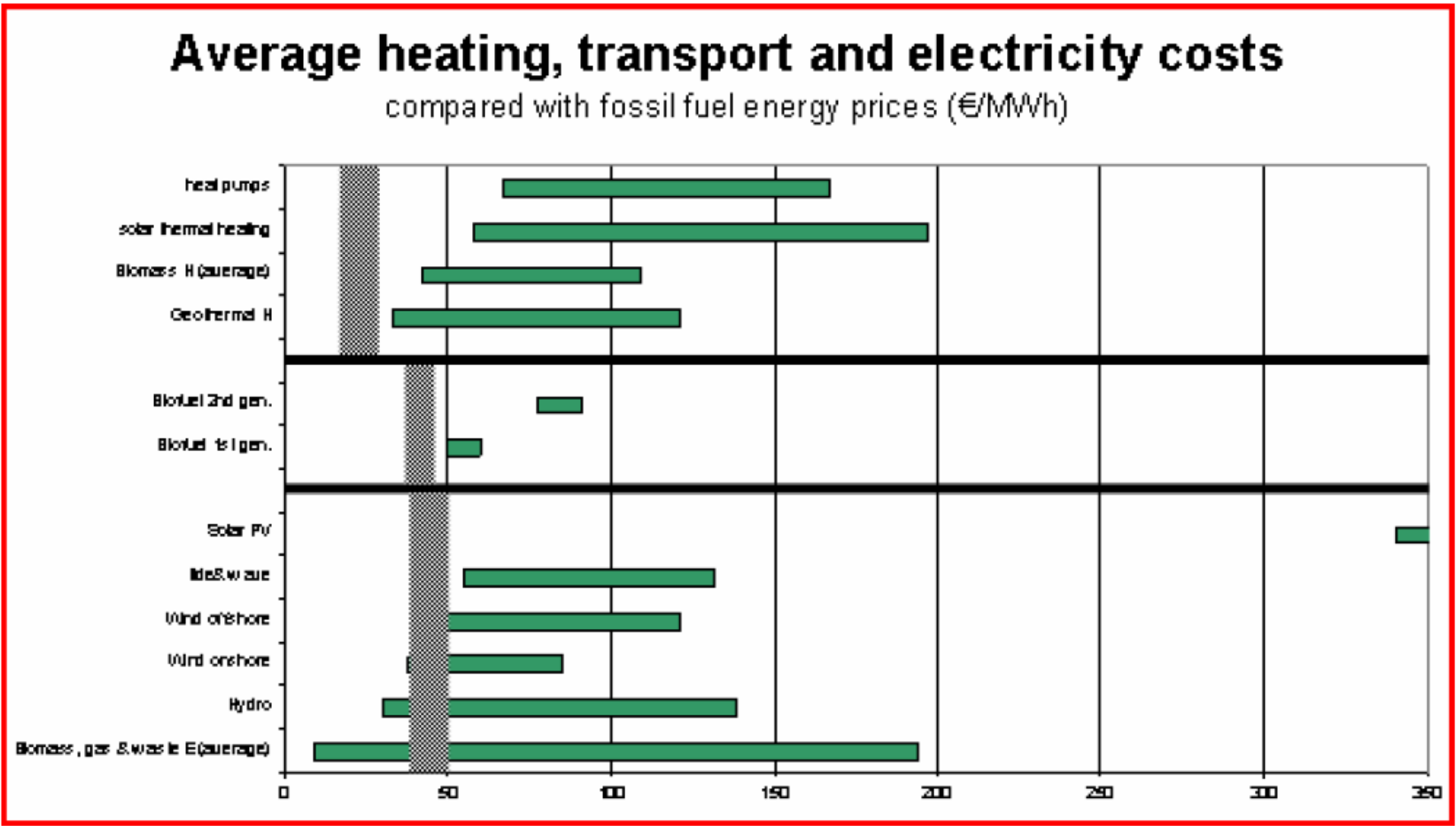


Figure 3: Average heating, transport and electricity cost (€/MWh)²⁶

Source : Commission Européenne 2007

Données économétriques

Average heating, transport and electricity costs compared with fossil fuel energy prices including external costs (€/MWh)

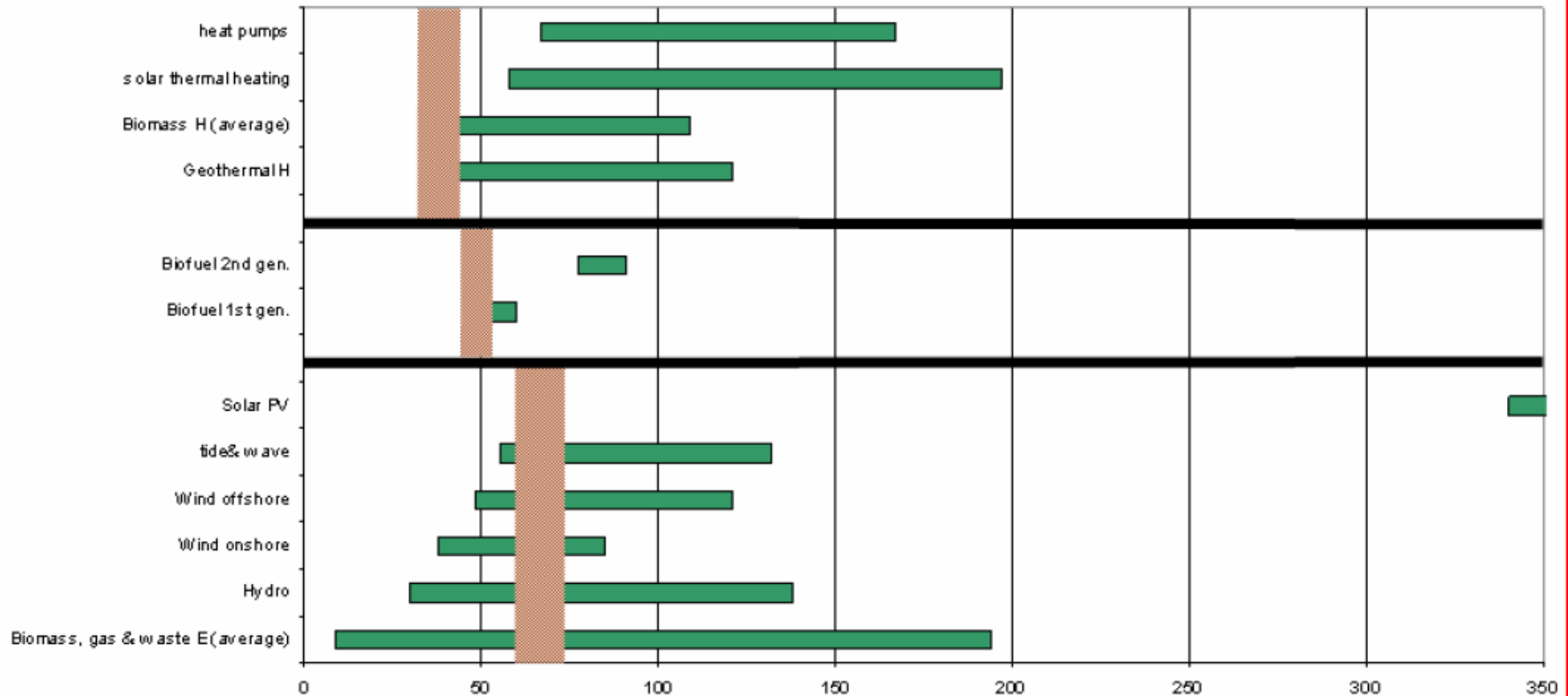
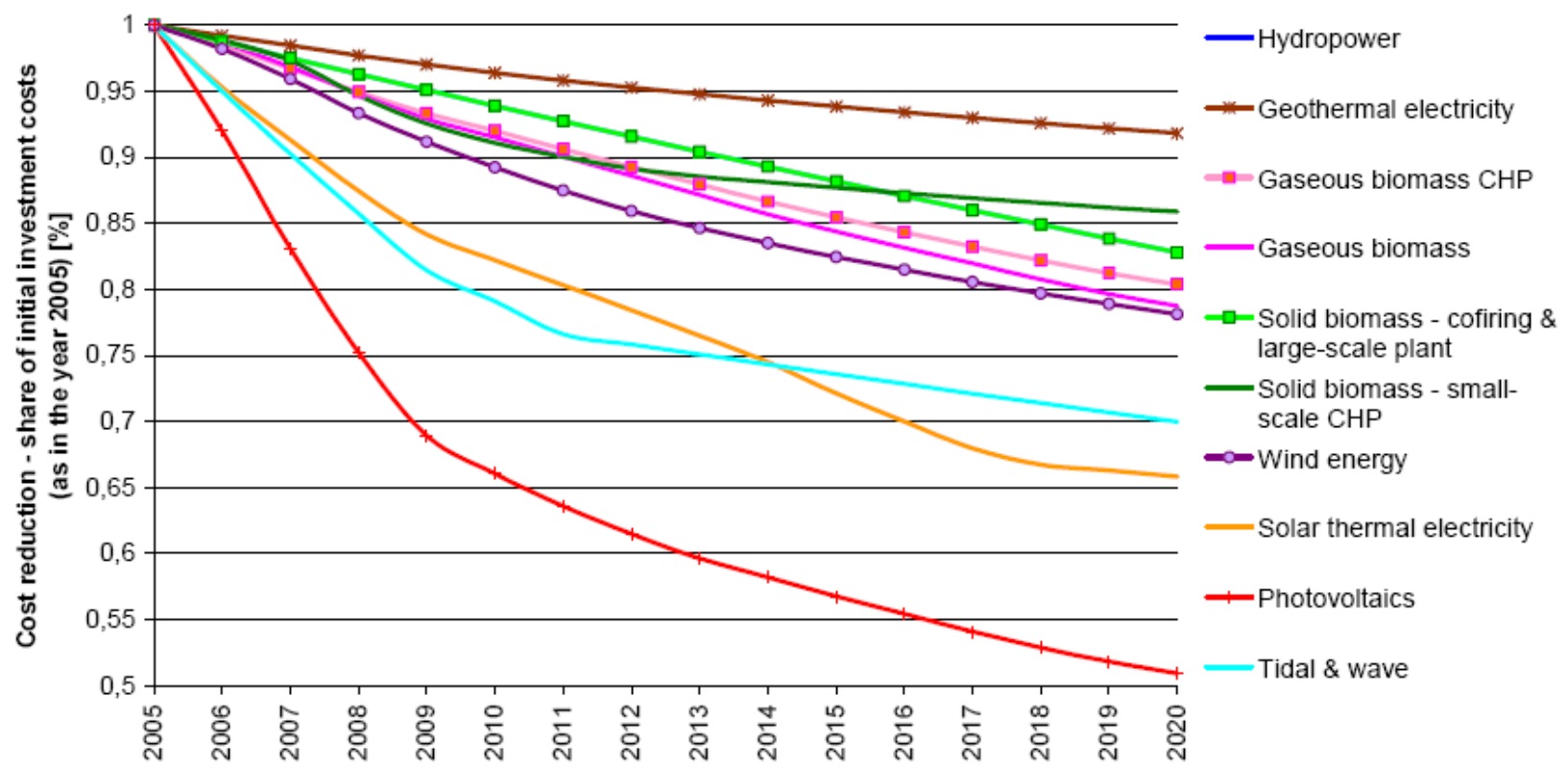


