

Energie houlomotrice et polymères électroactifs

Claire Jean-Mistral

Maître de Conférences

LaMCoS
UMR CNRS5259 / INSA-LYON
20 Avenue Albert Einstein
69 621 Villeurbanne, France

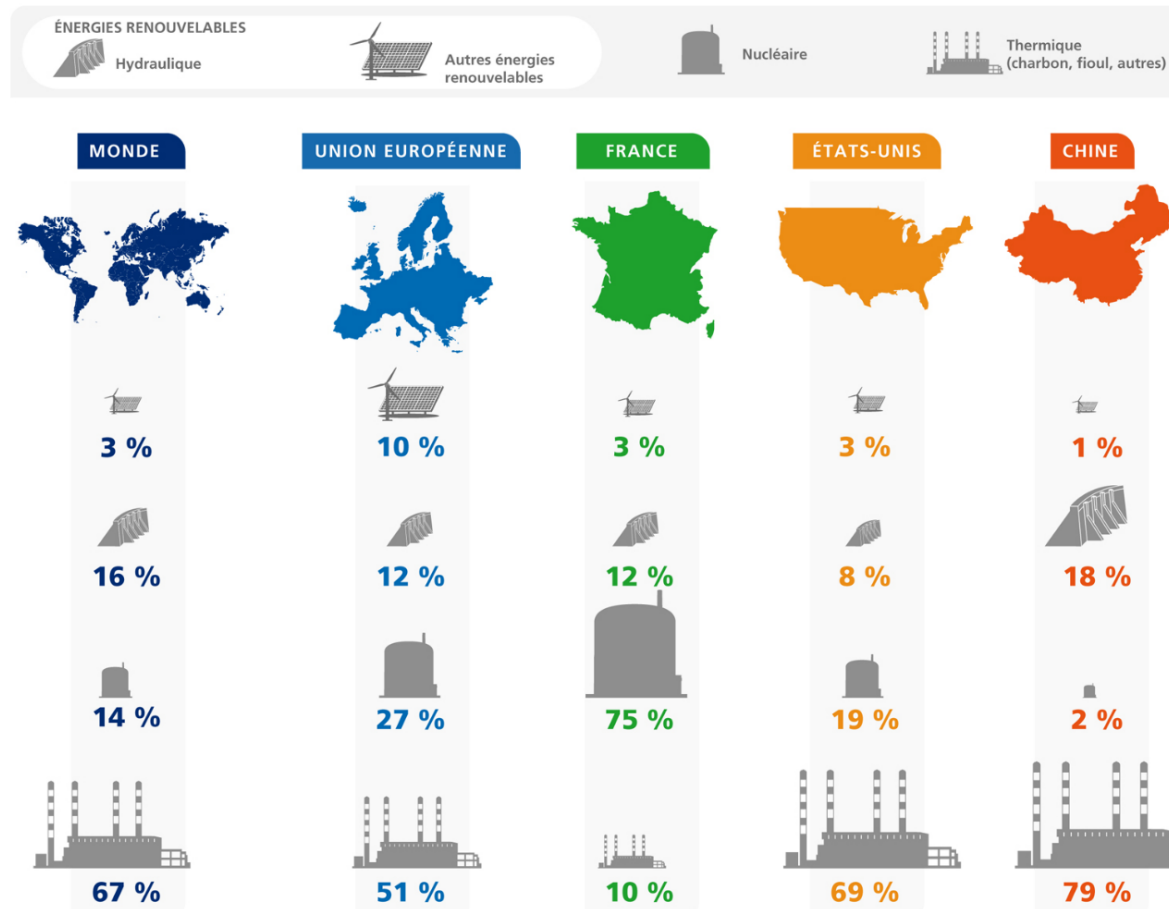
Récupération de l'énergie houlomotrice

Les énergies électriques dans le monde

ÉLECTRICITÉ DANS LE MONDE

COMMENT EST PRODUITE L'ÉLECTRICITÉ ?

Source : AIE



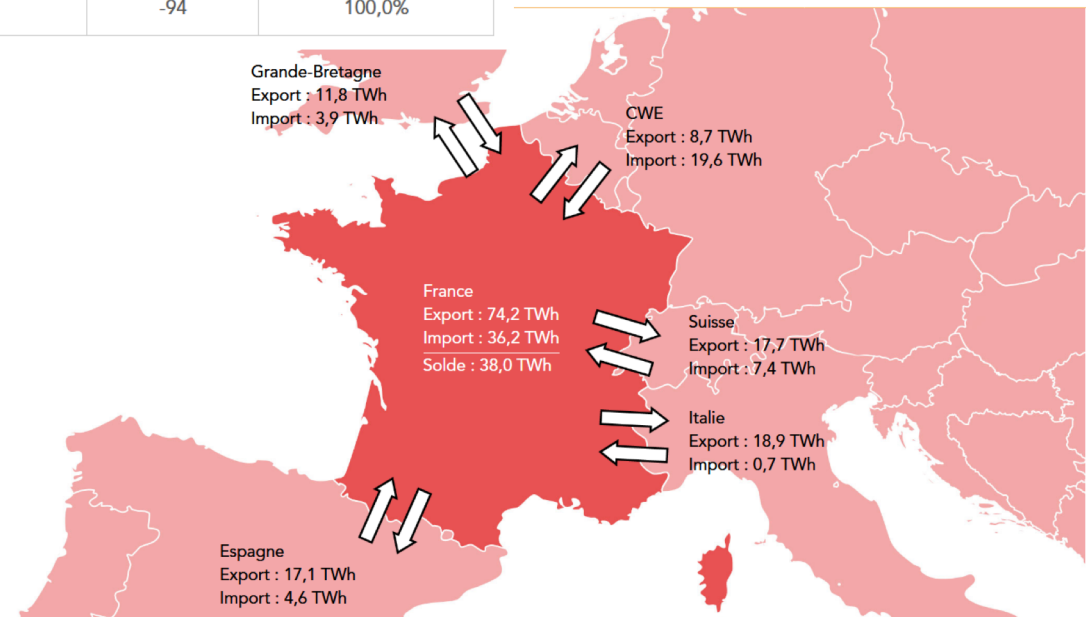
Zoom sur les installations en France

Puissance installée au 31/12/2017	Puissance MW	Evolution par rapport au 31/12/2016	Evolution MW	Part du parc installé
Nucléaire	63 130	0,0%	0	48,3%
Thermique à combustible fossile	18 947	-13,1%	-2 857	14,5%
<i>dont charbon</i>	2 997	0,0%	0	2,3%
<i>dont fioul</i>	4 098	-42,6%	-3 039	3,1%
<i>dont gaz</i>	11 851	1,6%	183	9,1%
Hydraulique	25 517	0,2%	48	19,5%
Eolien	13 559	15,3%	1 797	10,4%
Solaire	7 660	13,1%	887	5,9%
Bioénergies	1 949	1,6%	31	1,5%
Total	130 761	-0,1%	-94	100,0%

