

Energies Marines Renouvelables : L'houlogénération

H. BEN AHMED

B. MULTON, T. KOVALTCHOUK, J. AUBRY

Laboratoire SATIE (UMR CNRS 8029)
Ecole Normale Supérieure de Rennes

benahmed@ens-rennes.fr

Journées du groupe thématique transverse AUM
27-29 Août 2014, ENS Cachan

Sommaire

- I. L'énergie des vagues
- II. Caractérisation des vagues et potentiel houlogénérateur
- III. Exemples de récupérateurs
- IV. Le cas SEAREV : système pendulaire
- V. Synthèse

L'énergie des vagues

D'où vient la houle?



Energie solaire



Energie éolienne en mer



Energie des vagues
~2000 TWh/an exploitables
(~10% conso élec. Mondiale)

1/3 économiquement rentables ?

A ne pas confondre
avec :



Éolien offshore

Parc Middelgrunden 20 éoliennes de 2 MW
www.middelgrunden.dk



Les courants marins

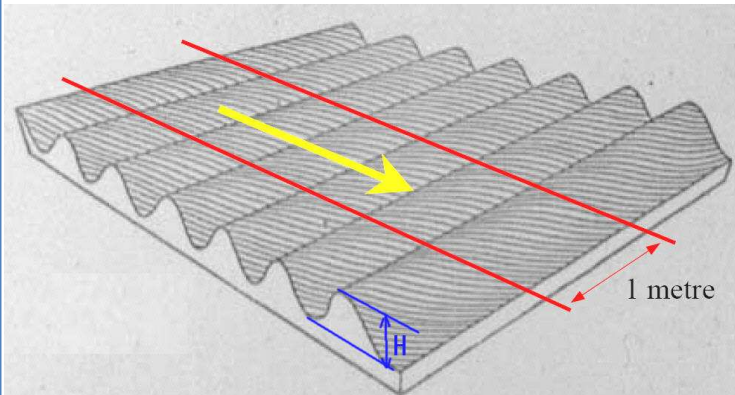
<http://www.hydrohelix.fr/>



La marée

Usine marémotrice de La Rance (France)
24 groupes de 10 MW

Comment quantifier l'énergie des vagues ?



Etat de mer	H (m)	T (s)	P_w (kW.m ⁻¹)
Peu agitée	0.6 m	5 s	0.76 kW.m ⁻¹
Forte	9 m	11 s	374 kW.m ⁻¹
Grosse	18 m	15 s	2041 kW.m ⁻¹

Source : thèse J. Aubry, 2011

Puissance incidente
par mètre de front de vague

Densité surfacique
d'énergie

x

Vitesse de
propagation

x

Coefficient
d'adaptation au
spectre réel

$$P_w (W/m) = \left(\rho g \frac{H^2}{8} \right) \times \left(\frac{gT}{4\pi} \right) \times 0.43$$

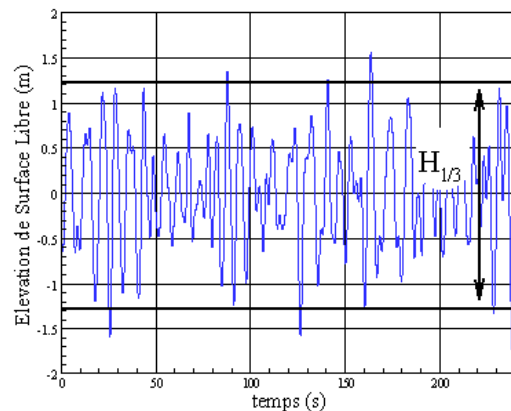
$$\lambda_w = \frac{g}{2\pi} T^2$$

$$\rho = 1024 \text{ kg/m}^3$$

$$P(W/m) \sim 420 H^2 T$$

Comment modéliser une houle ?

La houle : un phénomène aléatoire



Spectre de la houle :

- > Stationnaire à l'échelle d'une heure
- > Deux paramètres :
 - T_p période de pic
 - $H_{1/3}$ hauteur significative

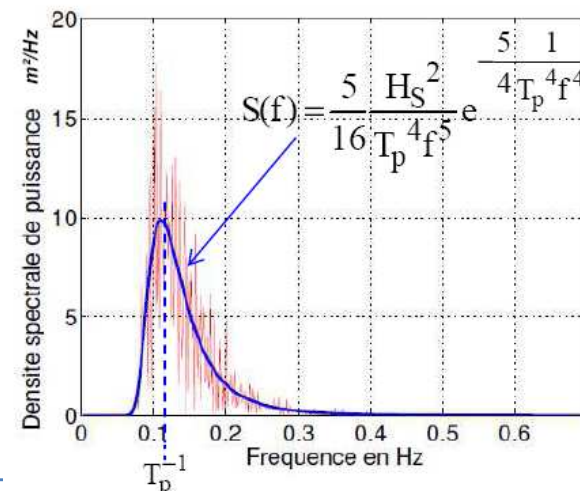
Pour une houle **monodirectionnelle irrégulière** =
Somme de N ondes régulières élémentaires
de pulsations différentes :

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^N a_i \cos(2\pi f_i t + \varphi_i)$$

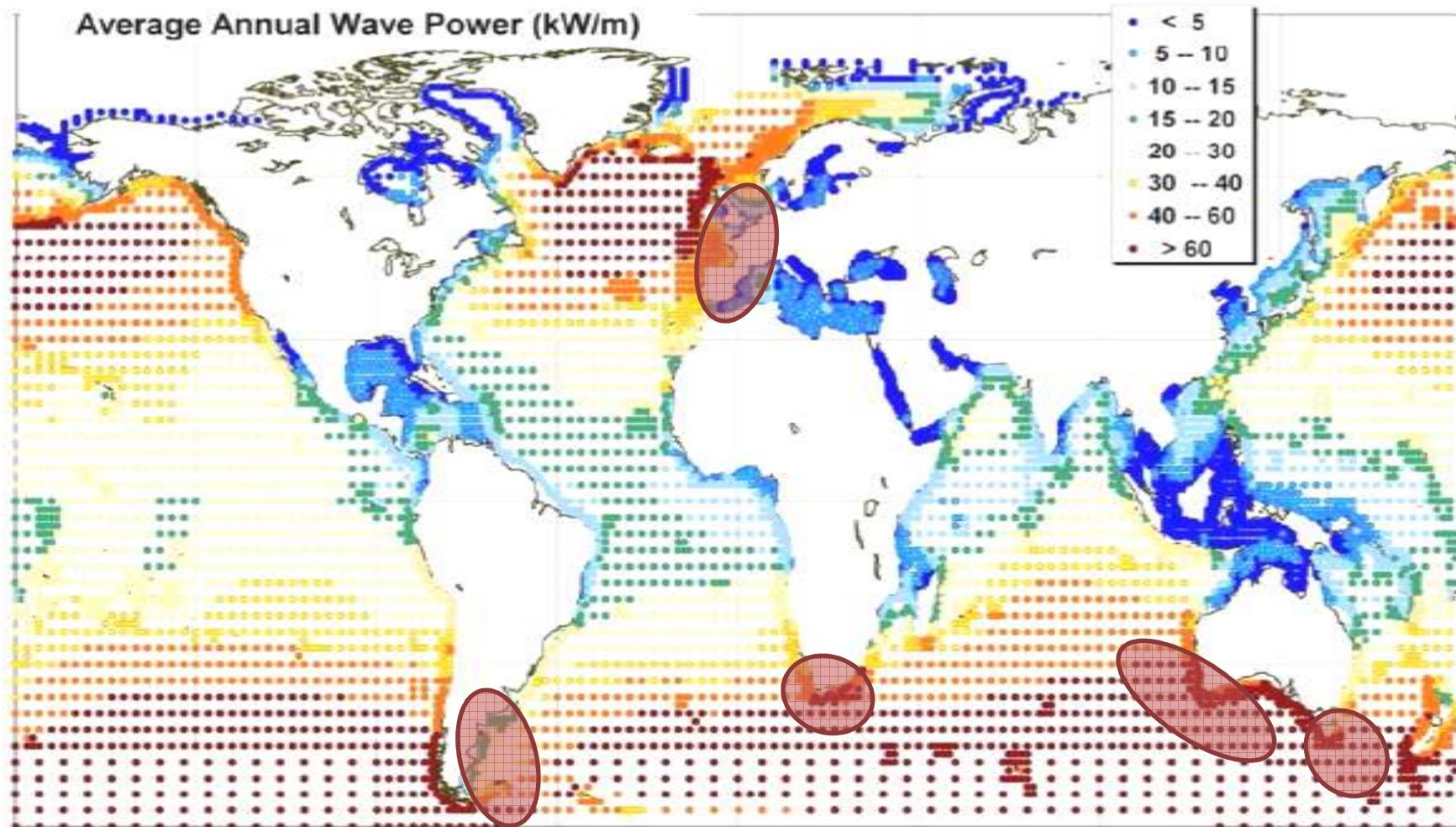
$$\text{avec } a_i = \sqrt{2S(f_i) \Delta f}$$

Où $S(f, T_p, H_{1/3})$ est la densité spectrale de
puissance et f la fréquence

Modèle de Pierson-Moskowitz



Le potentiel houlogénérateur



© WorldWaves data/OCEANOR/ECMWF

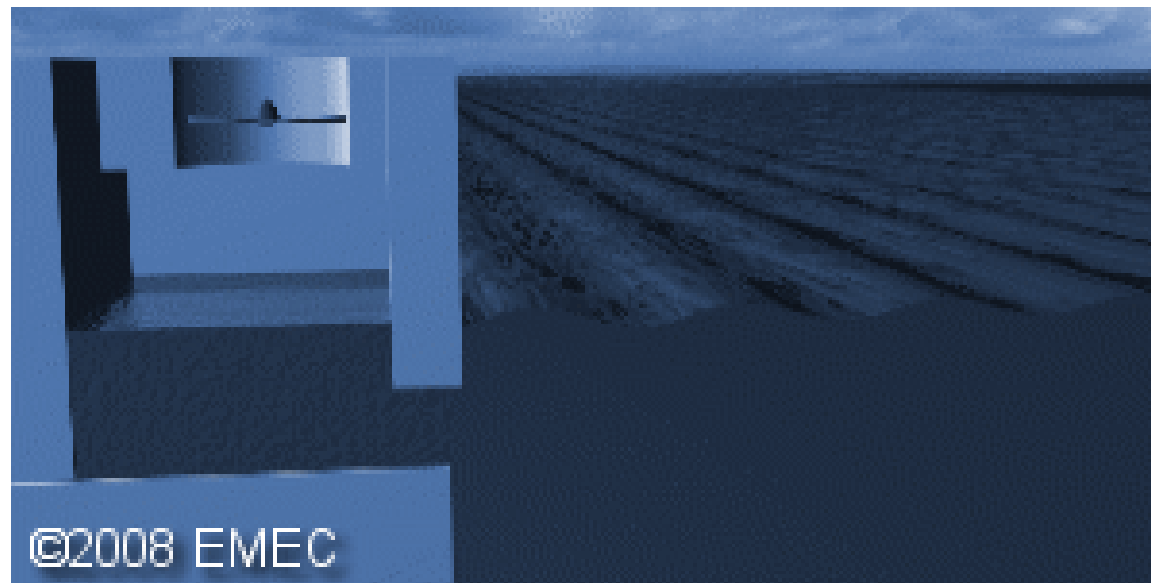
Exemples de récupérateurs

Classification :