Figure 4: Average heating, transport and electricity cost including external cost (€/MWh)

Source : Commission Européenne 2007

Données économétriques

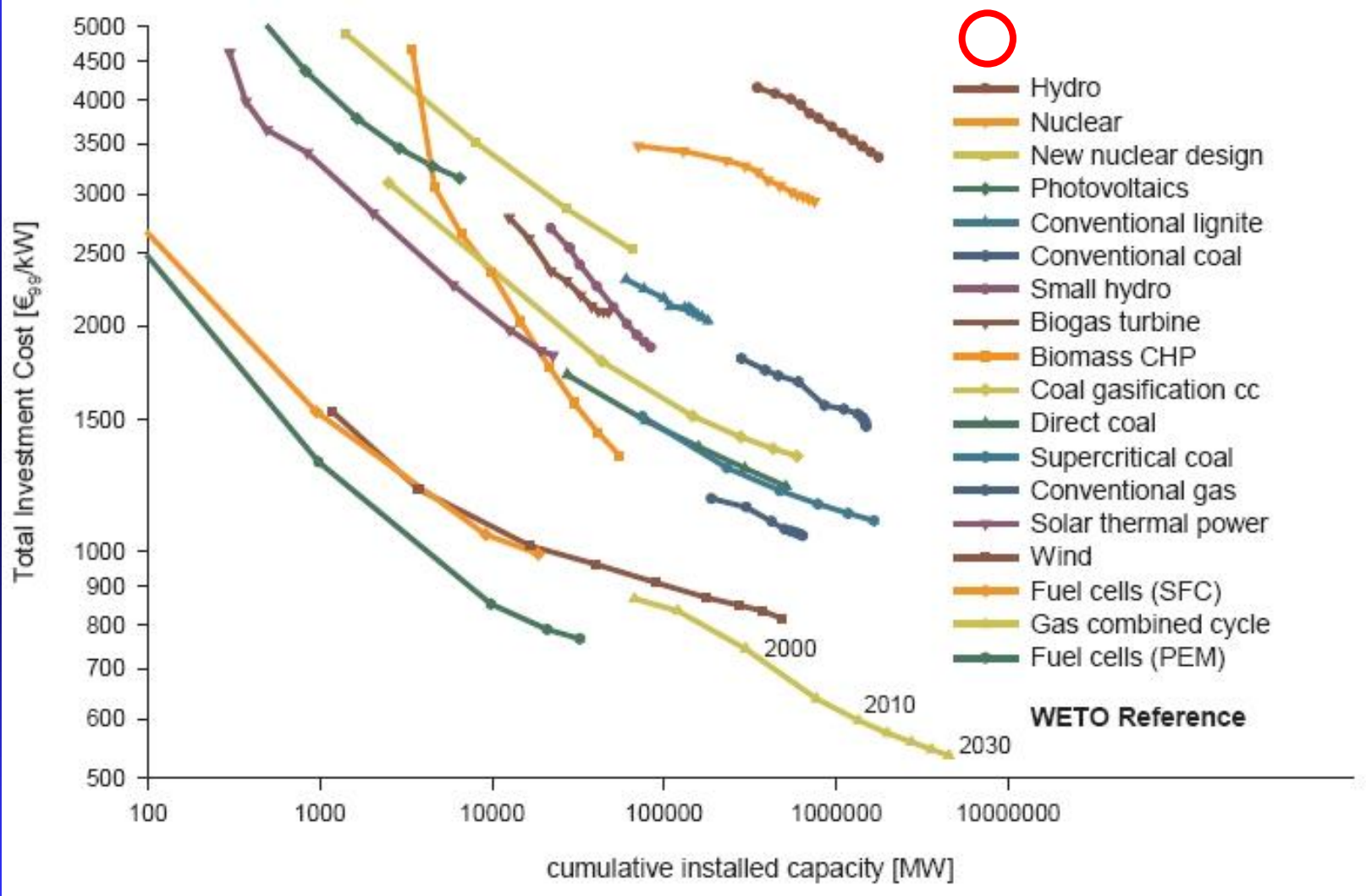
Figure 3: Estimated rate of unit cost reduction for renewable electricity generation technologies.