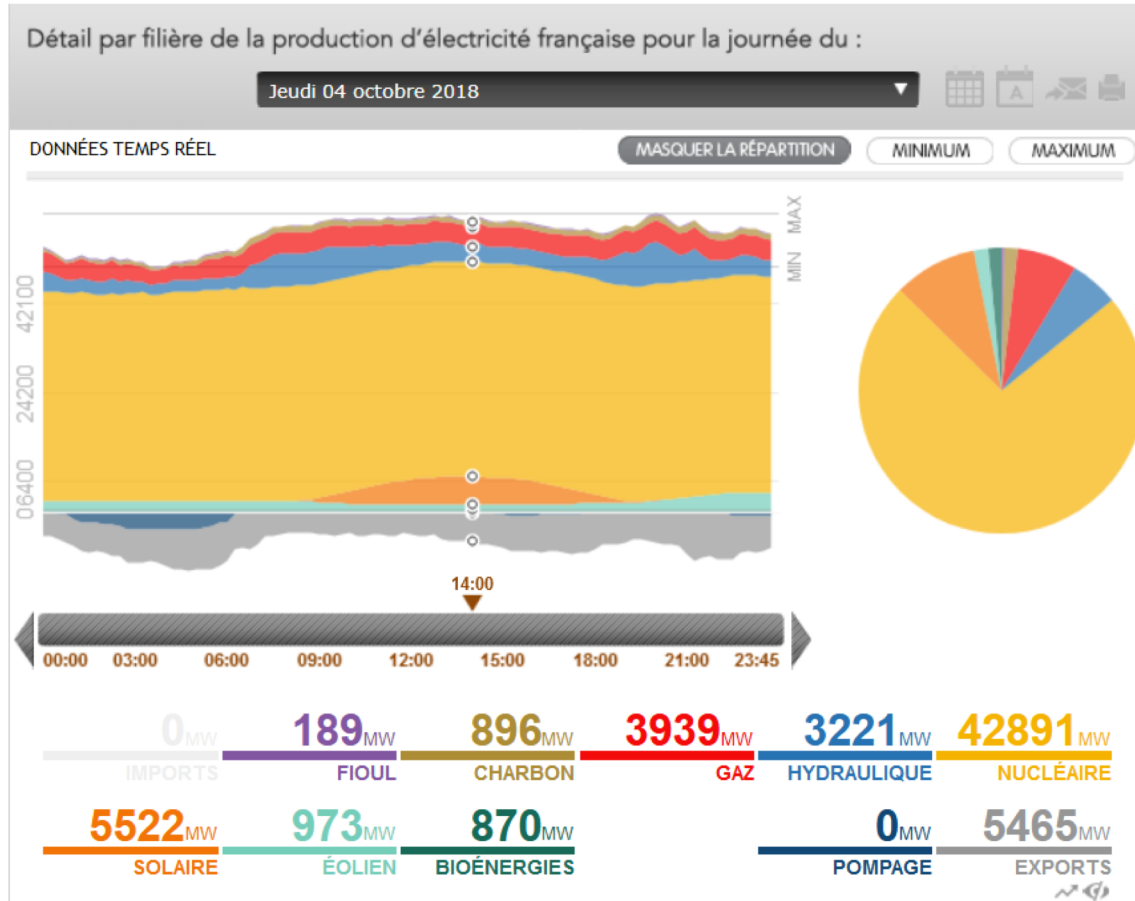
Source : RTE, site Eco2Mix

Puissance EnR installée

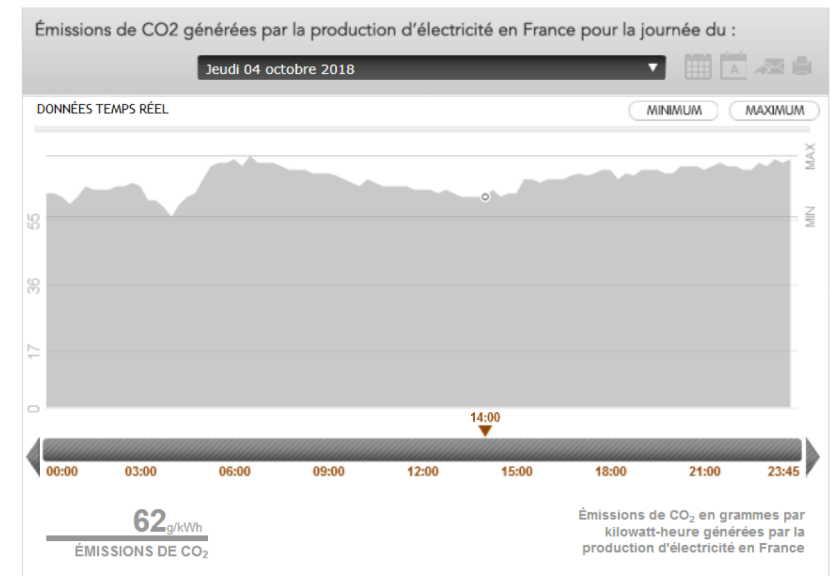
- France : 50GW
- Allemagne : 117GW
- Italie : 60,6GW
- Espagne : 51,8GW



Zoom sur la production en France : Jeudi 4 Octobre 2018 en France



- Consommation annuelle 481 TWh (2017) dont 18,4% en renouvelable
- Production 529,4 TWh (2017). Part du nucléaire 71,6% (valeur la plus basse depuis 1992)
- 27,88 Mt de CO₂ en 2017 (en augmentation)