- Les colonnes d'eau oscillantes
- Les systèmes à déferlement
- Les systèmes à corps mus par la houle

Systèmes de récupération de l'énergie des vagues

- Les colonnes d'eau oscillantes
- Les systèmes à déferlement
- Les systèmes à corps mus par la houle

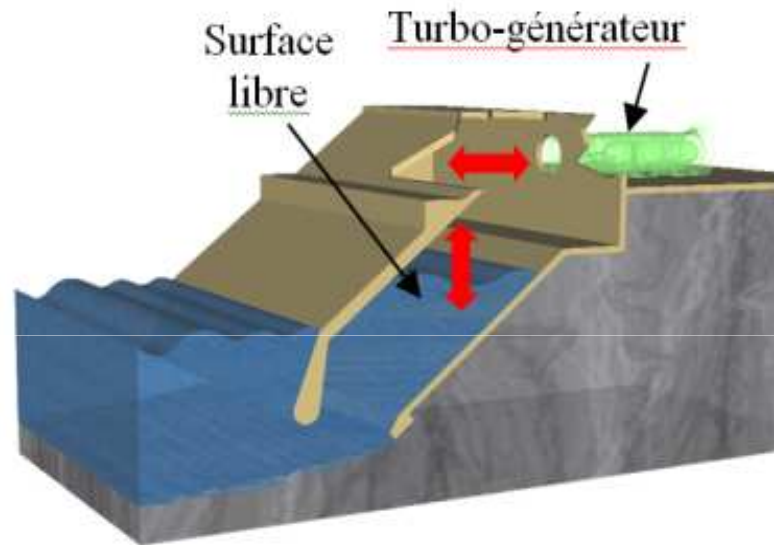


Les colonnes d'eau oscillantes : Limpet

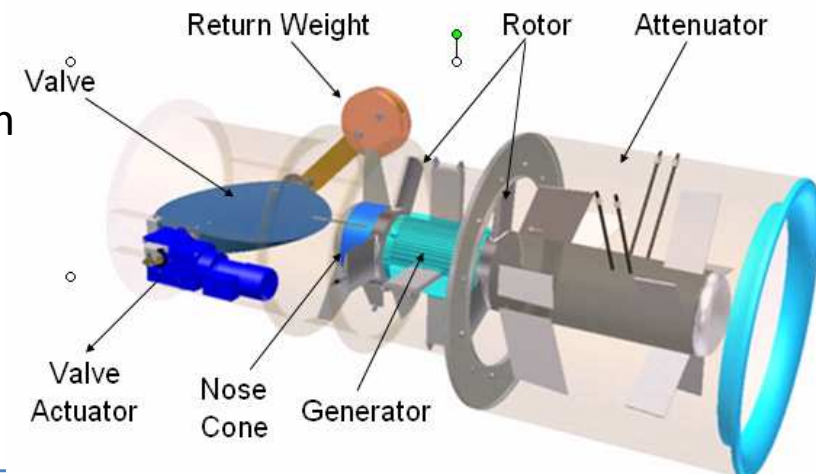
(Land Installed Marine Powered Energy Transformer)

Islay en Ecosse, raccordé depuis 2001

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



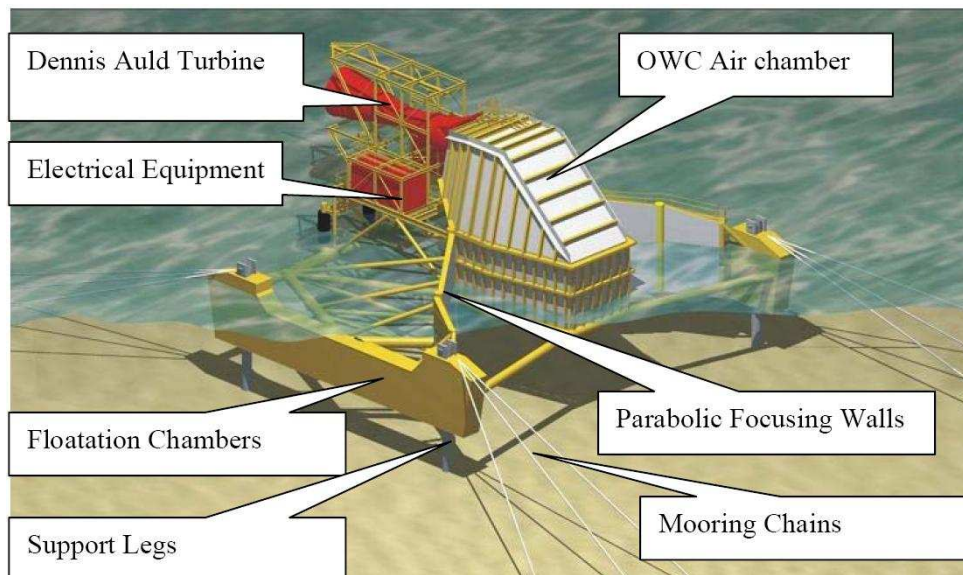
Turbine Wells à pas fixe de 2.6m en contre-rotation
2 génératrices asynchrones à rotor bobiné
puissance nominale : 2*250 kW
vitesse nominale : 1016 tr.min⁻¹
couple nominal : 2350 N.m



Les colonnes d'eau oscillantes : Oceanlinx

(anciennement Energetech, Australie)

Un deuxième exemple « Offshore »
Production d'électricité et d'eau désalinisée



Photographique du prototype de 300kW
installé à Port Kembla (Australie)

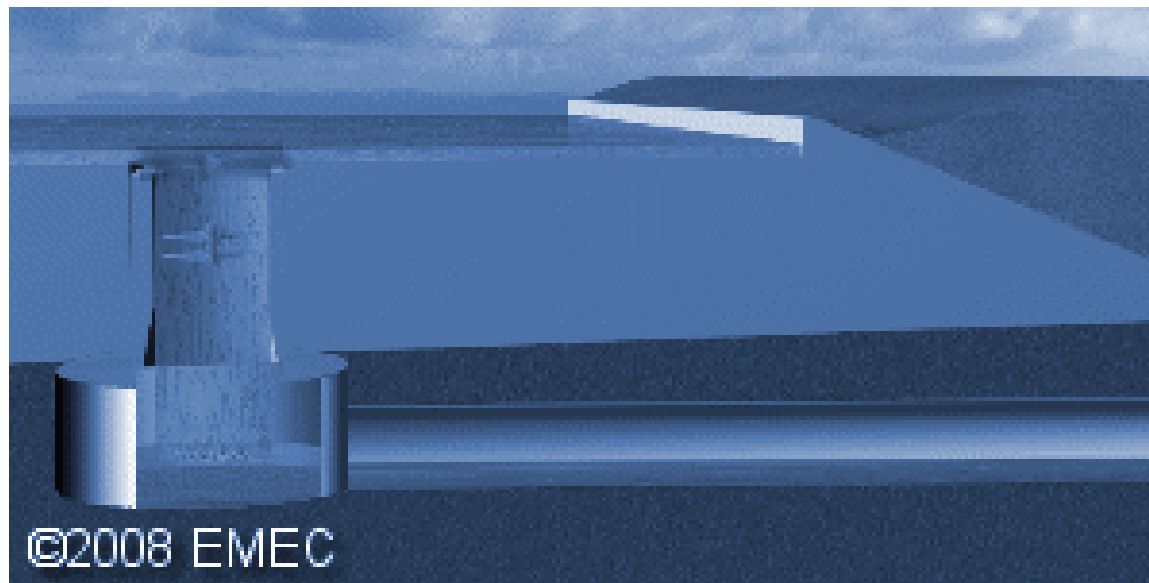


Turbine Deniss-Auld
1 génératrice asynchrone
puissance maximale : 1.5 MW
1 convertisseur triphasé AC-DC-AC

Utilisation comme brise vagues

Systèmes de récupération de l'énergie des vagues

- Les colonnes d'eau oscillantes
- **Les systèmes à déferlement**
- Les systèmes à corps mus par la houle

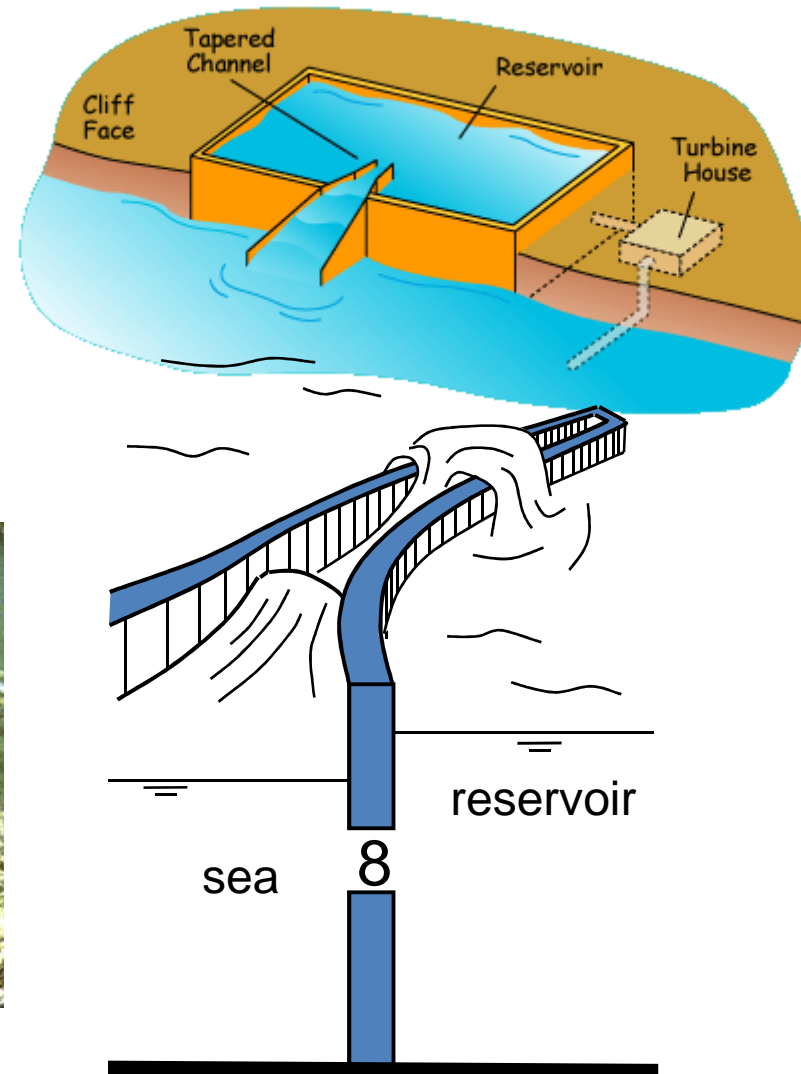


Les systèmes à déferlement : **Tapchan**

(« *Tapered Channel* » : Canal fuselé)

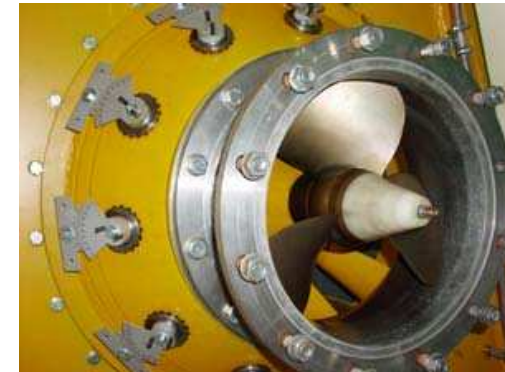
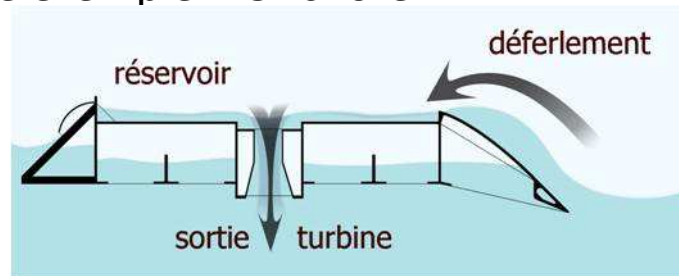
Un premier exemple « Onshore » (sur la côte)
à Toftstallen en Norvège depuis 1985

Puissance de 350 kW, turbine Kaplan.
Construction d'une centrale de 1.1MW en
1998 dans l'île de Java (Indonésie).