Source : Commission Européenne 2007

Données économétriques

Courbes d'apprentissage technologies énergétiques



Source: Commission Européenne 2003

Données économétriques

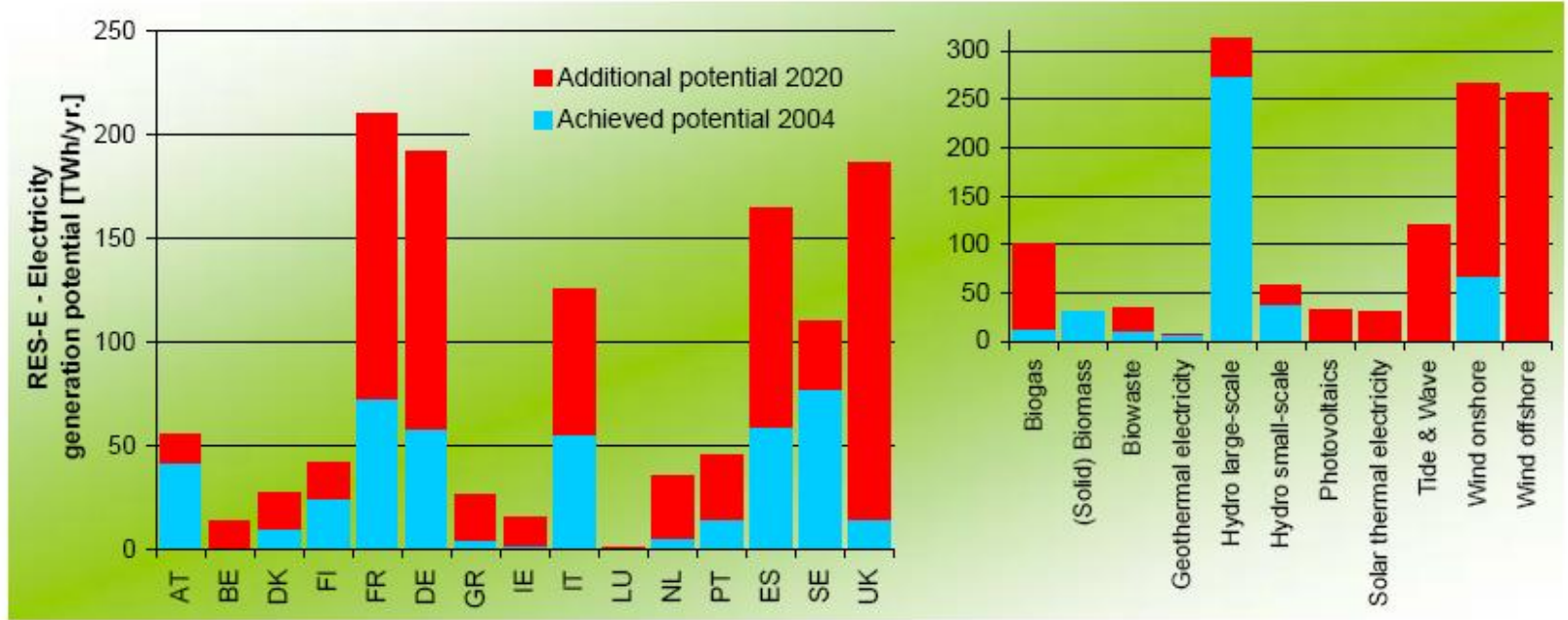
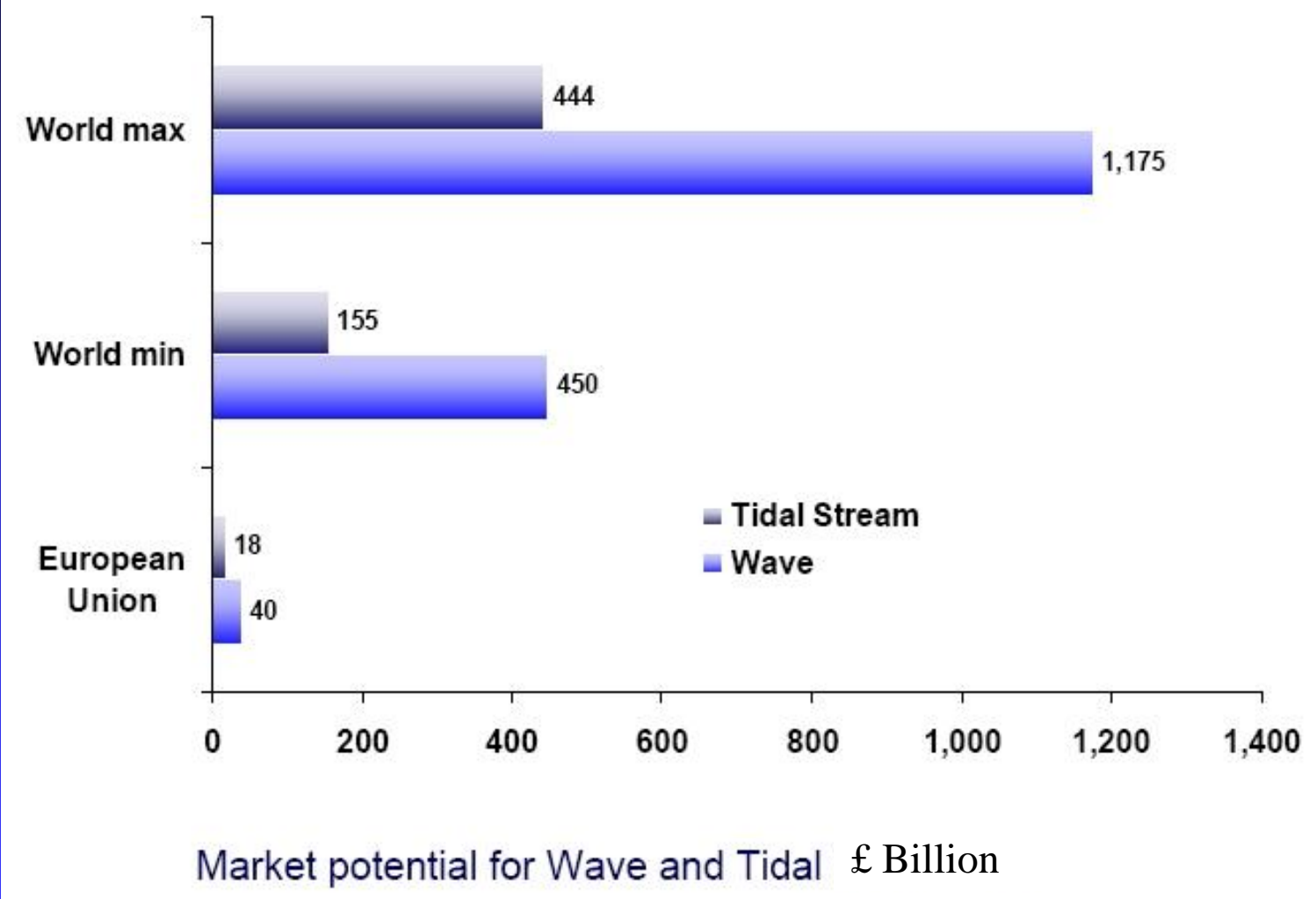


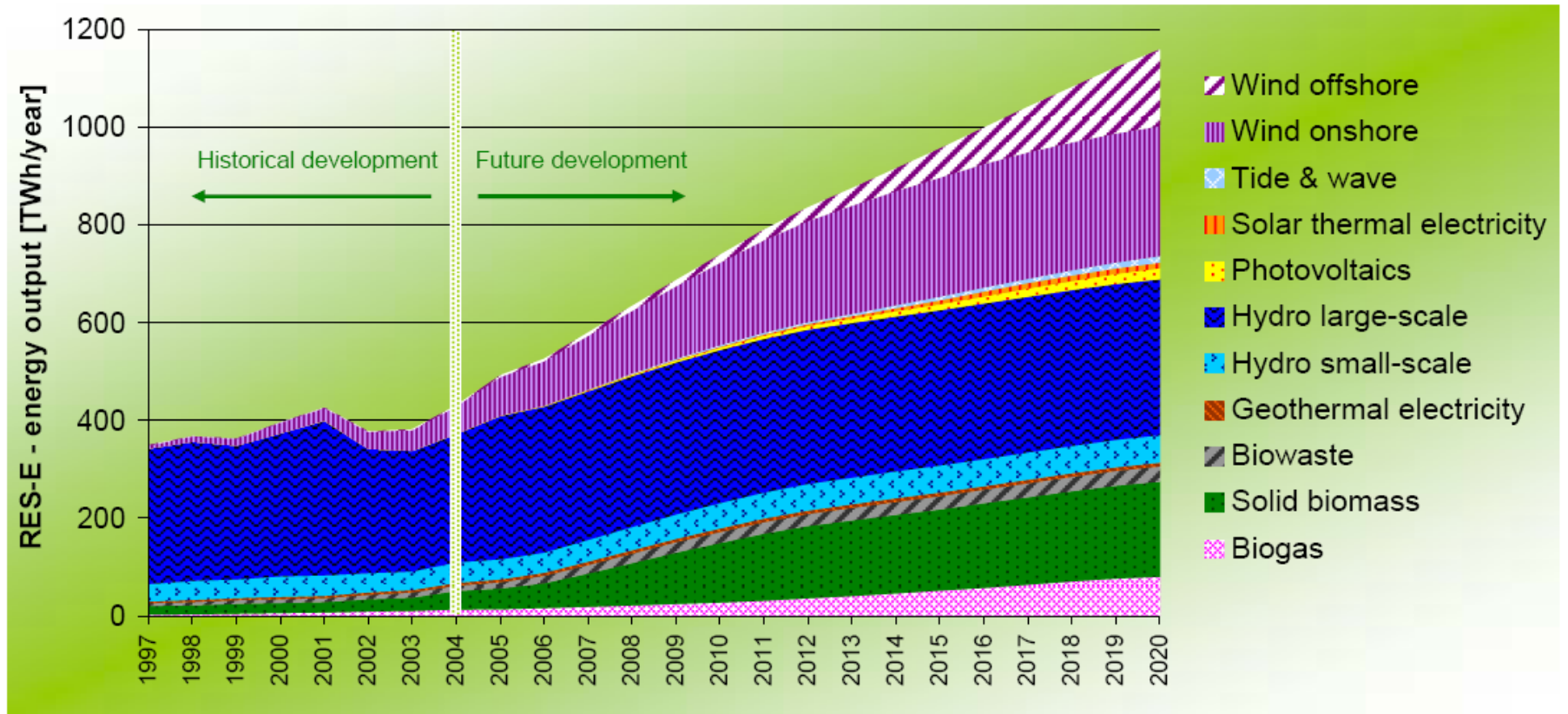
Figure 7⁶⁵ Achieved (2004) and additional mid-term potential 2020 for electricity from RES in EU-15 – by country (left) and by RES-E category (right)

Houle et courant – marché global estimé



Données économétriques

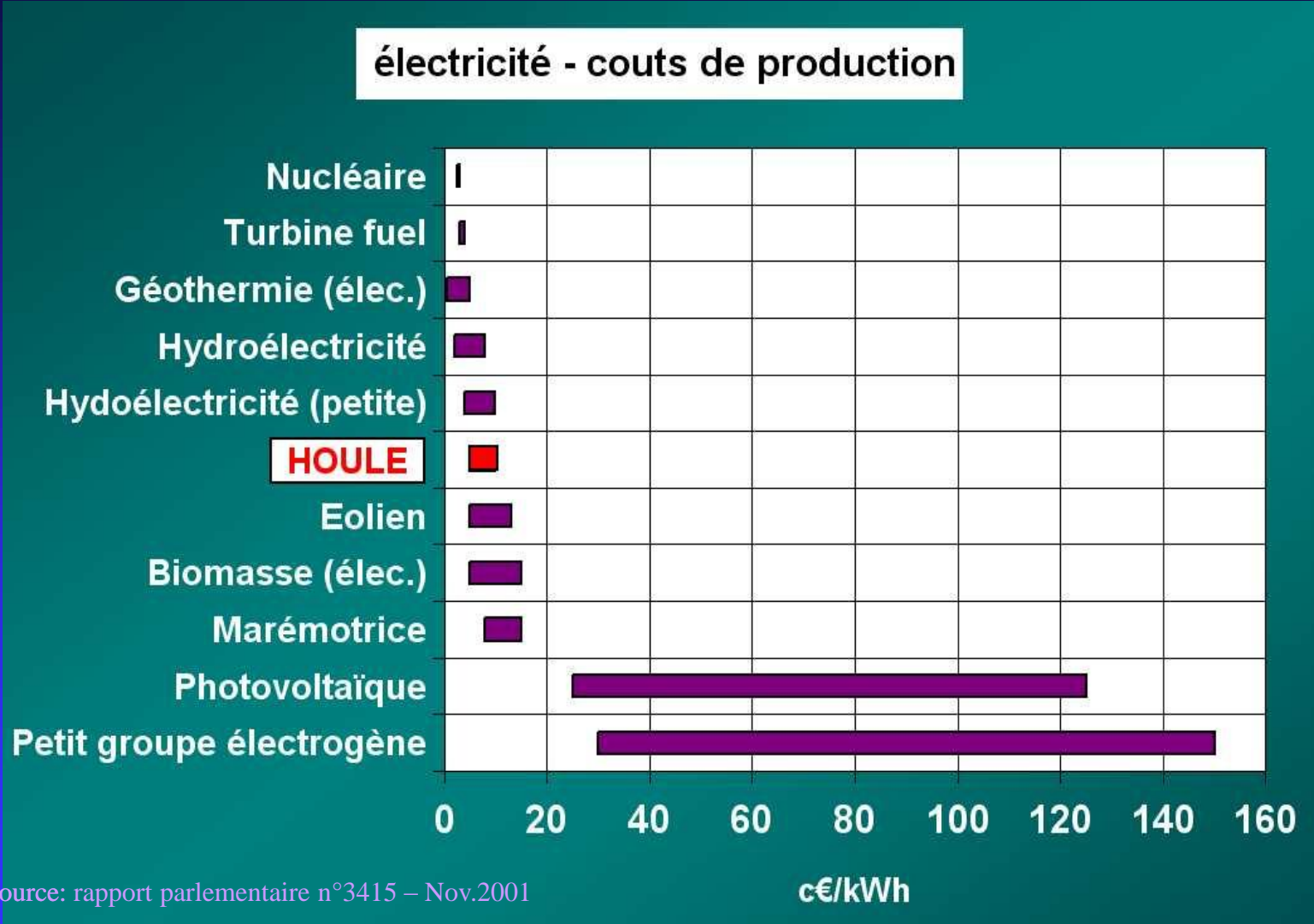
Renewables growth: Electricity projections by 2020