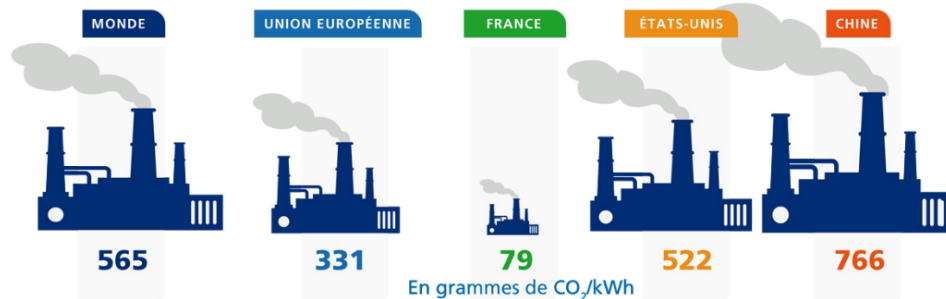


Source : RTE, site Eco2Mix

La production d'énergie électrique contribue à hauteur de 40% aux émissions de CO₂

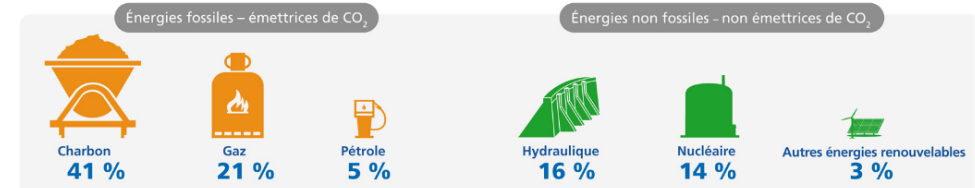
QUI ÉMET LE MOINS DE CO₂ ?

Source : AIE, "CO₂ emissions from fuel combustion"
Émissions de CO₂ issues de la production d'électricité - 2010



LES SOURCES D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE DANS LE MONDE

Source : AIE



Mode de production de 1kWh	Emissions de CO ₂ en g
Hydraulique	4
Nucléaire	6
Eolien	3 à 22
Photovoltaïque	60 à 150
Fuel	891
Charbon	978

D'autres études tablent sur 60 à 90g de CO₂/kWh (extraction et enrichissement du minerai, allongement de la durée de vie 50 à 60ans?)

D'autres études tablent sur 14 à 80g de CO₂/kWh

Source : Etude ACV - DRD,
extrait de la Revue Générale Nucléaire N°1/2000

La coût de production de l'énergie électrique

ÉLECTRICITÉ EN FRANCE : LES DIFFÉRENTES SOURCES D'ÉNERGIE



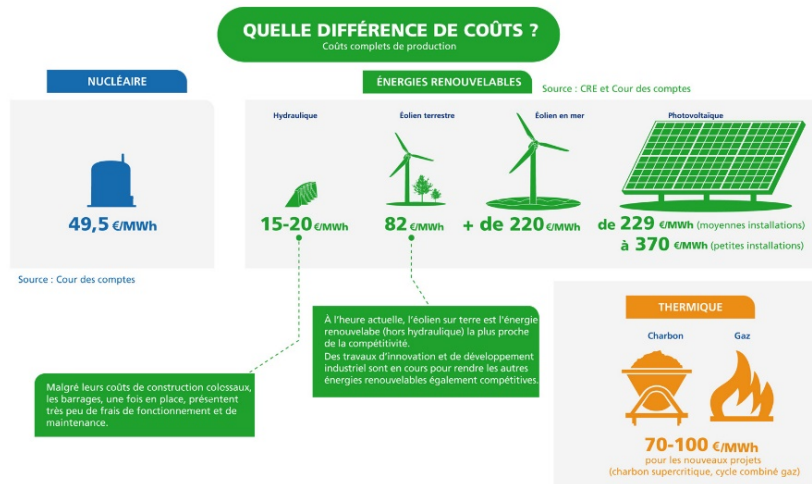
1 réacteur nucléaire produit 900MW, 1200MW ou 1450MW



Une éolienne de 1MW coûte environ 1M€ (fabrication + installation)



La prix des panneaux solaires a fortement chuté ces dernières années (marché chinois)



Levelized Cost of Energy (LCOE) ou « coût actualisé de l'énergie »

CAPEX(t) investissement

OPEX(t) opération, maintenance

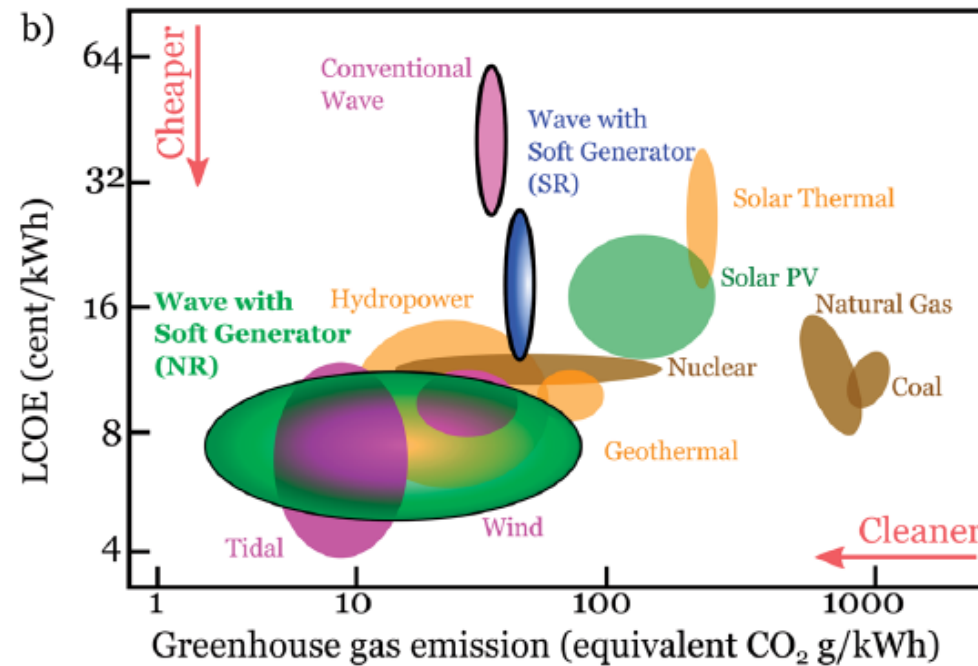
FUEL(t) combustible

EGEN(t) électricité produite

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^T \frac{CAPEX(t) + OPEX(t) + FUEL(t)}{[1 + r(t)]^t}}{\sum_{t=1}^T \frac{EGEN(t)}{[1 + r(t)]^t}}$$