Les systèmes à déferlement : **Wave Dragon**

Un deuxième exemple « Offshore »



Turbine Kaplan



Déferlement sur le prototype 20 kW (7*2.3kW)

Pour une houle de 36 kW/m

8000m³ de réservoir

16 turbines Kaplan basse chutes

16 générateurs à aimants permanents de
440kW en entraînement direct

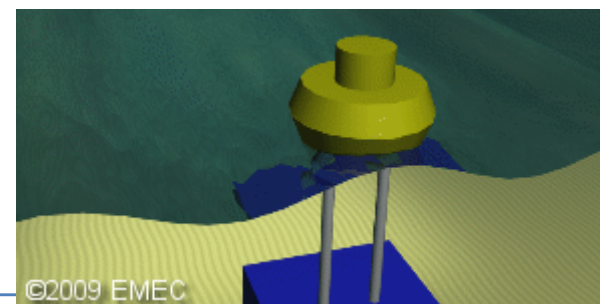
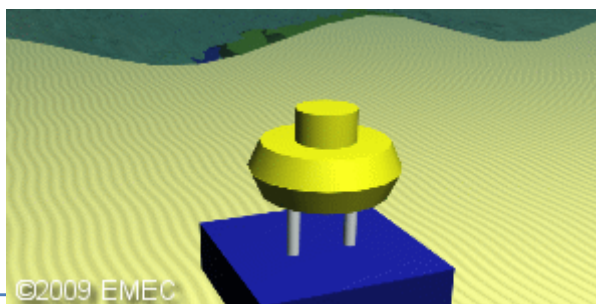
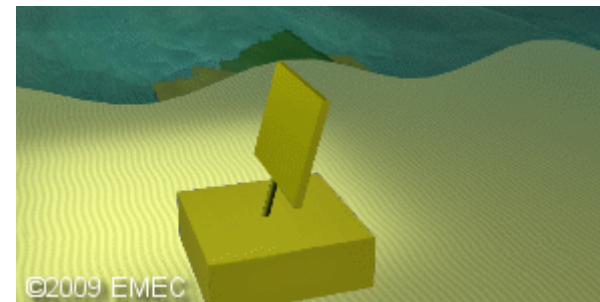
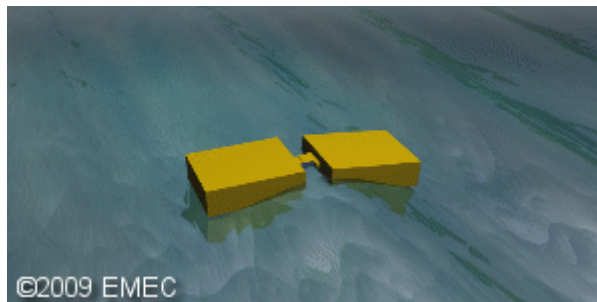
Puissance maximale 7 MW

Production annuelle 20 GWh (2800h)

<http://www.wavedragon.net>

Systèmes de récupération de l'énergie des vagues

- Les colonnes d'eau oscillantes
- Les systèmes à déferlement
- Les systèmes à corps mus par la houle



Chaines de conversion

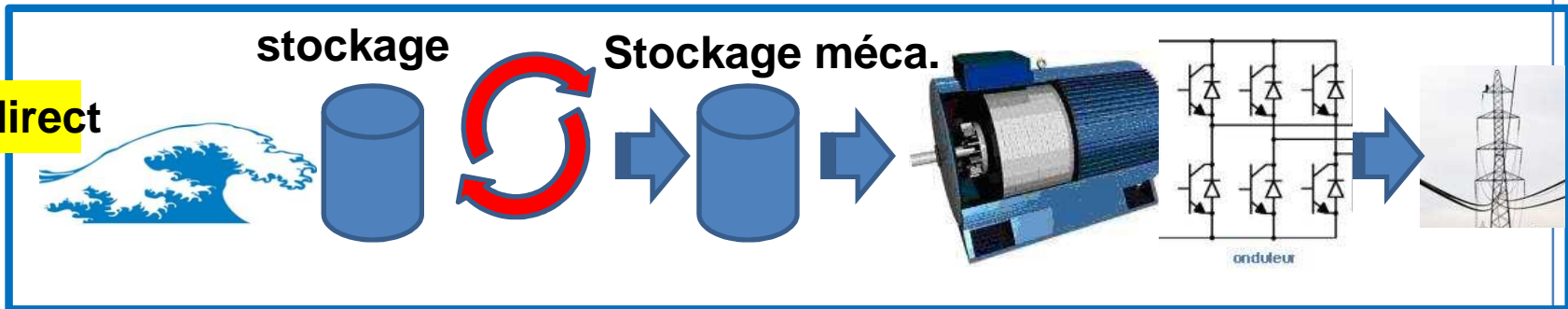
Conversion Hydromécanique



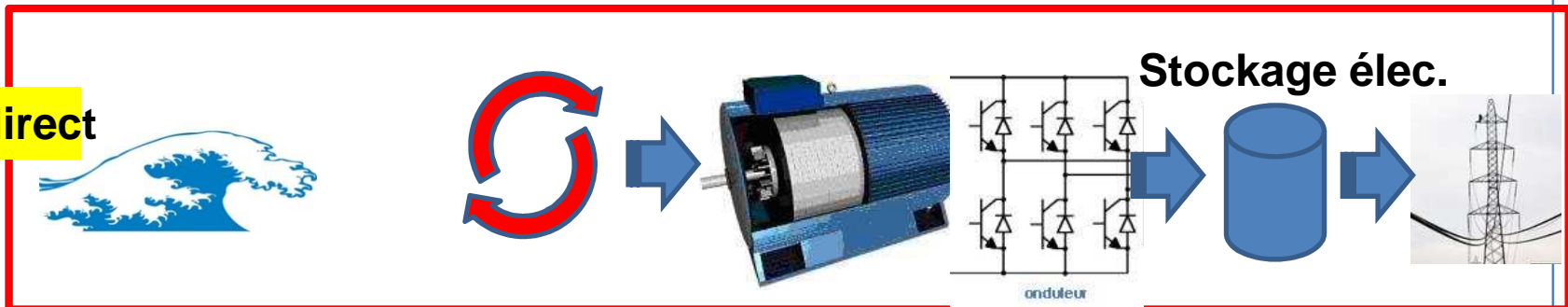
Conversion électromécanique



WEC indirect

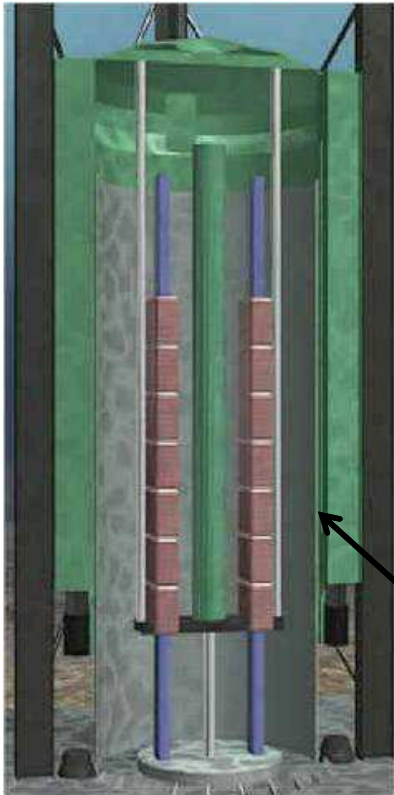


WEC direct



Les systèmes à corps mus par la houle : **AWS**

(«Archimedes Wave Swing »)



Flotteur : Diamètre 9.5m hauteur 21m

Puissance maximale : 2MW (prototype) / 5MW (version commerciale)

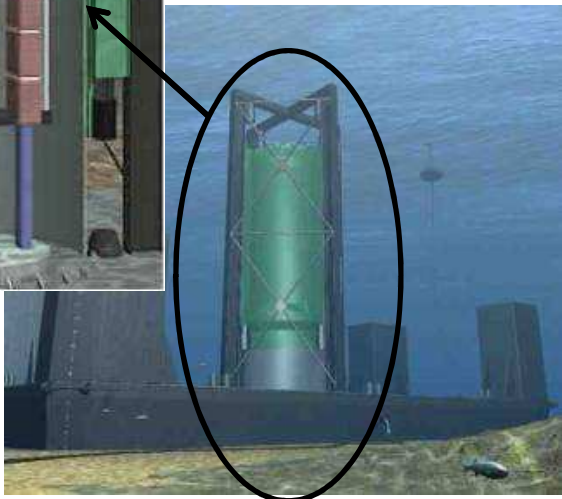
Production annuelle : 12GWh par an (version commerciale)

**Générateur linéaire à aimants permanents
en entraînement direct (1MN , $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)**

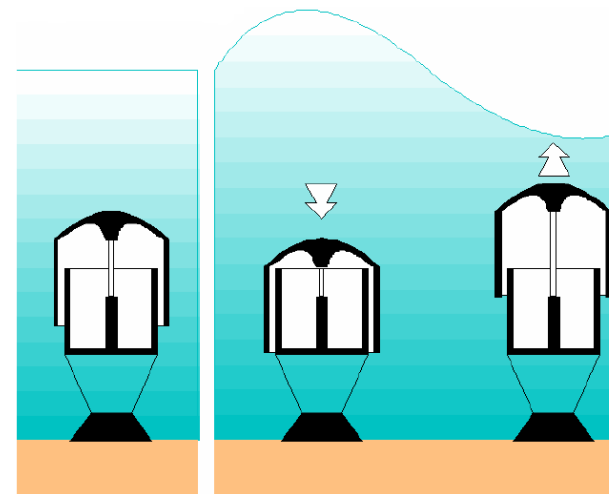
Système pneumatique de réglage de la fréquence de résonance

Pbs butée+guidage !!