Source : Commission Européenne 2007

Données économétriques

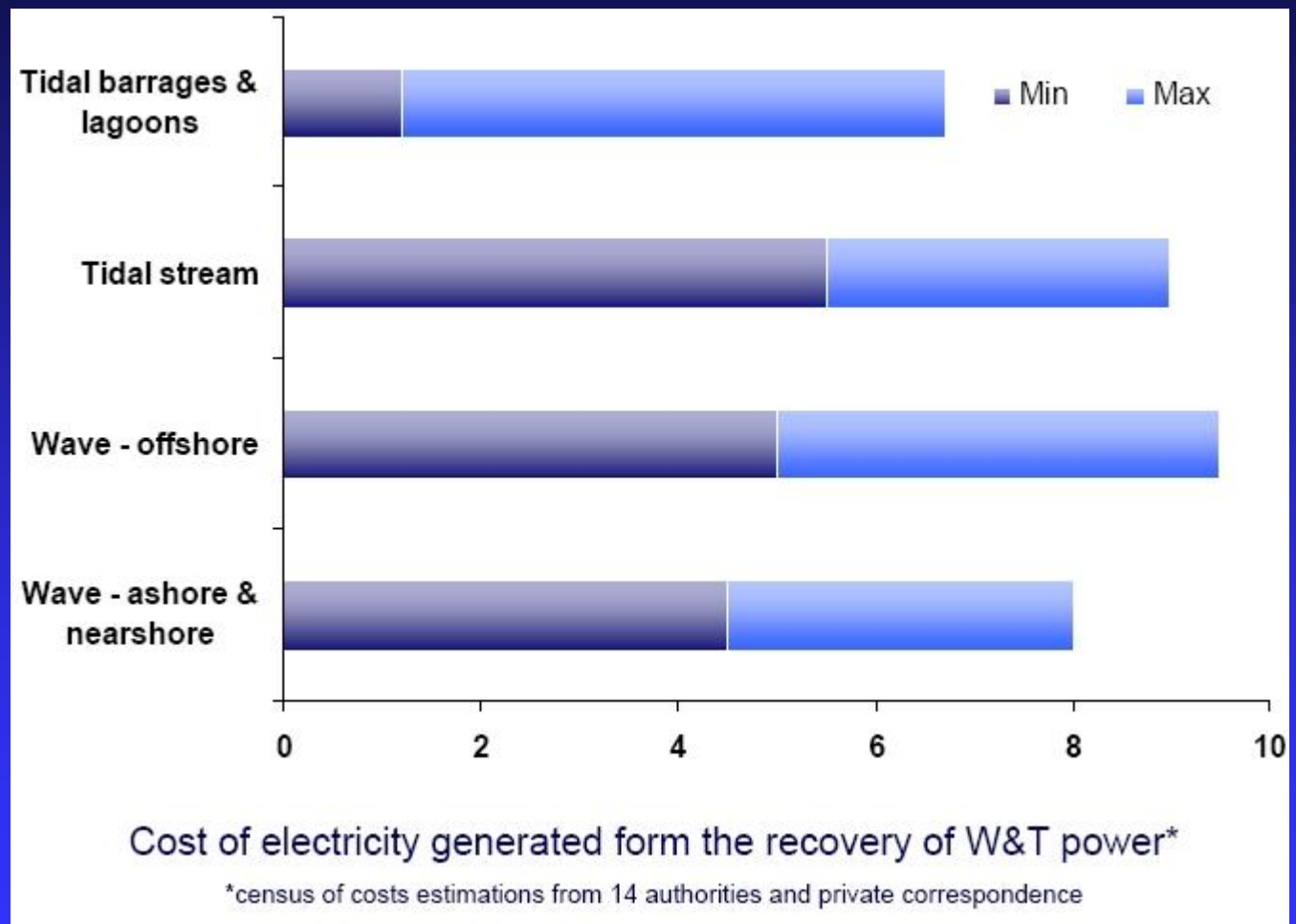
coûts de production du kWh



Source: rapport parlementaire n°3415 – Nov.2001

Houlomoteur / hydrolien

coûts de production du kWh



Source: Douglas-Westwood 2006

Données économétriques

Coûts de production électricité selon la ressource

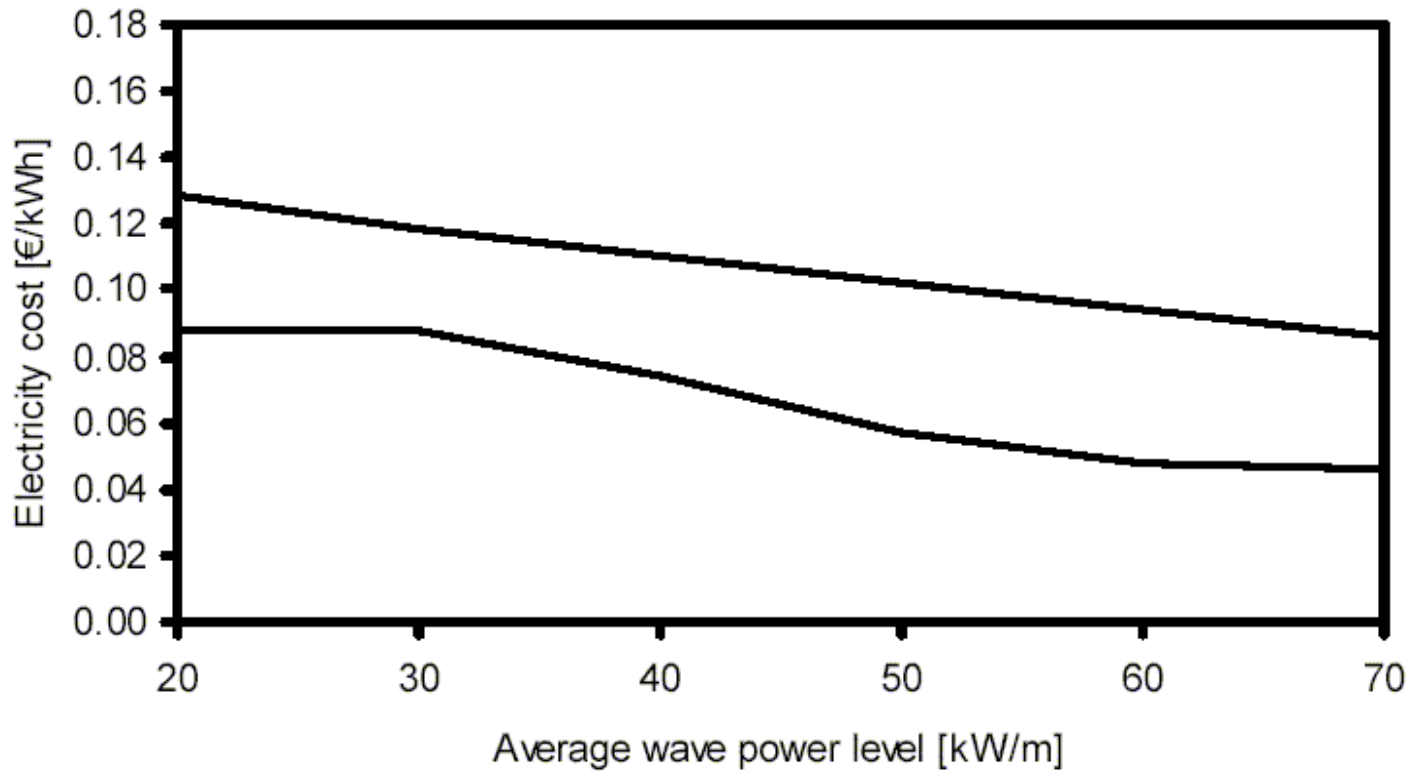


Figure D-6 Range of Likely Generating Costs for Point Absorbers (@8 % Discount Rate)

Projet ENERGIE des VAGUES

Pourquoi à Nantes ?