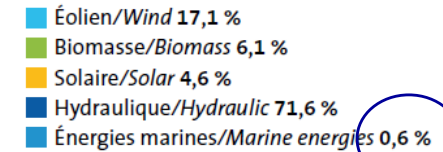
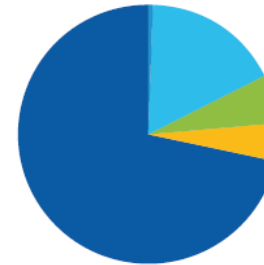
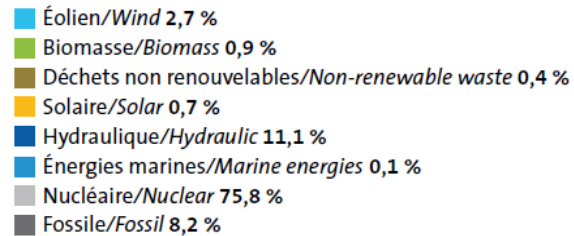
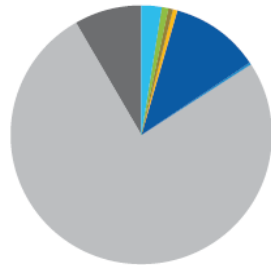
Augmenter la part de renouvelable?

- Nombreux projets et objectifs développés (H2020, Copil, ITE...), moyen suffisant?
- Développement possible sans aide ?
- Est-ce compétitif ?



Les énergies renouvelables ont leur place...

Données pour la France



... mais certaines restent sous exploitées, alors que le potentiel est bien présent.

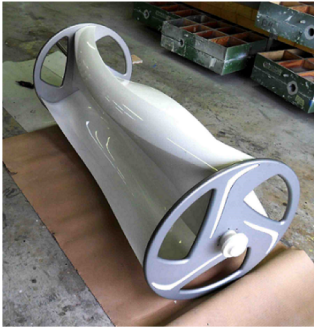
1 - Energie marémotrice : de l'ordre de 400 TWh/an au niveau mondial

	Monde	Europe continentale	France métropolitaine
2 - Energie hydrolienne	400 à 800 TWh/an	15 à 35 TWh/an (6 à 8 GW installés)	5 à 14 TWh/an (2 à 3 GW installés)
3 - Energie houlomotrice	2 000 à 8 000 TWh/an	150 TWh/an (environ 50 GW installés)	environ 40 TWh/an (10 à 15 GW installés)
4 - Energie thermique des mers	10 000 TWh/an	0	0 (Outremer seulement)
5 - Energie osmotique	1 700 TWh/an	200 TWh/an	Non évaluée

La production mondiale d'électricité est de 23 405,7 TWh

Les énergies marines en France

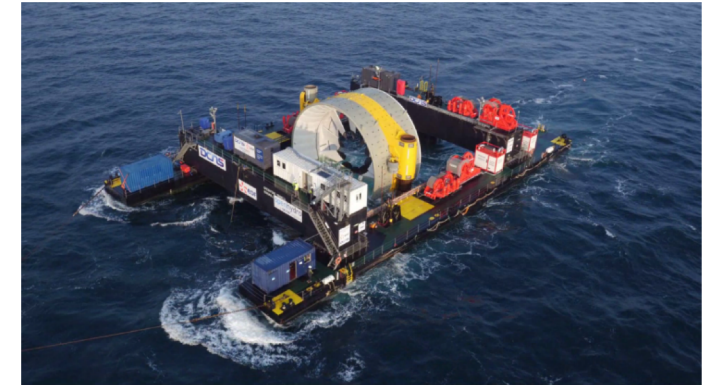
Actuellement, la France mise sur des technologies proches du stade industriel : éolien offshore et hydrolien.



*Hydrolienne fluviale :
Ecocinetic, HydroQuest,
HydroGen*



*SABELLA –Fromveur
Bretagne – Installé en
2015 - 10m 1MW*



*OpenHydro (société irlandaise rachetée par
DCNS en 2013) – Projet EDF depuis 2008 –
Arcouest – Testé à Paimpol Côte d'armor en
2012 – 16m 0,5 à 2MW*

*Alstom Hydro (GE) a
racheté en 2013 la
société Tidal Generation
- Projet avec GDF Suez -
Oceade 18m 1,4MW*



Deux gros consortium : Engie (GDF) /GE
(Alstom) et EDF/DCNS

Installation de ferme énergétique dans la
zone du Raz Blanchard (7 openhydro et 4
Oceade en 2017)

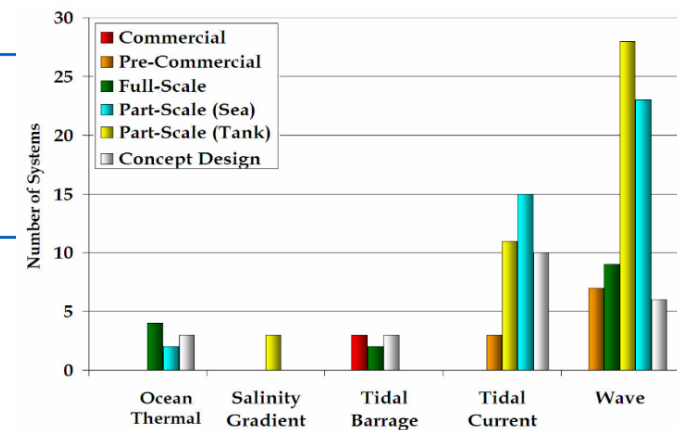
GE suspend ces activités sur les hydroliennes (janvier 2017) et la DCNS a rapatrié ces 2 hydroliennes installées en 2016 pour cause de corrosions sur les boulons (source Les Echos)



Et l'houlomoteur? en France?