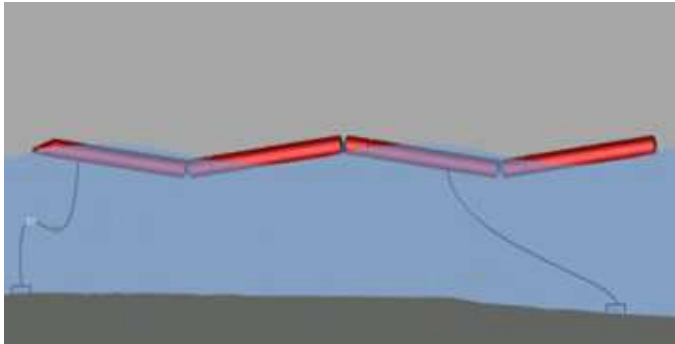
Essai en 2004 au Portugal



<http://www.awsocan.com>



Les systèmes à corps mus par la houle : **Pelamis**

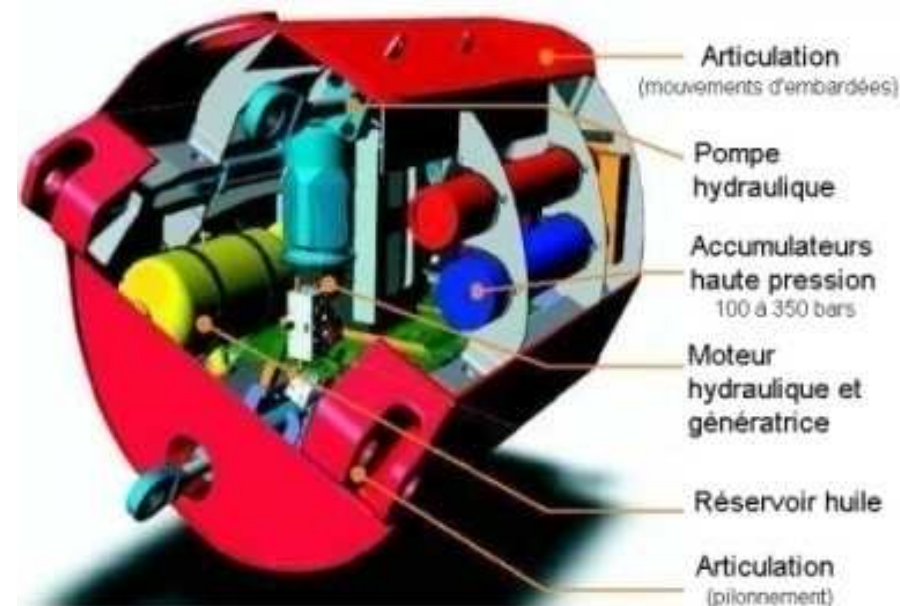


750kW – 2.7 GWh/an pour une houle de 55kW/m
4 boudins – diamètre 3.5m – longueur totale 150m
700 tonnes – 3 modules de conversion

Vérins hydrauliques + stockage sous pression
+ moteurs hydrauliques + générateurs asynchrones



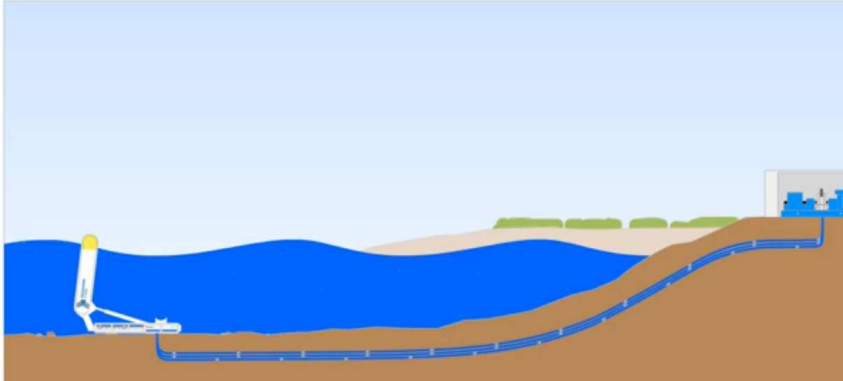
<http://www.pelamiswave.com/>



Module de conversion

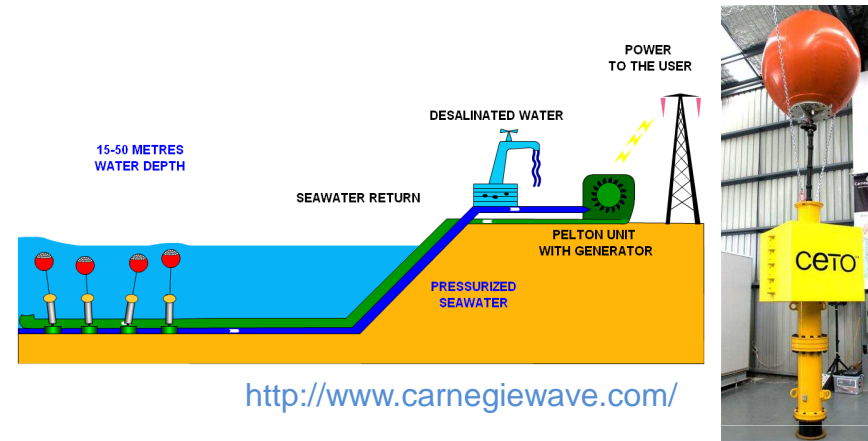
Oyster (Ecosse-Irlande)

Oyster®



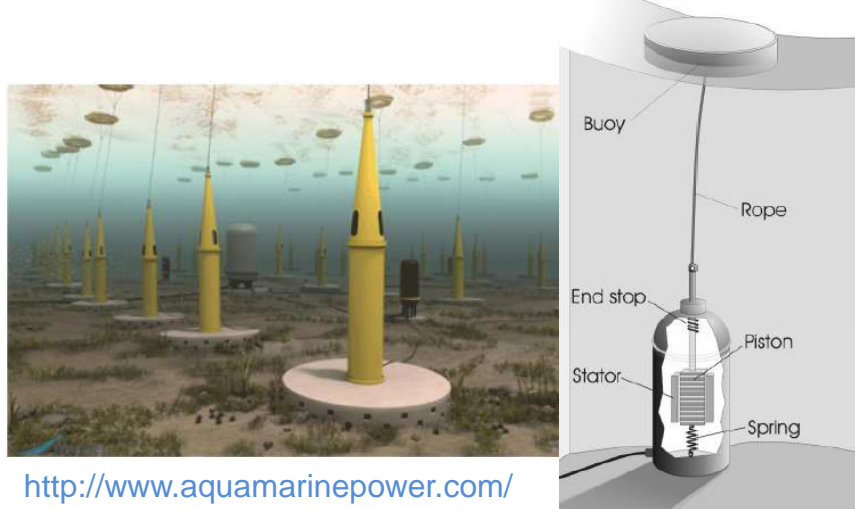
<http://www.aquamarinepower.com/>

CETO (Cylindrical Energy Transfer Oscillator), Carnegie, Australie



<http://www.carnegiewave.com/>

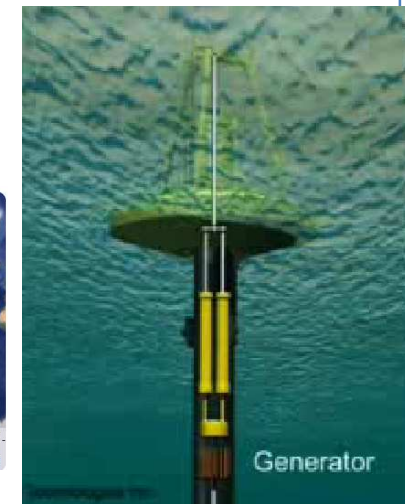
Seabased (Suède, Uppsala)



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

PowerBuoy (Ocean Power Technologies USA, UK)

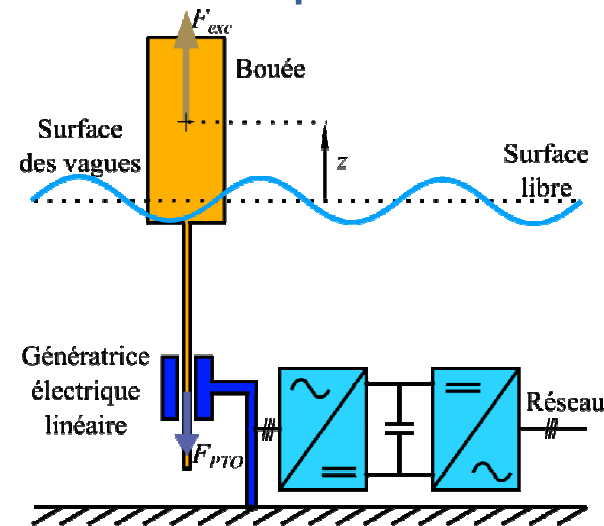
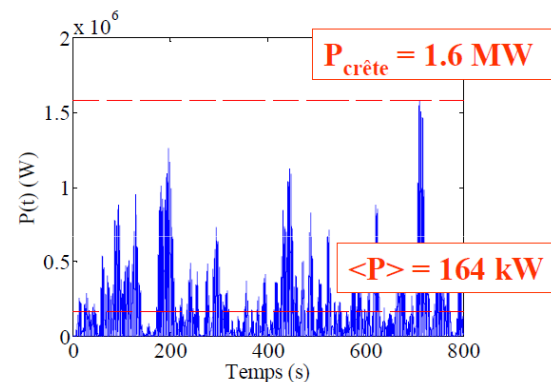
OPT annonce 2.6 M\$ de contrats en 2013



<http://www.oceanpowertechnologies.com>

On s'intéresse aux chaînes très simplifiées :
Hydro-mécaniques DIRECTES / Mécano-électriques DIRECTES

Le premier cas d'étude : la bouée pilonnante



Source : thèse T. Kovaltchouk, en cours

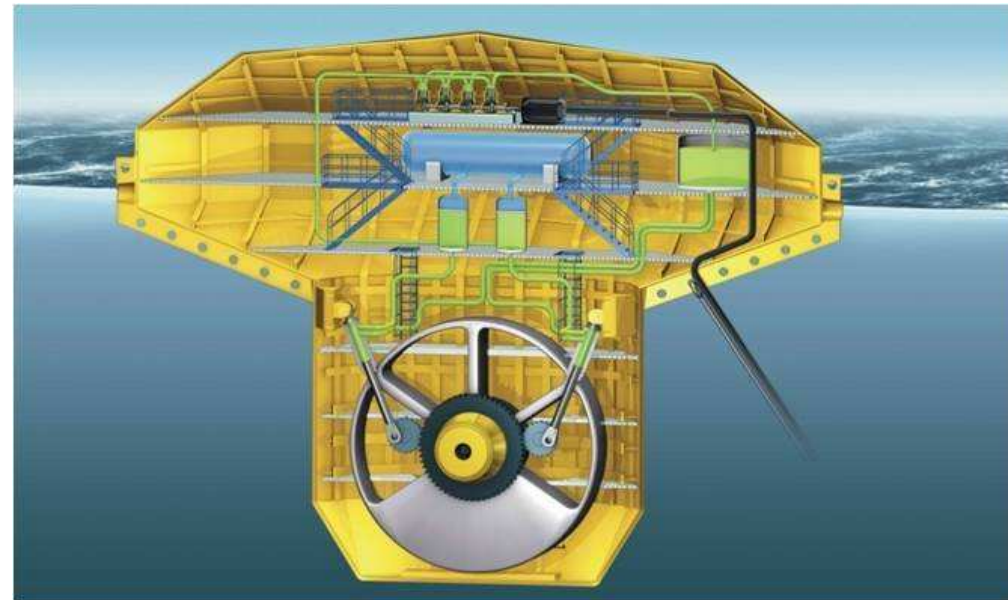
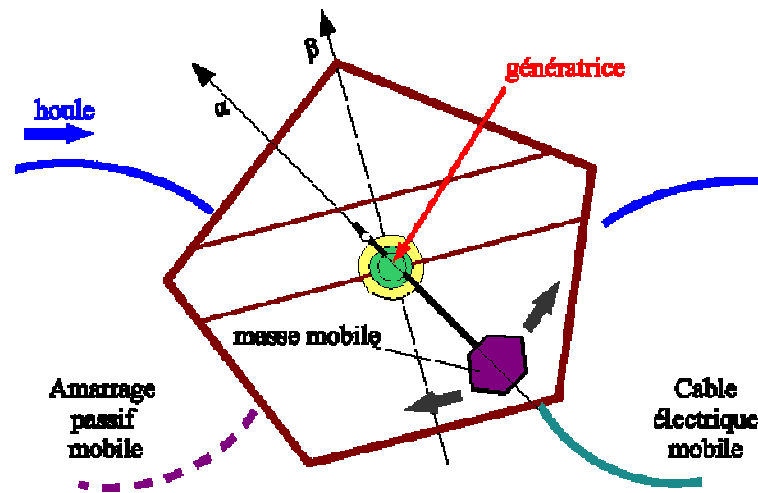
Objectifs : augmenter la qualité et la quantité de l'énergie produite (€/kWh = Min)