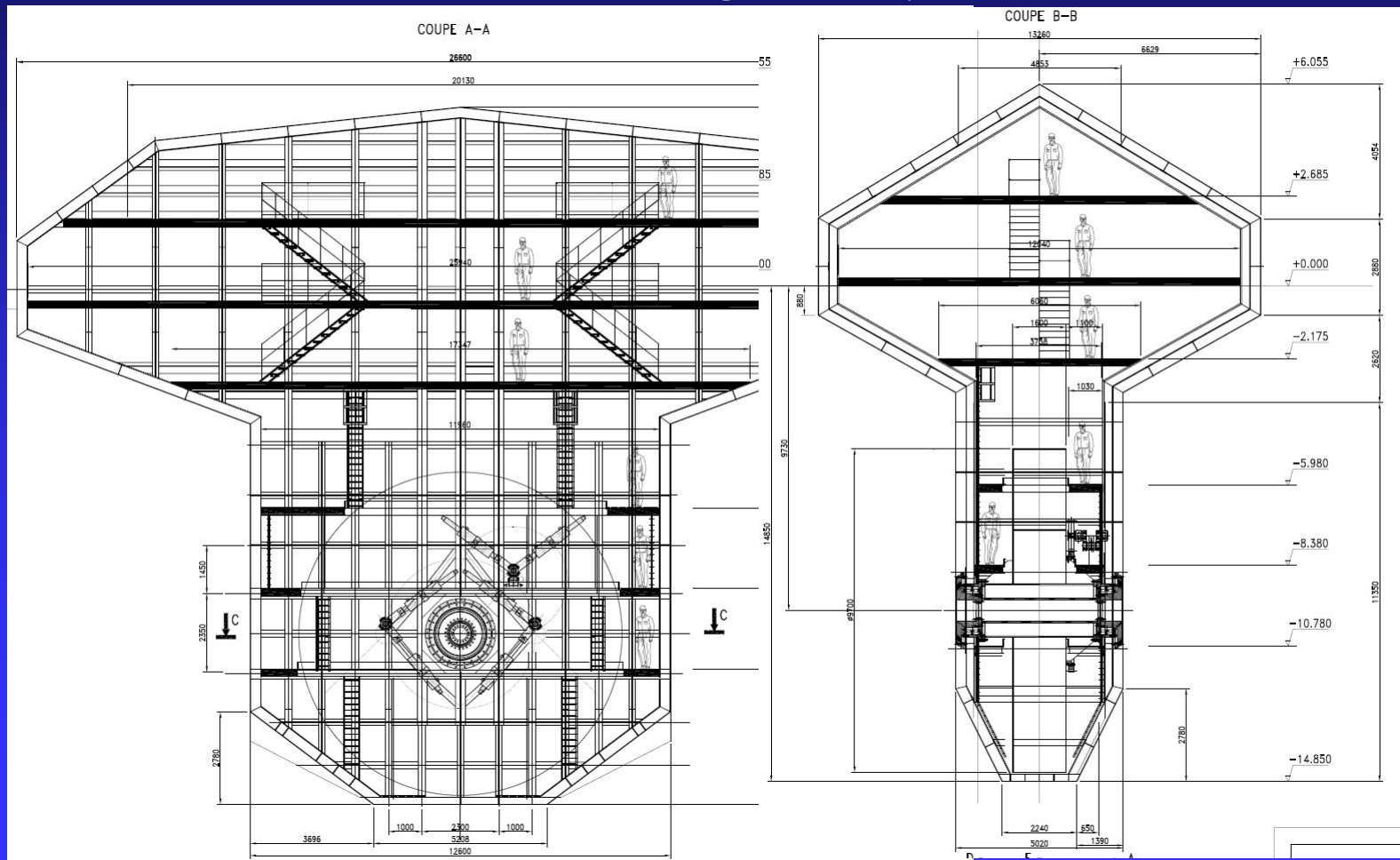
- LMF (ECN): seul pôle scientifique français sur le sujet
- moyen expérimentaux (nouveaux bassins) parfaitement adaptés
- collaborations déjà actives sur le sujet avec d'autres labos régionaux et étrangers
- Nantes-St Nazaire : Pôle R&D naval/Offshore

Where we are

Full scale prototype to be tested at sea in 2008

Industrial companies already involved in the pre-design of the prototype

✓ 1000T, 26m long, 14m depth, 500kWe



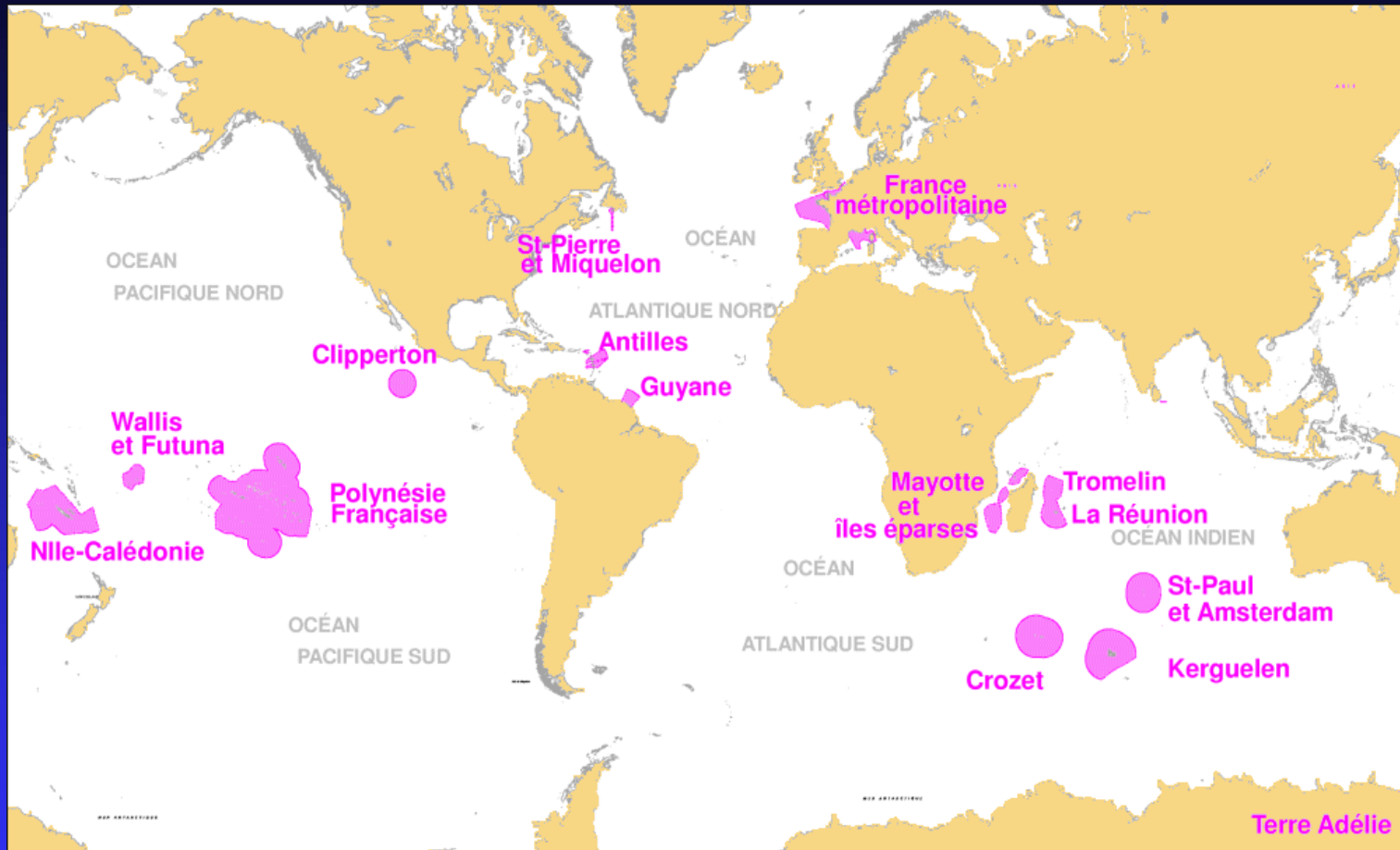
interest from & contact with



Électricité en FRANCE

- ✓ Consommation moyenne foyer domestique: **14 kWh/jour**
- ✓ Puissance électrique installée: **120 GW** (20 kW/h)
- ✓ Énergie électrique consommée (2000): **450 TWh**
dont 17% énergies renouvelables
- ✓ Objectif 2010 (Directive Européenne): **550 TWh**
dont **21%** énergies renouvelables

Facteurs géographiques



La France est un grand pays maritime (10 millions km²)
Essentiellement dans les mers du Sud

« 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)

L'énergie des vagues au L.M.F

1981

Centrale à déferlement de *Maré* (N.Calédonie)

1985

Systèmes à cuve embarquée, à masse mobile, ..