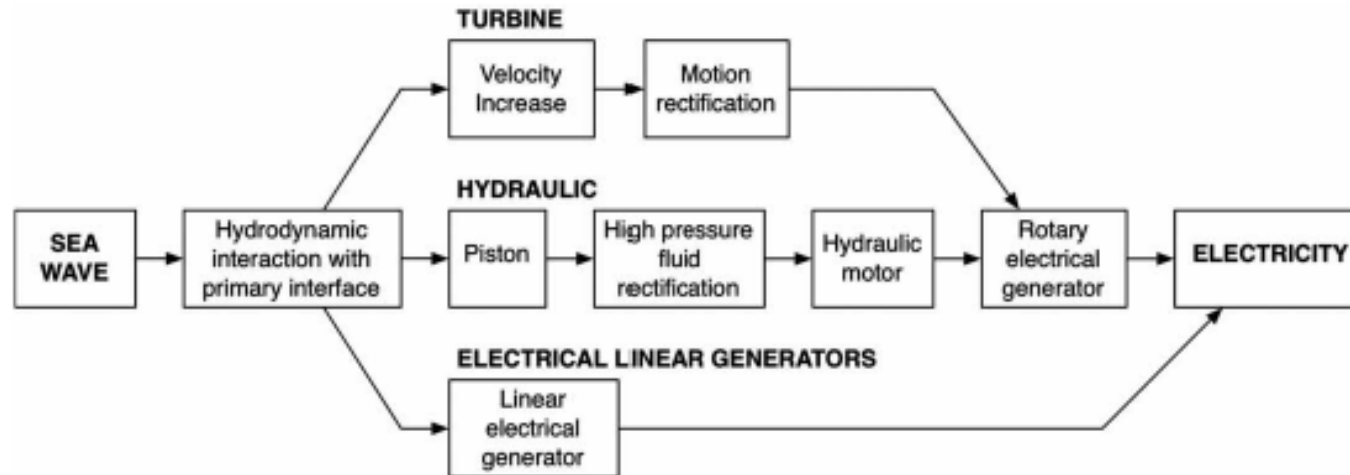
Filière à très fort potentiel (40TWh/an) mais peut mature en France, Filière en cours de développement

	Systèmes OWC (colonne d'eau oscillante)	Systèmes oscillants		Systèmes à franchissement	Autres
		Translation	Rotation		
Offshore Systèmes ancrés au fond (ou en mvt / à une structure ancrée au fond)	OceanLinx (<i>Mighty Whale</i>) OceanEnergy Sperbuoy	Wavebob, OPT Powerbuoy, (<i>Aquabuoy</i>)	Pelamis, SEAREV, PS Frog	Wave Dragon	Anaconda Polymères électro-actifs (SRI)
Nearshore Systèmes fixés/articulés au fond (ou en mvt / à une structure fixée au fond)		FO3 WaveStar CETO, AWS Seabased Wavetreader (sur éolienne)	Oyster, WaveRoller, BioWave ECOFYS (sur éolienne)		Rotors de type Savonius (au fond ou sur éolienne)
Systèmes fixés/articulés ou intégrés sur un ouvrage côtier ou portuaire	Wavegen (Mutriku, Ile Lewis) Sakata Estuaire Douro		SDE (Israel)	SSG	
Côte Systèmes spécifiques construits à la côte	PICO, Wavegen (Limpet, SeWave)			TAPCHAN (avec concentrateurs)	



Beaucoup de concept mais aucune commercialisation (Fiabilité? Rentabilité?)

Rappel

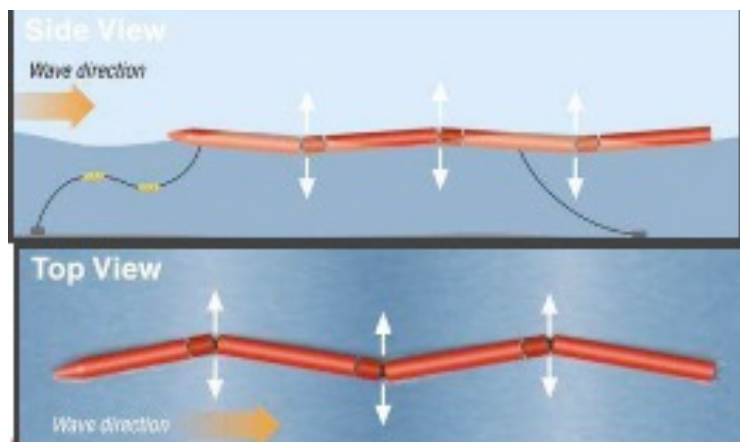


- Principe de fonctionnement :
 - Power Take Off (PTO)
 - Moteur électrique linéaire ou rotatif

- Caractéristiques principales:
 - Puissance : 150kW à 2MW (Réacteur nucléaire 900MW, Eolien 1MW)
 - Le prix €/kWh de l'électricité est 5 fois plus élevé que celui du nucléaire
 - Peu de companies sur le secteur, beaucoup de recherché et de prototypes, engouement fort ces 10 dernières années

Exemple 1 : Pelamis

- Société écossaise (Pelamis Wave Power 1998-2014 , Highland and Islands Enterprise?)
- Conversion hydraulique
- 4 segments, 3 jonctions (vérins hydraulique qui envoit un fluide haute pression vers une turbine)
- Longueur 140m
- Diamètre 3,5m
- Puissance 750kW
- LCOE 26,5 à 61,7 ct/kWh