Principaux verrous :

1. Cyclage des composants et durée de vie
2. Stratégies de contrôle de la récupération et du lissage
3. Modèle hydrodynamique non-linéaire couplé, cas de fermes
4. Prédiction à court-terme de l'excitation
5. Dimensionnement couplé au contrôle/gestion
6. Acceptabilité par le réseau électrique de la puissance injectée

Les systèmes à corps mus par la houle : **SEAREV**

(Système Electrique Autonome de Récupération de l'Energie des Vagues)



Projet ANR QUALIPHE

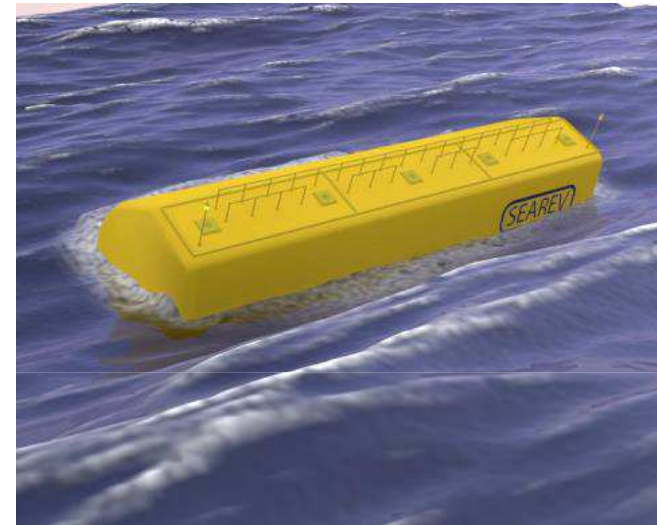
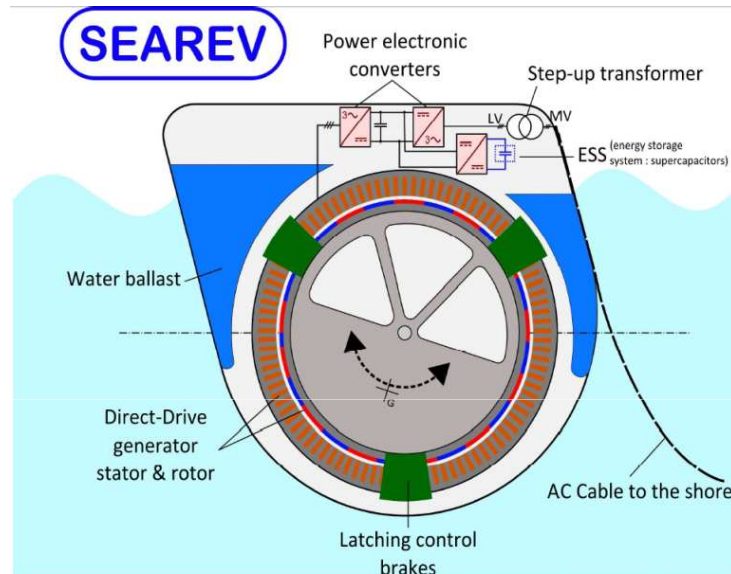


Partenaires :



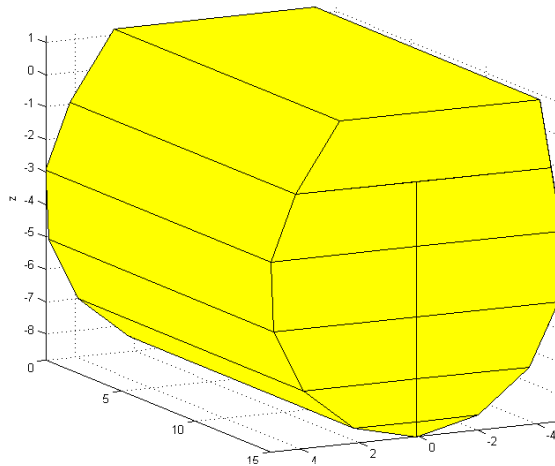
Le second cas d'étude : Le système SEAREV

(Système Electrique Autonome de
Récupération de l'Énergie des Vagues)



Système entièrement clos → Parties mobiles à l'abri de la corrosion
Pas de butées mécaniques → Immunité aux fortes houles

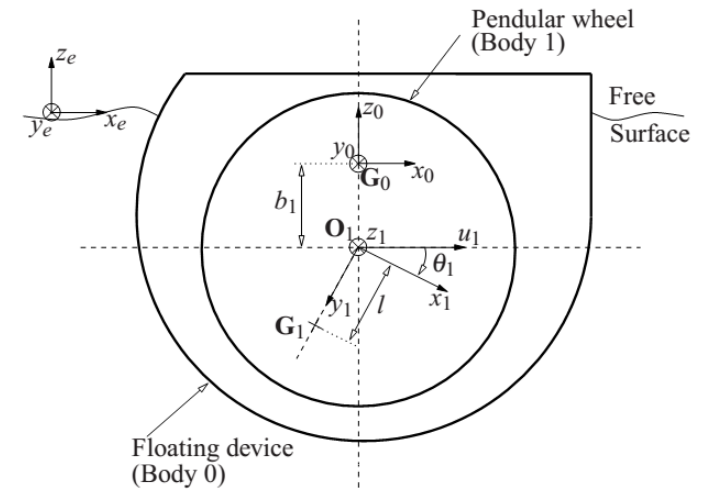
Moins de parties mécaniques mobiles → Moins de maintenance
Moins d'étages de conversion → Moins de pertes d'énergie



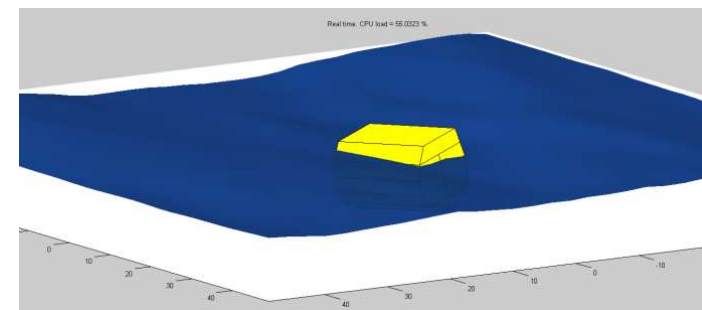
SEAREV DES179

f1

- Masse du flotteur 1600 T
- Masse du pendule 600 T
- Longueur 30m
- Diamètre 5m



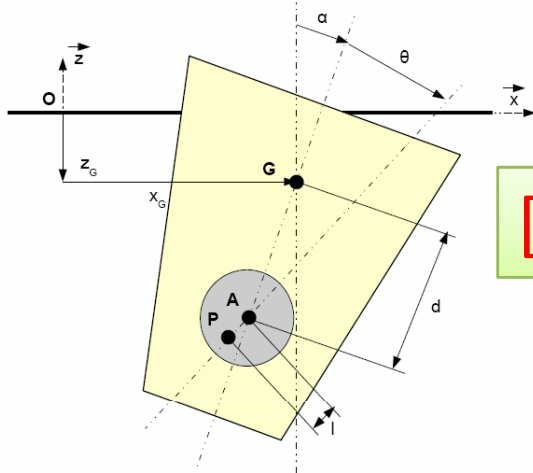
Paramétrage



Diapositive 22

f1 Données de masse du SEAREV à vérifier, je n'ai pas les données avec moi...
frongere; 07/11/2013

LHEEA 



$$[M].[X] = \Sigma [F_{ext}]$$

$$X = \begin{bmatrix} x_G \\ z_G \\ \theta \\ \alpha \end{bmatrix}$$

$$F_{ext} = F_h + F_p + F_H + F_R + C_R$$

With :