Modélisation théorique/numérique des systèmes à flotteurs

1993

Absorption dynamique des ondes de gravité

Contrôle adaptatif sous-optimal des récupérateurs

Application aux systèmes OWC

2000

Modélisation numérique (fréquentiel) systèmes OWC (*Pico*)

Modélisation numérique time-domain non-linéaire OWC

2002

Étude des instabilités des systèmes pendulaires submergés (AWS)

2002

Lancement du projet **SEAREV**

2006

Expertise d'autres projets (européens)

2009

Modélisation numérique de fermes houlomotrices

2009 relance du projet **SEAREV**

1983 -> 2009 : 10 thèses au LMF

1983

M. Spiridakis *Récupération de l'énergie des vagues par les systèmes à déferlement*

1993

C. Maisondieu *Absorption dynamique des ondes de gravité en régime instationnaire*

1999

G. Chatry *Développement, optimisation et simulation d'une méthode de régulation auto-adaptative pour un système de récupération de l'énergie des vagues (co-tutelle IST)*

2000

A. Brito e Melo *Modélisation de la centrale pilote européenne de récupération d'énergie des vagues de Pico (Açores) (co-tutelle IST)*

2002

C. Josset *Simulation numérique en domaine temporel d'une centrale houlomotrice par une méthode couplée Rankine/Kelvin*

2005

A. Babarit *Optimisation hydrodynamique et contrôle optimal d'un récupérateur d'énergie des vagues*

2006

J.C Gilloteaux *Mouvements de grande amplitude d'un corps flottant en fluide parfait. -Application à la récupération de l'énergie des vagues*

2009

J.B. Saulnier *Climatologie fine des systèmes de vagues pour l'étude des systèmes houlomoteurs*

2011

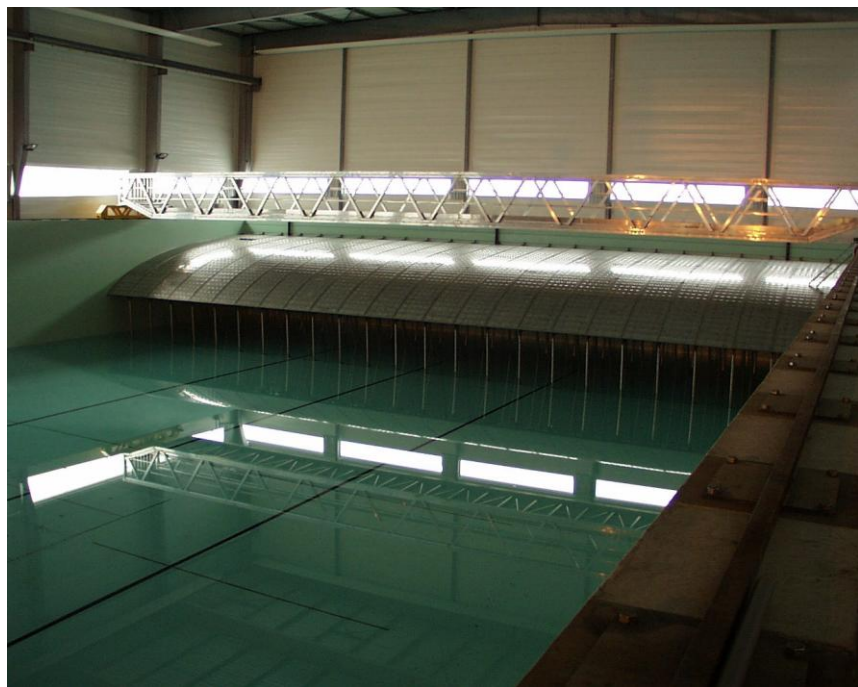
B. Borgarino *Simulation et pilotage de ferme de récupérateurs de L'Energie des Vagues*

M. Bindher *Simulation numérique de l'hydrodynamique non-linéaire 3D des systèmes houlomoteurs*

Énergie des vagues: Partenaires du LMf

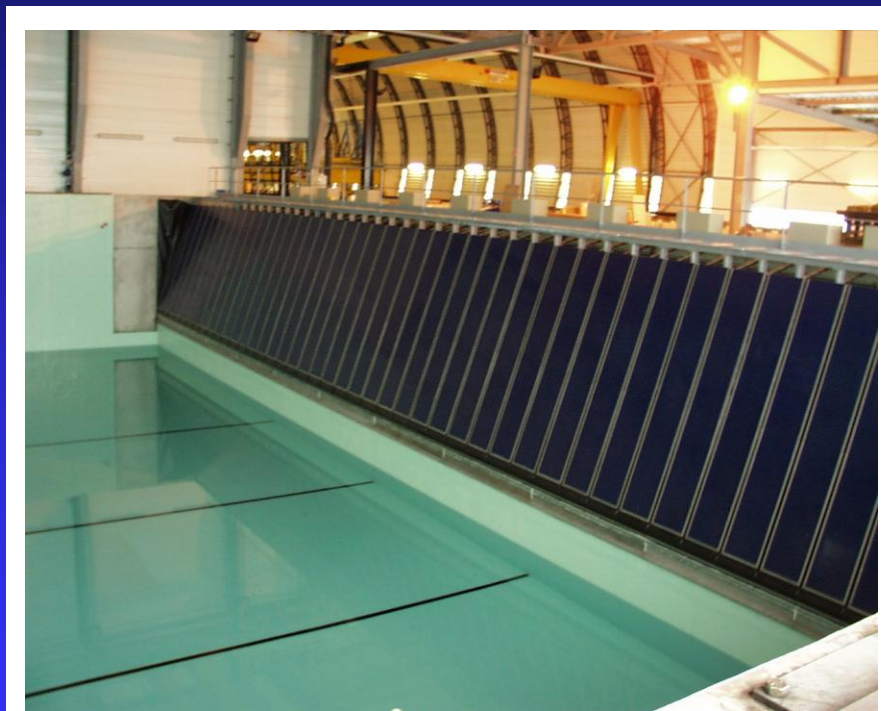
- IFREMER (CNEXO -> 1983)
- INSTITUTO SUPERIOR TECNICO (Lisbonne -PT)
Pr.Sarmiento, Pr.Falcao, Dr.Brito-Melo
- INETI (Lisbonne -PT)
Dr. T.Pontes, Dr. P. Justino
- WAVE ENERGY TECHNOLOGY CENTER (Lisbonne -PT)
Pr.Sarmiento
- UNIVERSITE UCC de CORK (IR)
Pr. T.Lewis, Pr. G.Thomas, Dr. Y.Delauré
- NTNU (Trondheim, NV)
Pr. J.Falnes, Dr. J. Hals
- TEAMWORK TECHNOLOGY - AWS - (NL)
F.Gardner
- Ocean Power Delivery (OPD – PELAMIS)
R. Yemm