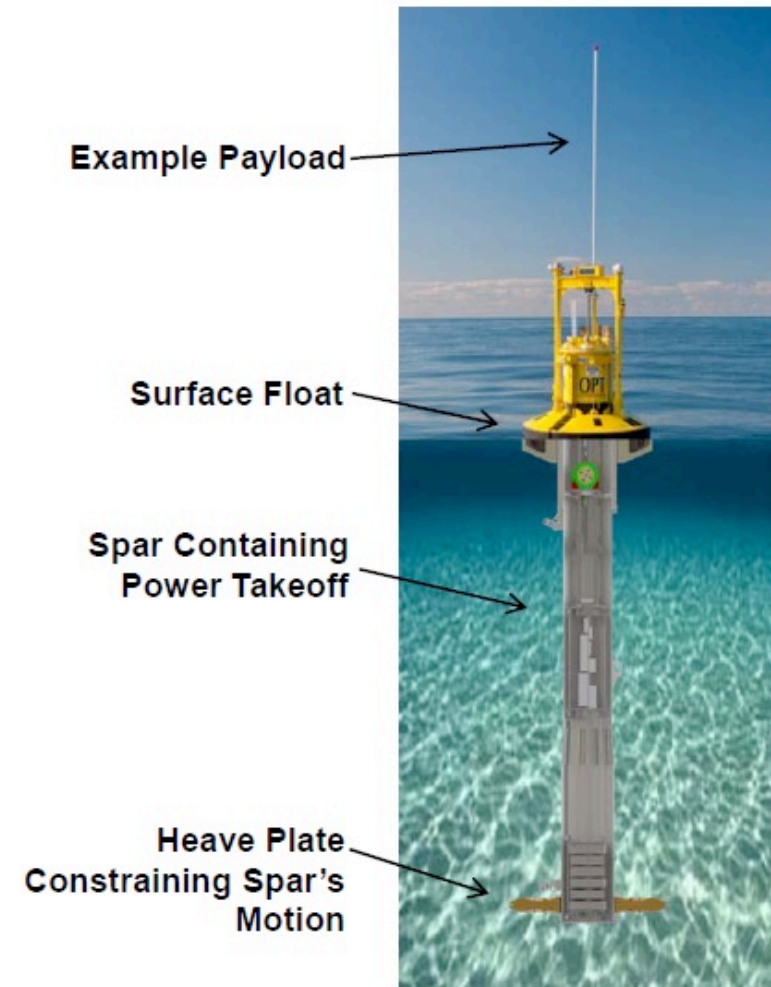
- Testé en 2008 à Aguçadoura (Portugal), rapatrié en 2009 pour problèmes techniques
- Une seconde génération testé au large de l'écosse pour les producteurs E.On et ScottishPower



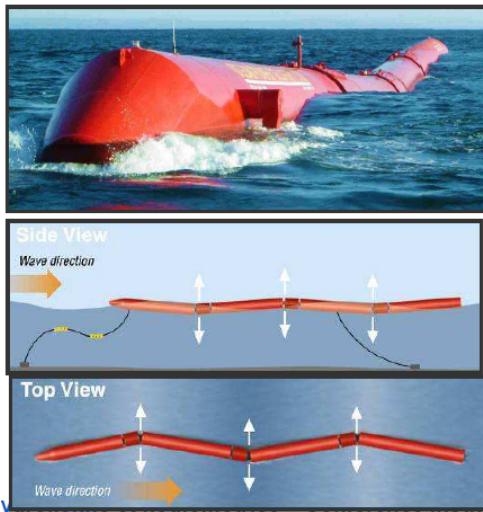
Exemple 2 : Ocean Power Technologies OPT

- Société américaine (1997)
- Conversion hydraulique
- Structure flottante qui absorbe l'énergie dans toutes les directions (PTO + conversion mvt linéaire/rotatif + génératrice électrique)
- Prototype de 40kW testé en 2004
- Plusieurs projets en cours aux US (New Jersey, Oregon) et en Europe (Espagne, Angleterre)

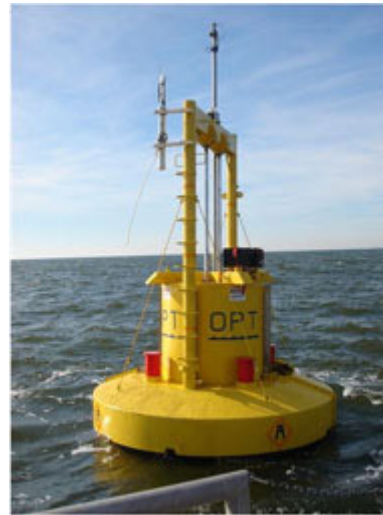
DIMENSIONS & DEPLOYMENT	APB350	PB40
Overall Length	12.75 m	33.8 m
Weight	10,000 kg	114,220 kg
Deployment Depth	25 m – 1,000 m	45 m – 500 m
ELECTRICAL		
Continuous Average Power (Site dependent)	350 W	9 kW to 15 kW
Power Capacity (80% Availability)	7,200 Wh/Day	170 kWh/Day to 285 kWh/Day
Payload Peak Power	Up to 15 kW	Up to 50 kW
Battery Capacity (Energy Storage System)	20 kWh to 250 kWh	20 kWh or 250 kWh



Limitations des technologies actuelles

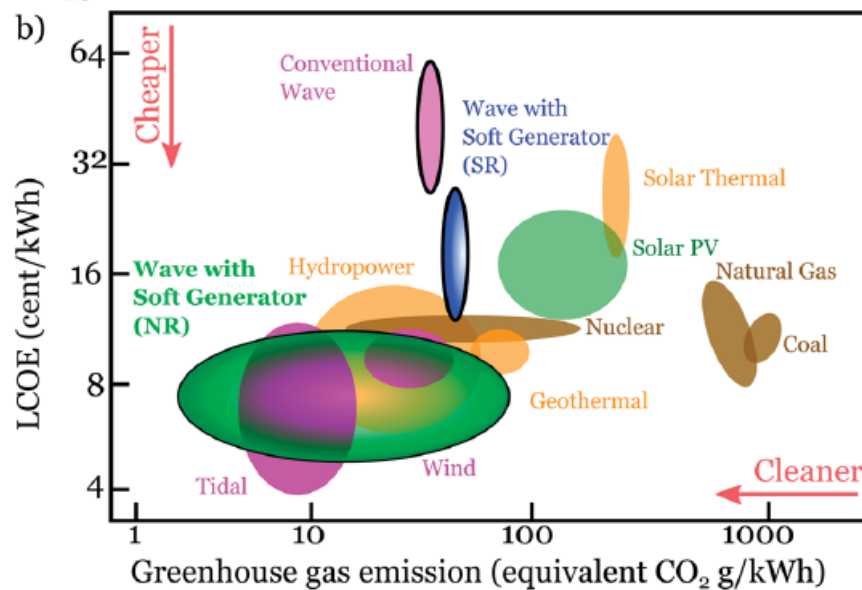


Pelamis



Ocean Power Technology

- Systèmes rigides oscillants (*Power Take Off*) couplés à un générateur hydraulique
- Maintenance lourde
- Coût élevé
- Robustesse non démontrée



Besoin de technologies en rupture qui s'affranchissent du PTO et qui aient un coût faible.....