F_h = Wave force

F_p = pendulum force

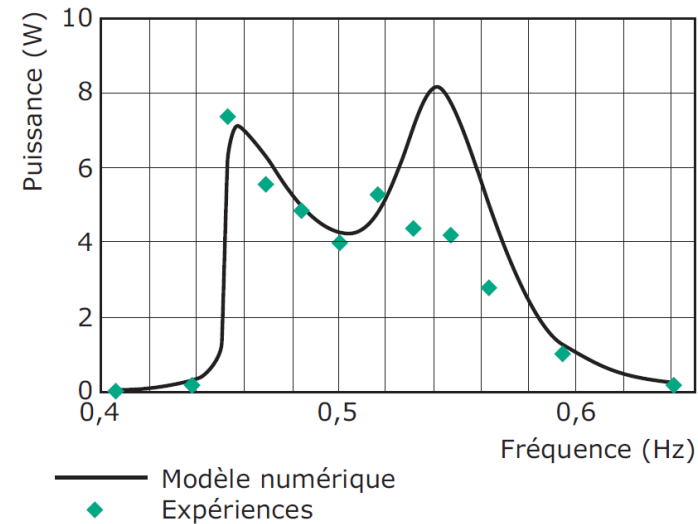
F_H = hydrostatic force

F_R = radiation force

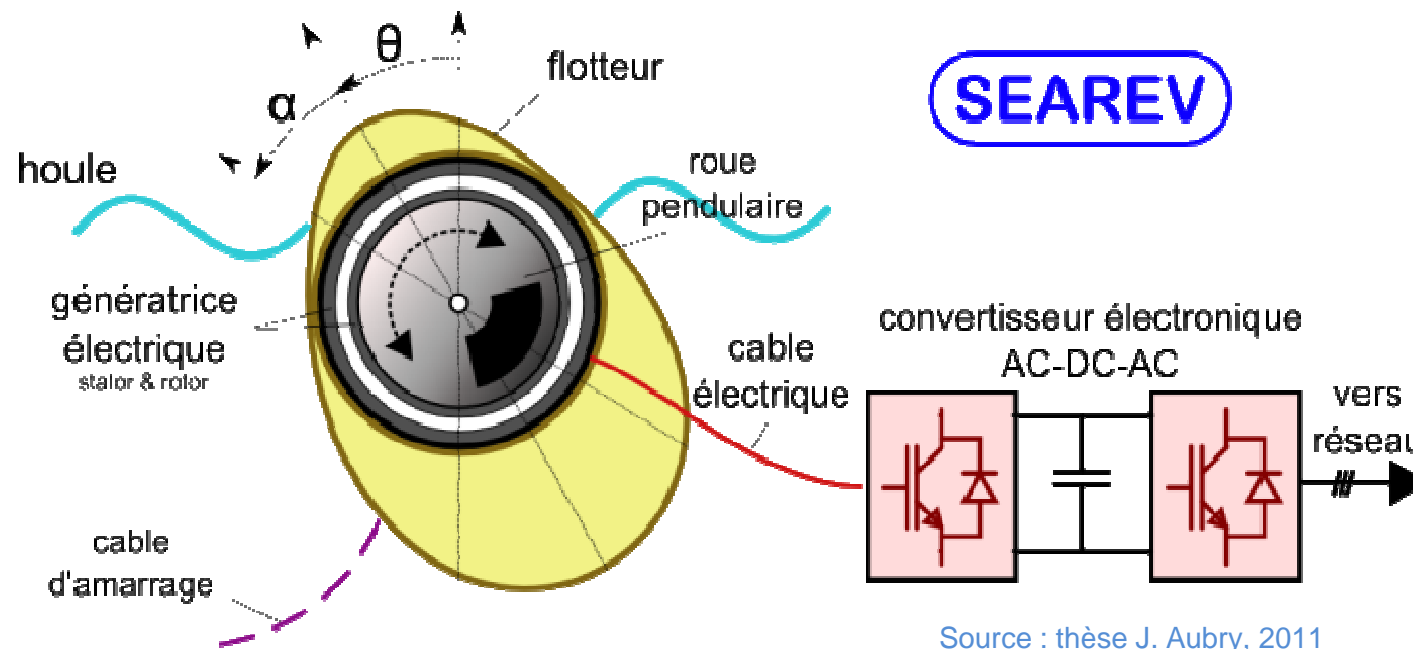
C_R = Generator TORQUE
(i.e. recovery torque)



1/12th scale prototype



La chaîne de conversion tout électrique

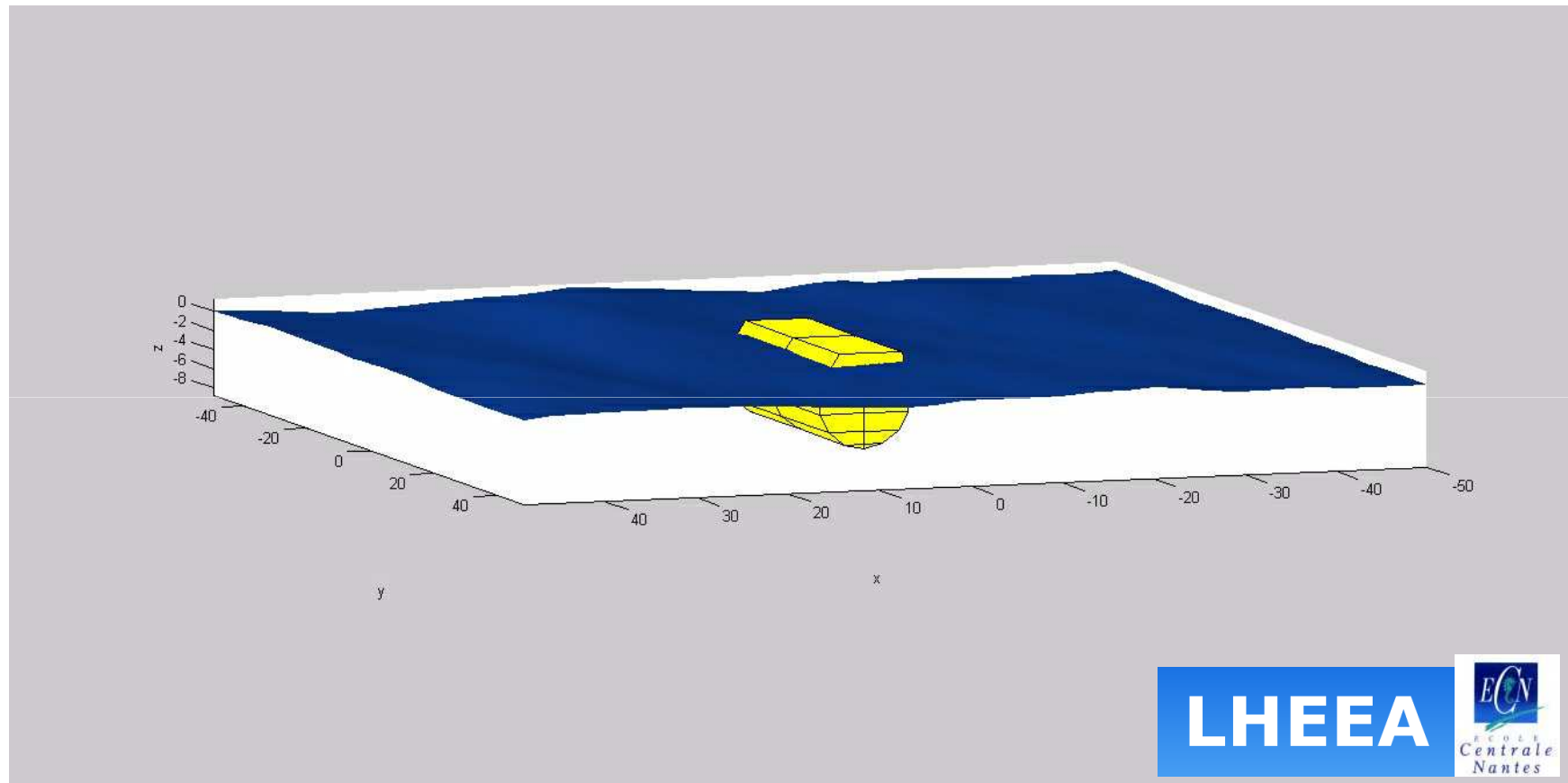


Objectif global :

Minimiser le coût du kWh électrique produit

Mais Problème multi-physique fortement couplé

Modèle de simulation hydrodynamique



Simulation du SEAREV en 6ddl dans une houle irrégulière avec étalement directionnel (Modèle HIMnIAI)

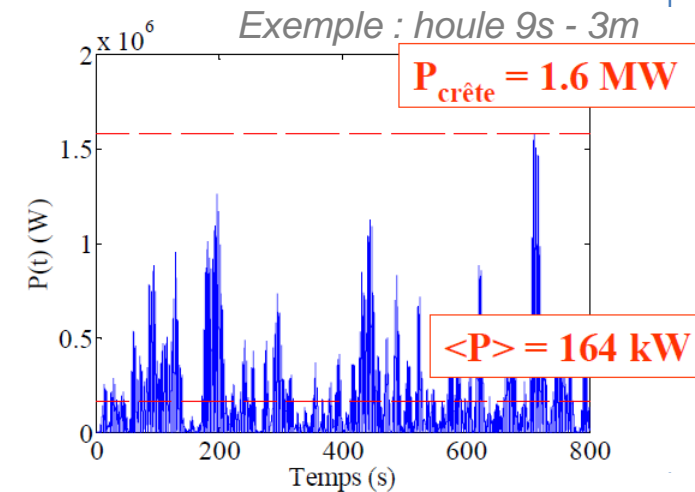
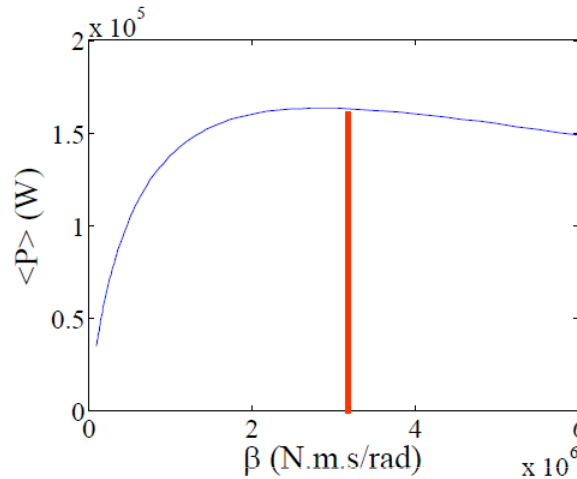
Contrôle du couple récupératif $C_R(t)$??

$$C_R(t) = \beta \cdot \dot{\theta}(t)$$

$$W_e = \int_{\Delta T} C_R(t) \cdot \dot{\theta}(t) dt$$

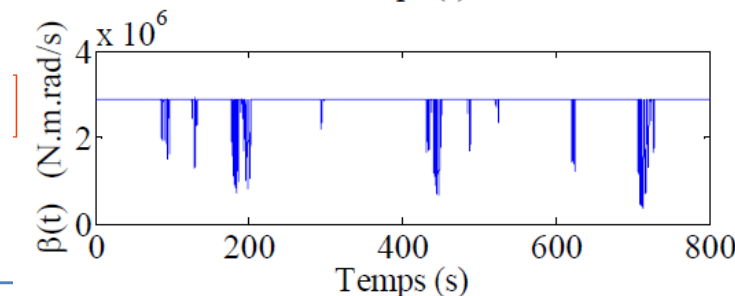
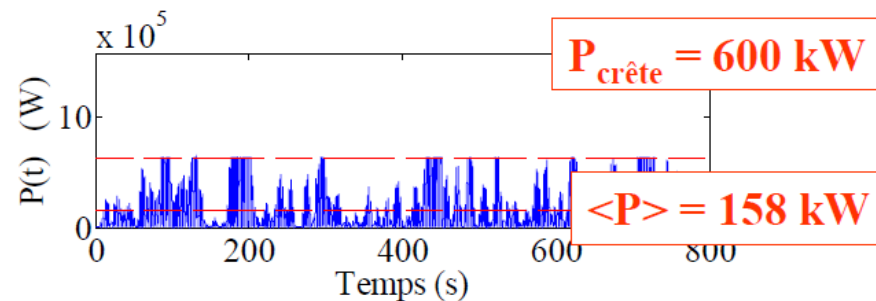
Amortissement optimal

β = constante optimisée



Amortissement optimal+écrêtage

$$\beta(t) = \begin{cases} \frac{P_{\text{écr}}}{\dot{\theta}(t)^2} & \text{si } P(t) \geq P_{\text{écr}} \\ \beta_{\text{opt}} & \text{si } P(t) \leq P_{\text{écr}} \end{cases}$$