La nouvelle cuve à houle du L.M.F



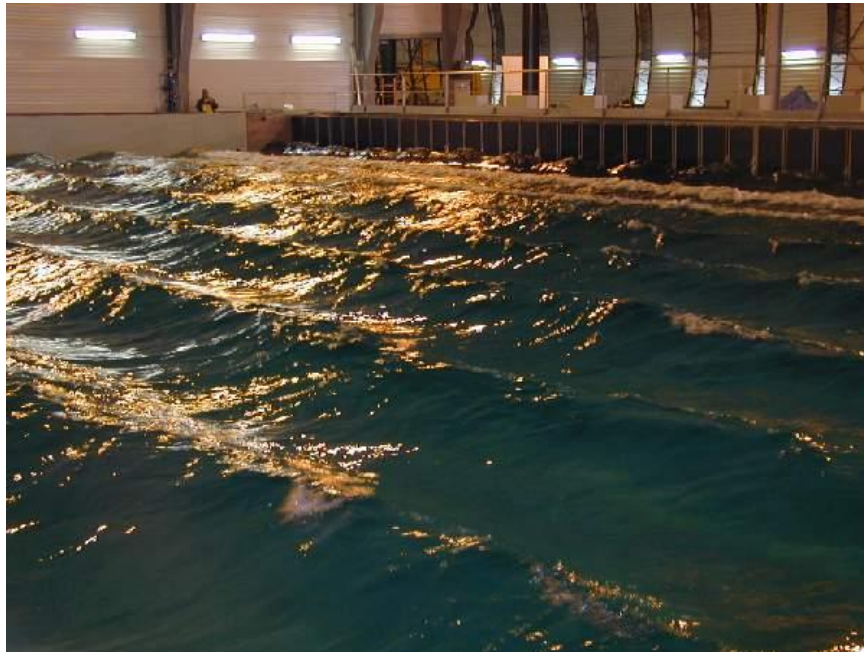
Le 18/09/2001

30mx50mx5m



Le 18/09/2001

La nouvelle cuve à houle du L.M.F



Decembre 2001

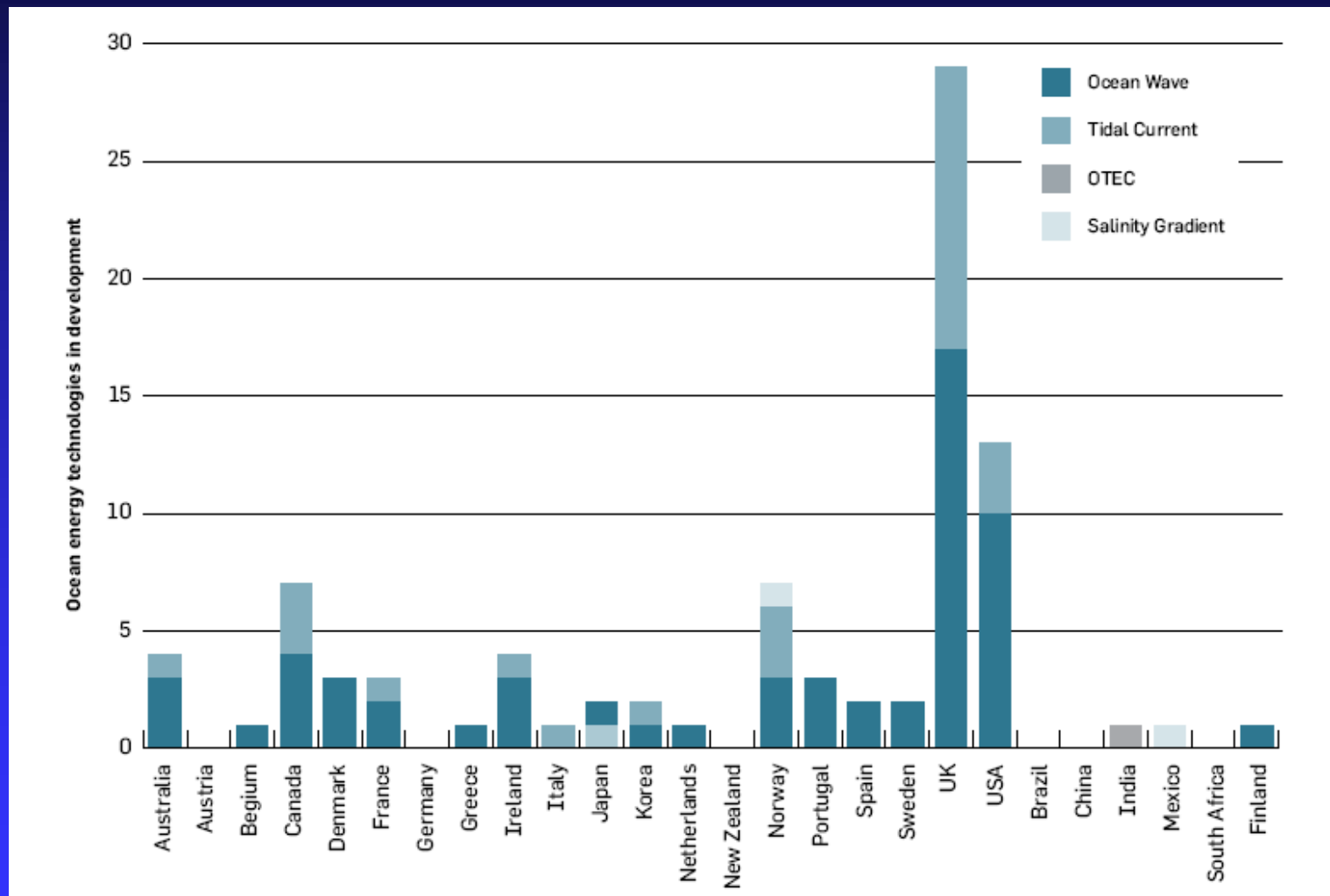


Decembre 2001

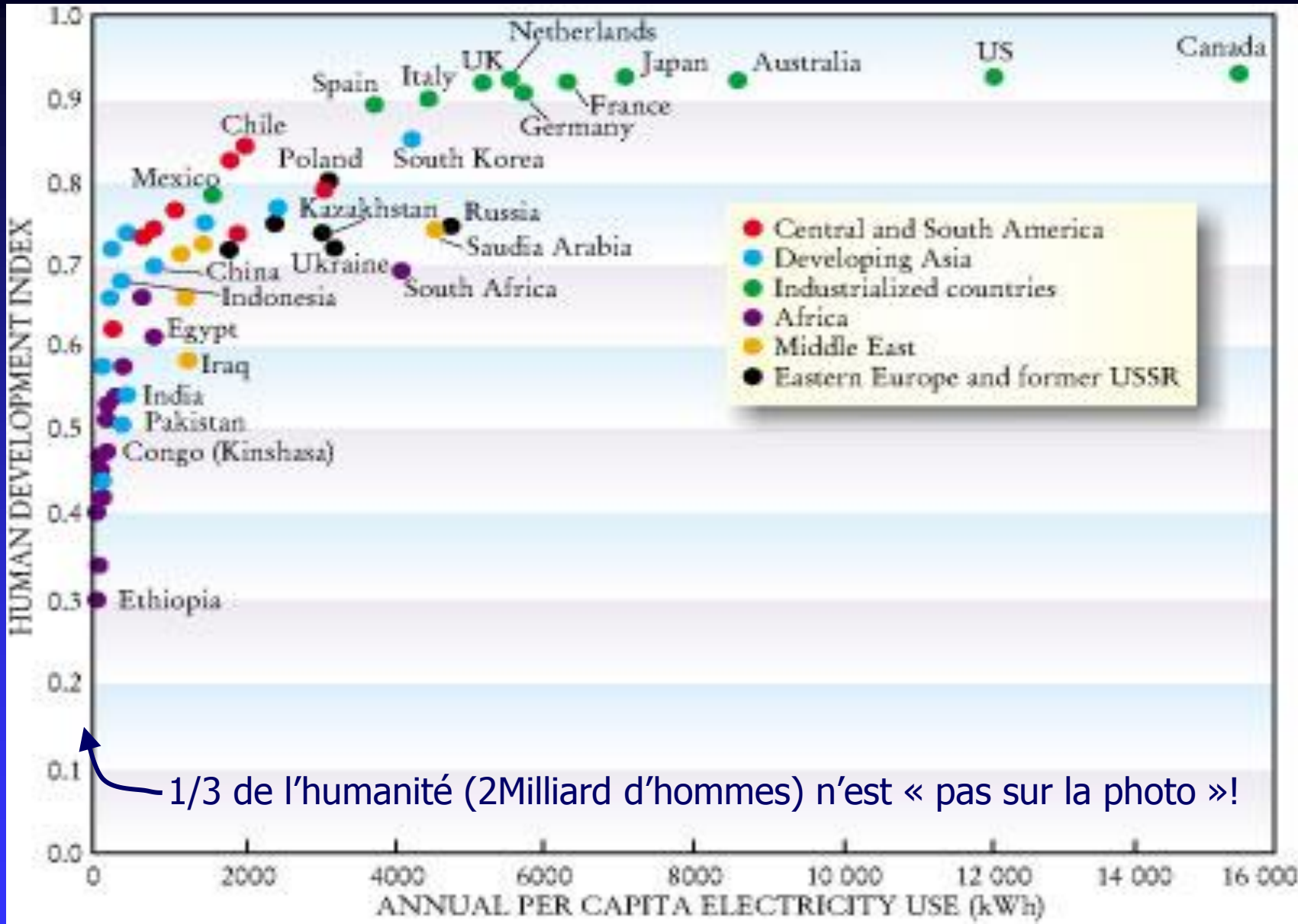
30mx50mx5m

Données économétriques

Technologies en développement (houle et courant en 2006)