Technologies en rupture : générateur électroactif (DEG)

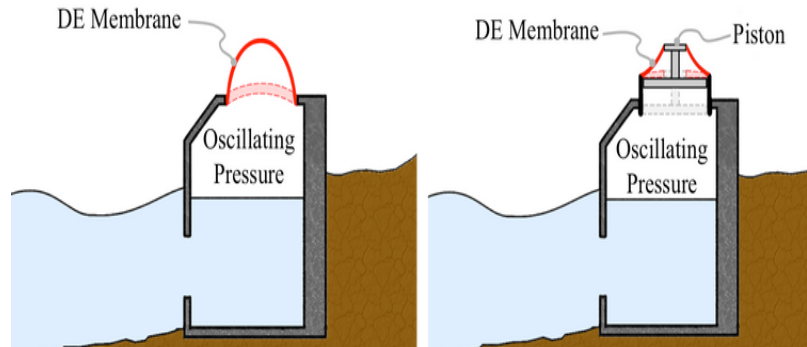


Bouée du SRI International

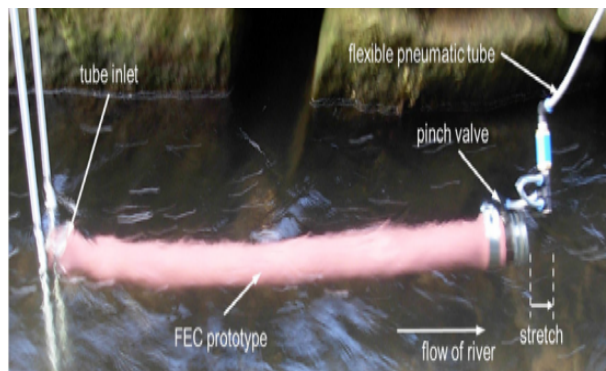


S3 WEC par SBM Offshore 2010

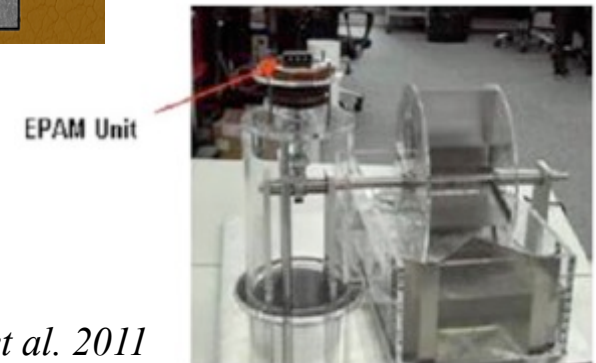
- Systèmes SOUPLES
- Aucun absorbeur : maintenance et coût réduit



Projet européen Polywec



Graaf et al. 2013



Chiba et al. 2011

Un polymère électroactif ? C'est quoi?

Composé **organique**, capable de répondre à une stimulation électrique par un changement en dimensions et formes.

	Famille Electronique	Famille Ionique
	<ul style="list-style-type: none"> ● Activée par un champ électrique extérieur 	<ul style="list-style-type: none"> ● Diffusion d'ions ou de molécules au sein du matériau
Exemple	<ul style="list-style-type: none"> ● Polymère piézoélectrique : PVDF ● Elastomère diélectrique : acrylate, silicone 	<ul style="list-style-type: none"> ● Polymère conducteur ionique : polypyrrole ● Polymère ionique composite : Nafion
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> ● Force importante générée ● Temps de réponse court 	<ul style="list-style-type: none"> ● Déplacements importants ● Nécessite un champ électrique faible (10kV/m)
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> ● Haut champ électrique requis (~de 20 à 150 MV/m) 	<ul style="list-style-type: none"> ● Temps de réponse lent ● Force générée faible



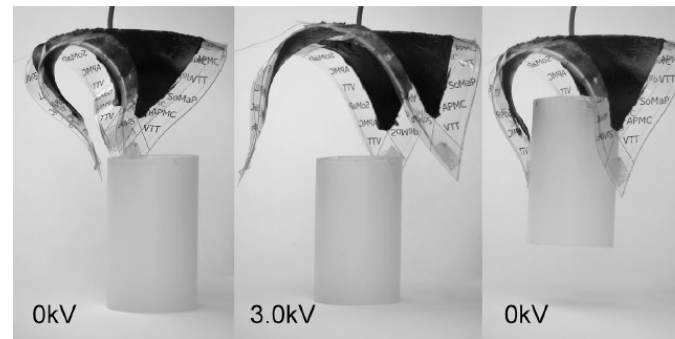
Focus sur les polymères diélectriques (isolant)

Un polymère diélectrique ? On en fait quoi?

Souples, déformables, légers, peu chers et développent des densités d'énergies élevées.