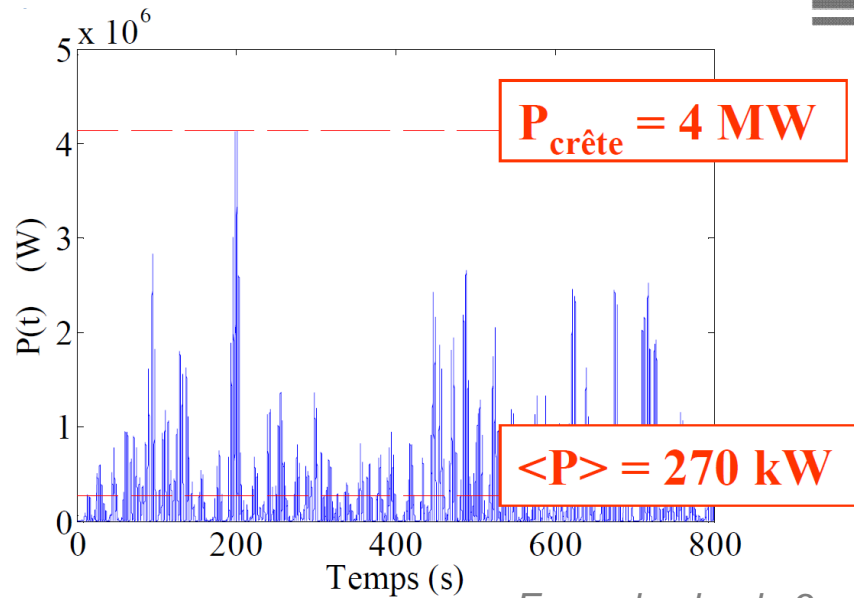
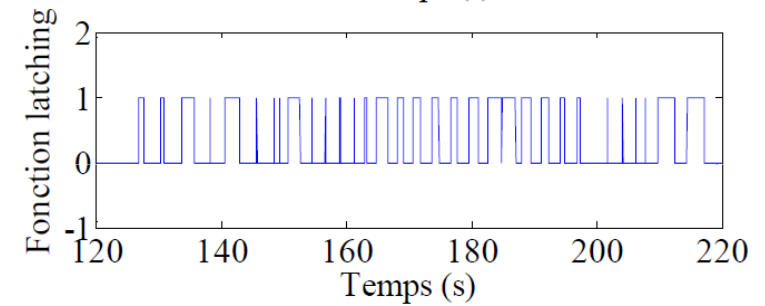
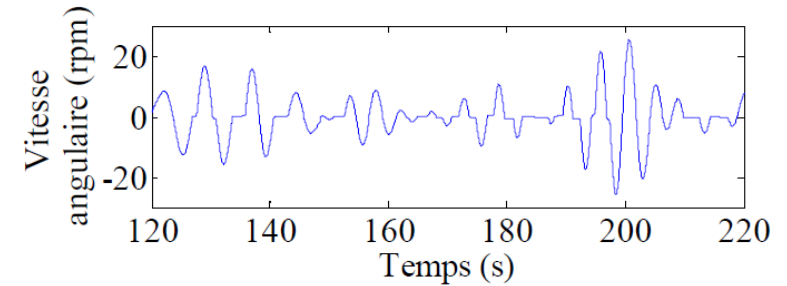
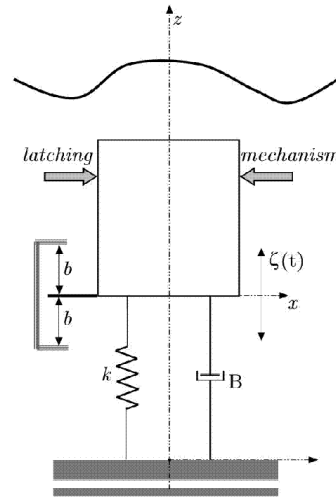


Source : thèse M. Ruellan, 2007

□ Contrôle discret par latching

$$C_R(t) = \beta \dot{\theta}(t)(1 - u(t))$$

$$W_e = \int_{\Delta T} \beta \dot{\theta}(t)^2 (1 - u(t)) dt$$



SANS latching

AVEC latching

Exemple : houle 9s - 3m

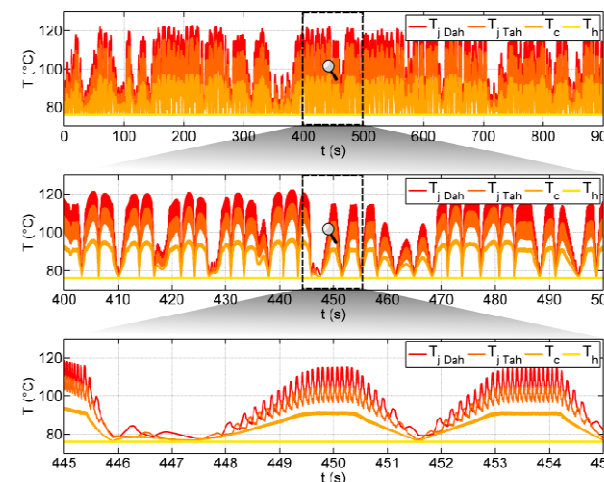
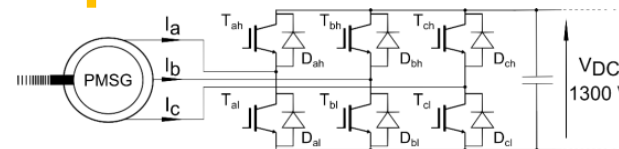
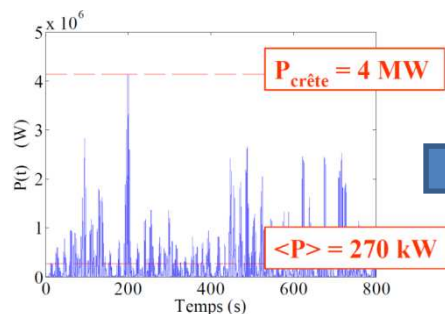
Source : thèse M. Ruellan, 2007

Impact des fluctuations rapides de P :

1. Cyclage thermique des IGBT

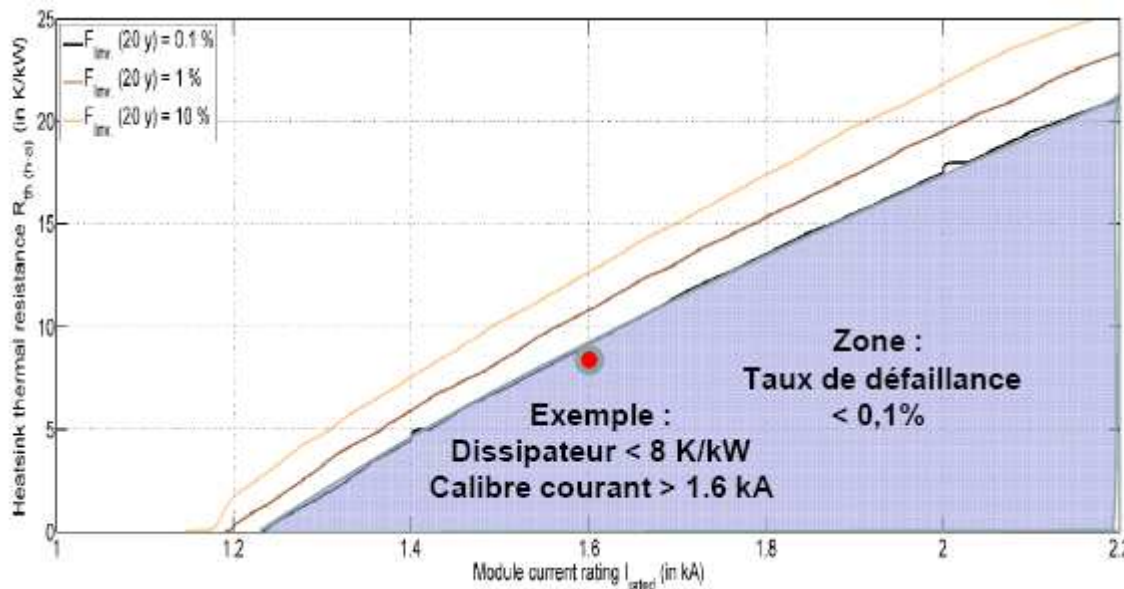
Modèle du vieillissement en cyclage thermique des semi-conducteurs dans un convertisseur de puissance.

Source : thèse T. Kovaltchouk, en cours



Température des jonctions, du boîtier et du radiateur pour un courant nominal $I_{rated} = 1400 \text{ A}$ et un radiateur de résistance thermique $R_{th}(h-a) = 7 \text{ K/kW}$

Représentation iso-taux de défaillance dans le plan résistance thermique du dissipateur / calibre courant IGBT avec prise en compte de la probabilité d'occurrence de tous les états de mer



2. Intégration au réseau

Cas d'étude :

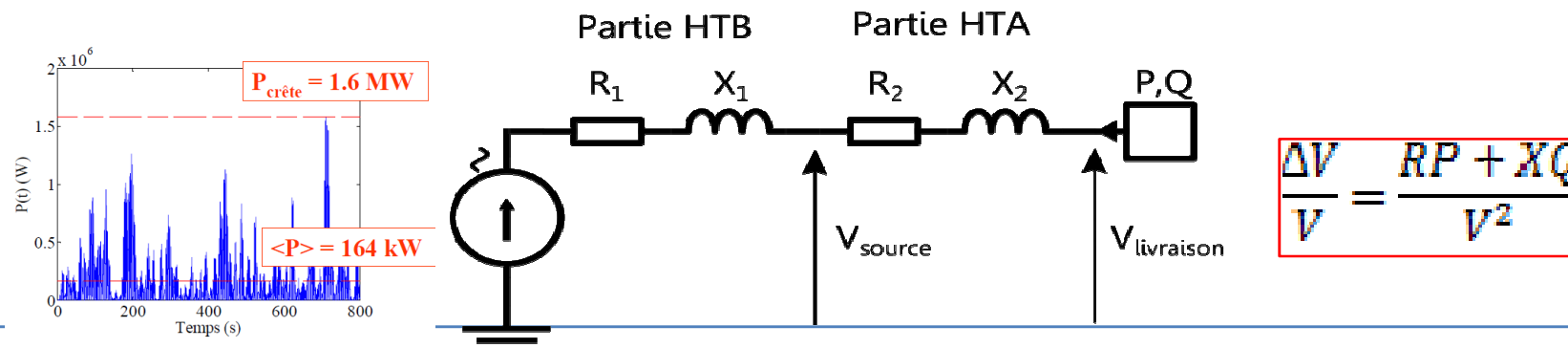
l'Île d'Yeu (injection de 11 MW : 10 machines)



- ✓ Ressources importantes
- ✓ Volonté du gestionnaire
- ✓ Expérimentation favorable (réseau insulaire)