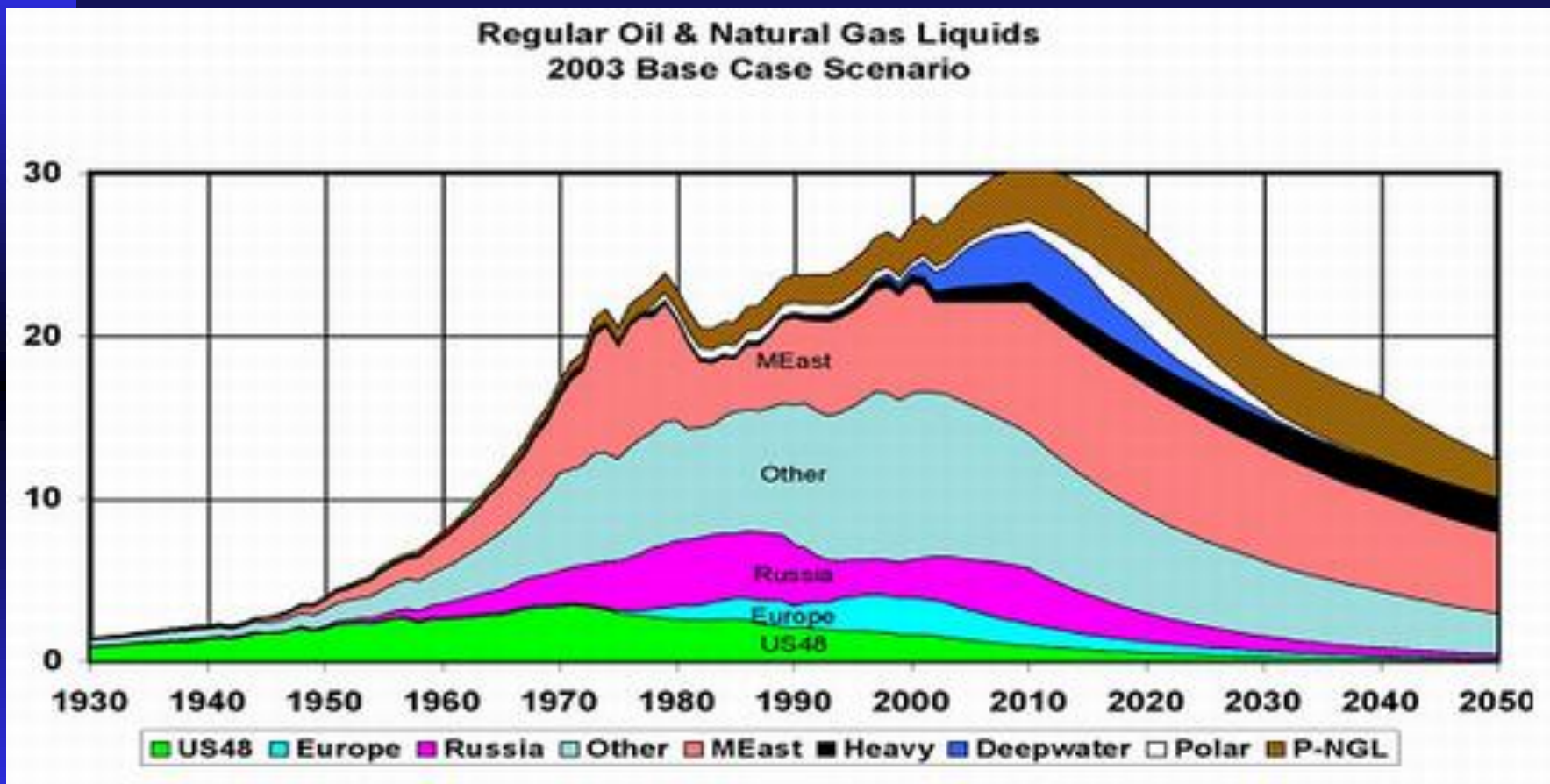


Source : IEA 2006

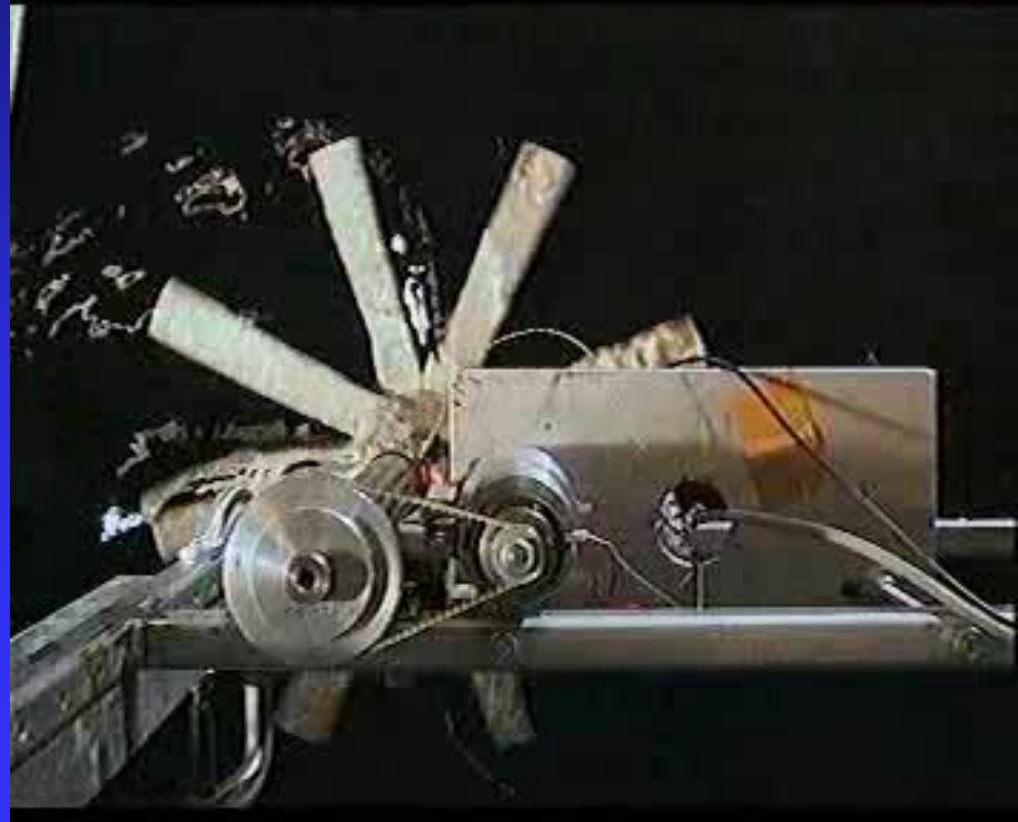
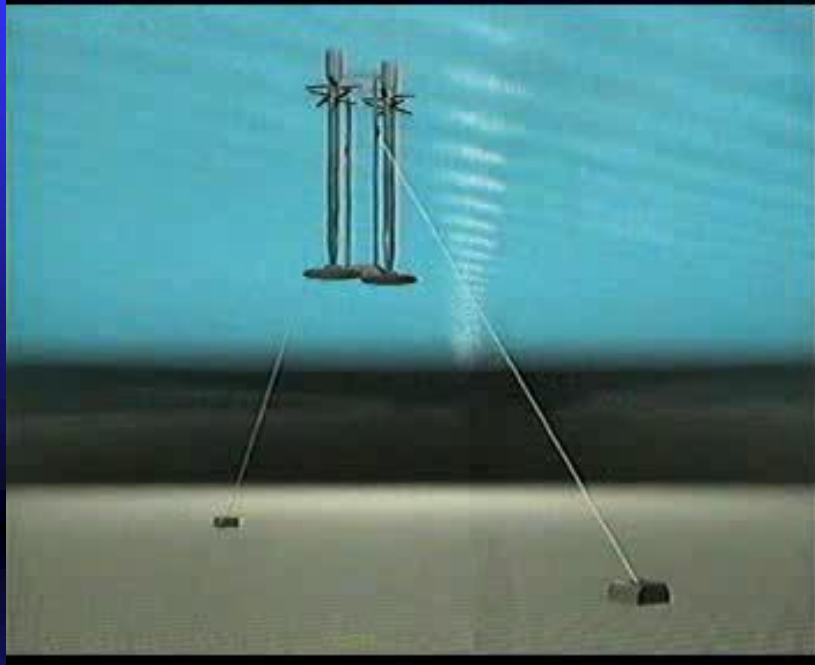


1/3 de l'humanité (2Milliard d'hommes) n'est « pas sur la photo »!

Énergie: la fin du pétrole



Les « INCLASSABLES »



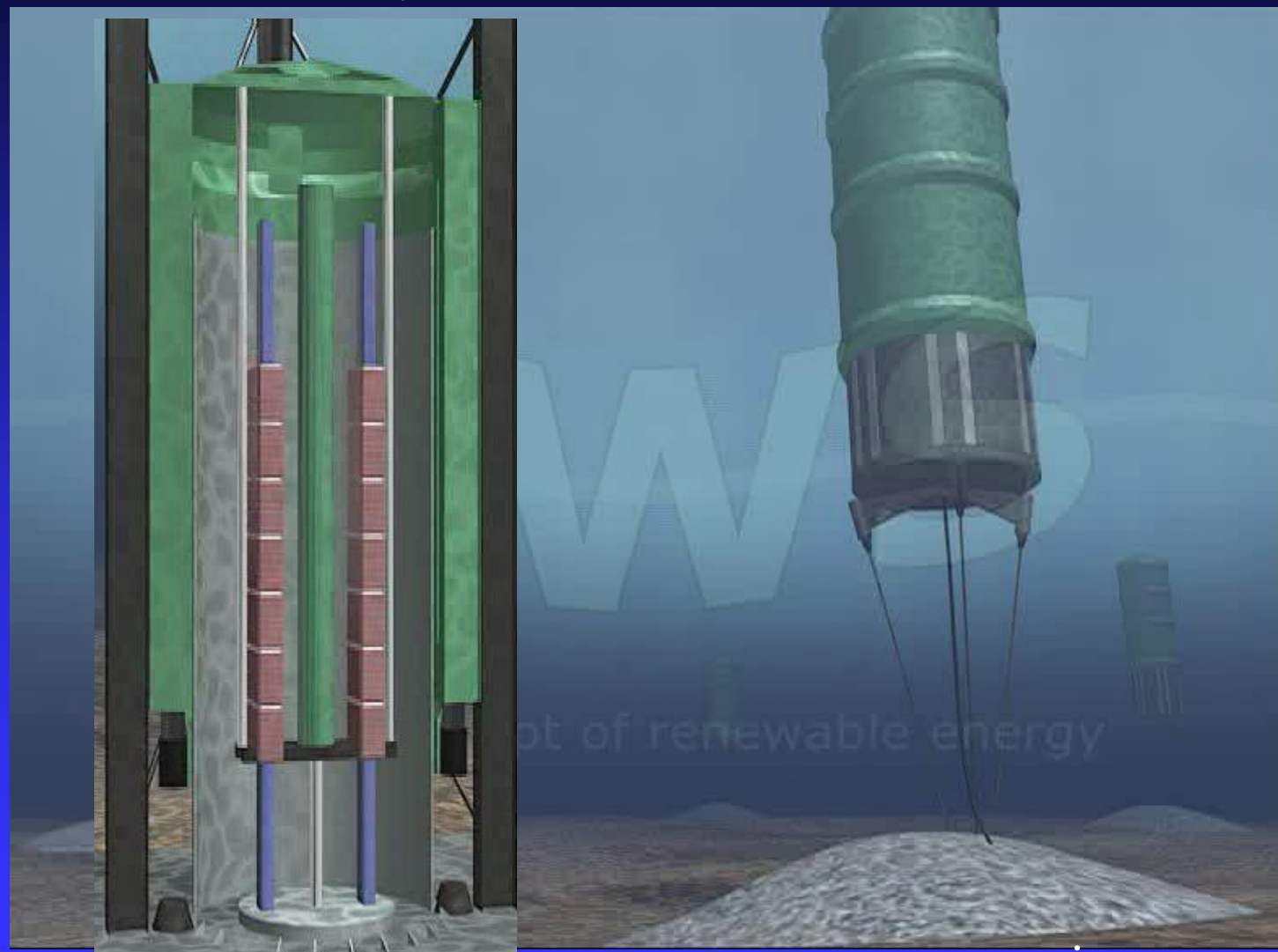
AWS

www.waveswing.com

(1998)

Teamwork Technology

(NL)



www.waveswing.com

Mise à l'eau
été. 2004
Leixoes
(Portugal)

Démonstrateur
Échelle 1/1
2MW