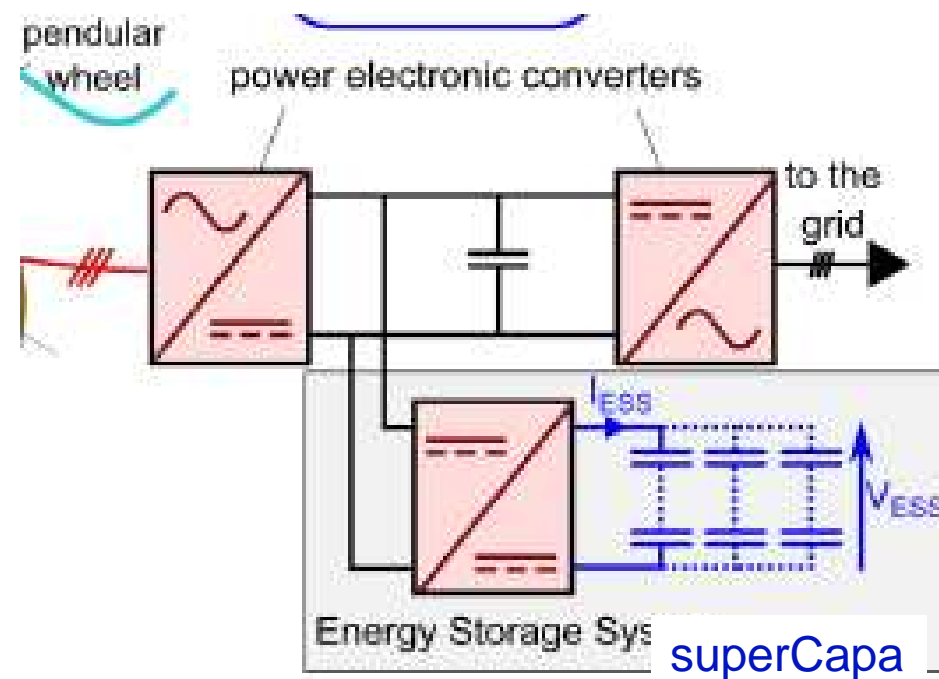
Impacts de raccordement :

- ✓ Plan de tension
- ✓ tenue thermique
- ✓ **Flicker**



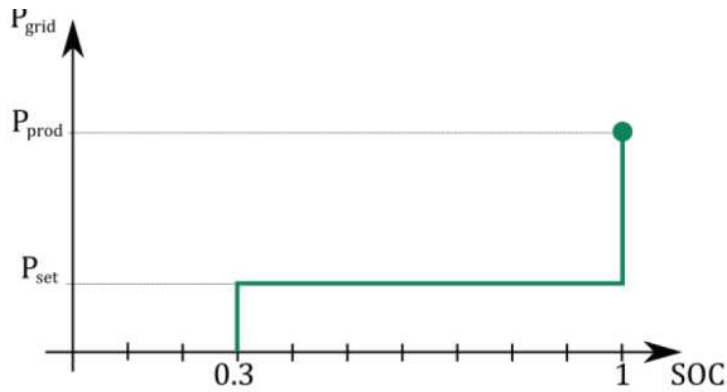
Deux solutions pour réduire les fluctuations rapides de P :

Utilisation de lissage par système de stockage
(batterie de SuperCapacités)

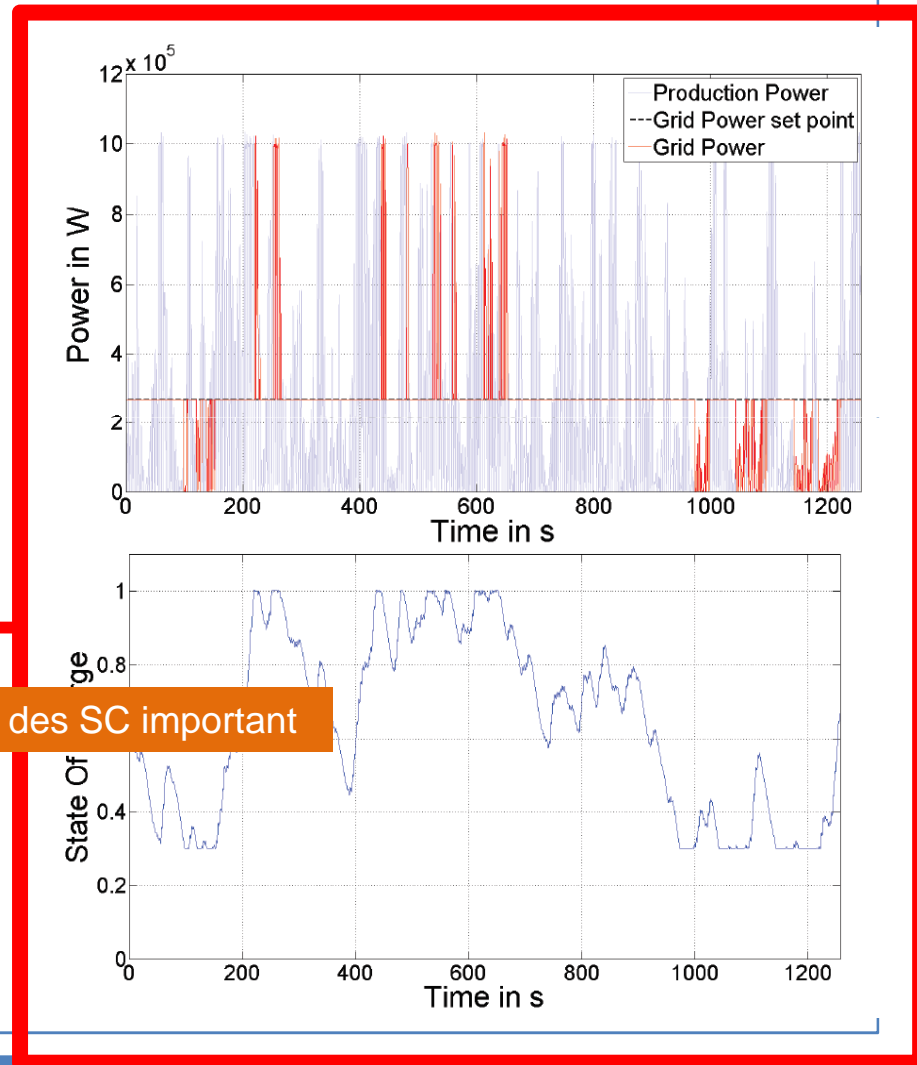
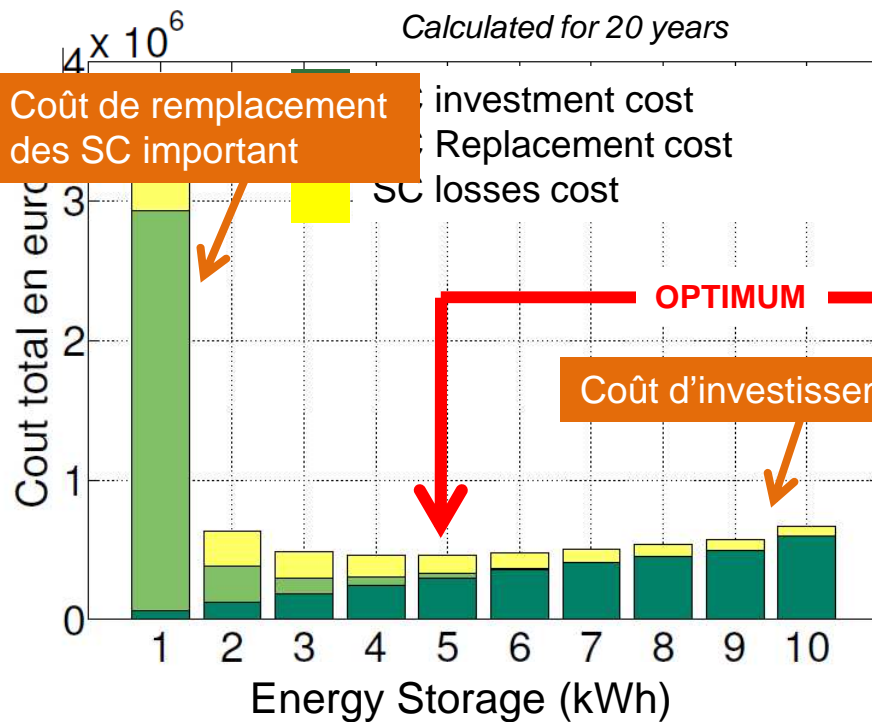


Source : thèse J. Aubry, 2011

Une contrainte : Limitation de flicker

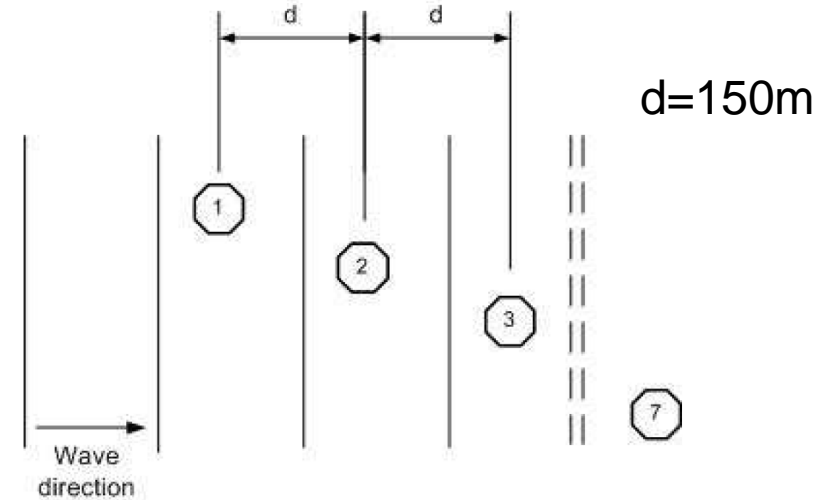


Source : thèse J. Aubry, 2011

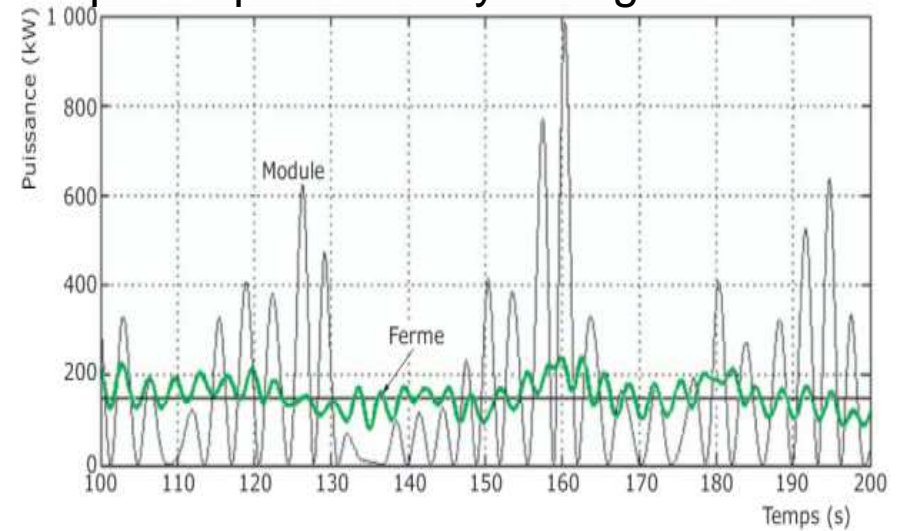


Seconde solution :

Effet de foisonnement



power produced by a single module



Synthèse

La houlégénération : un problème scientifique très riche.

C'est un problème fondamentalement couplé.

La pluridisciplinarité est source de recherche disciplinaires « nouvelles »

mais il faut du temps

et une véritable symétrie d'intérêt scientifique ...

Energies Marines Renouvelables : L'houlogénération

H. BEN AHMED

B. MULTON, T. KOVALTCHOUK, J. AUBRY

Laboratoire SATIE (UMR CNRS 8029)
Ecole Normale Supérieure de Rennes

benahmed@ens-rennes.fr

Journées du groupe thématique transverse AUM
27-29 Août 2014, ENS Cachan