Pei et al. 2004



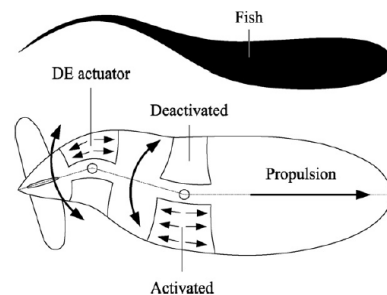
Kofod et al. 2007



Stretch Sense sensor

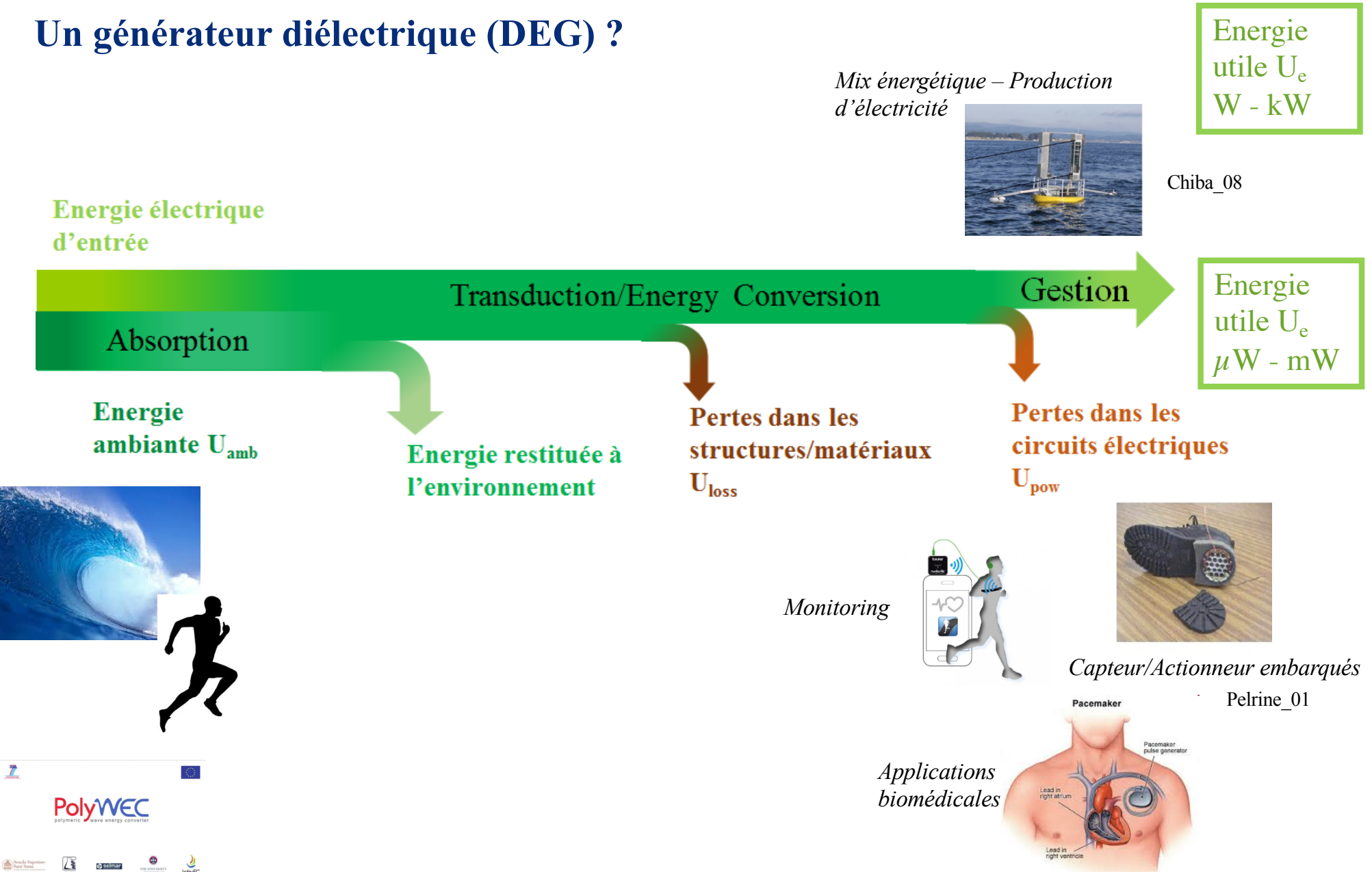


Lochmatter et al. 2008



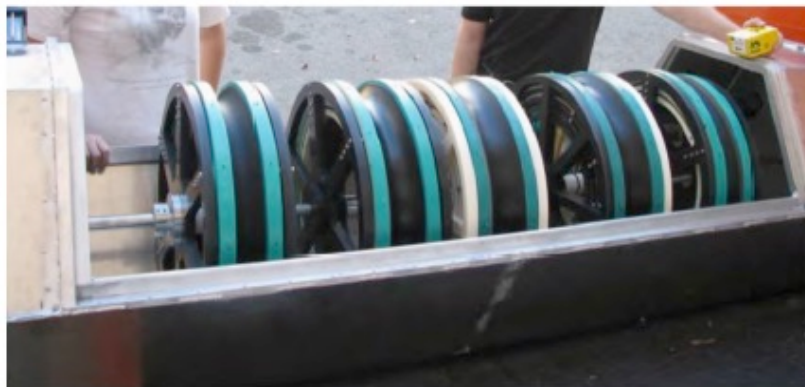
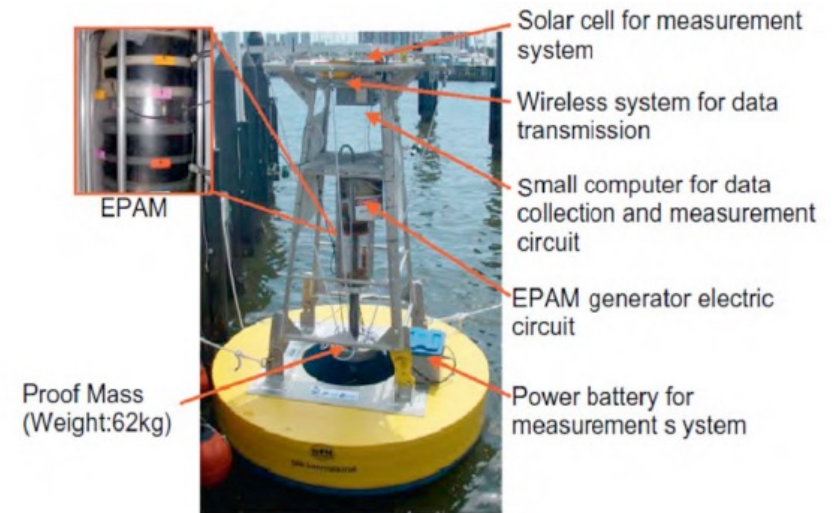
Chiba et al. 2008

Un générateur diélectrique (DEG) ?



Exemple 1 : Bouée du SRI

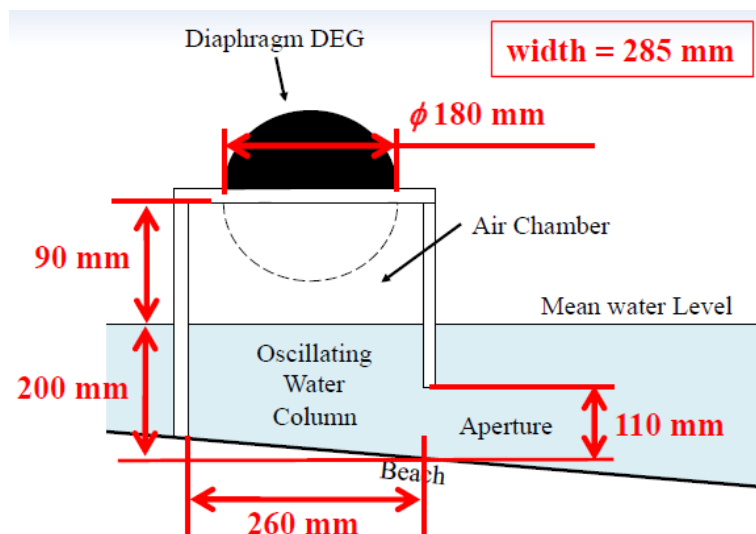
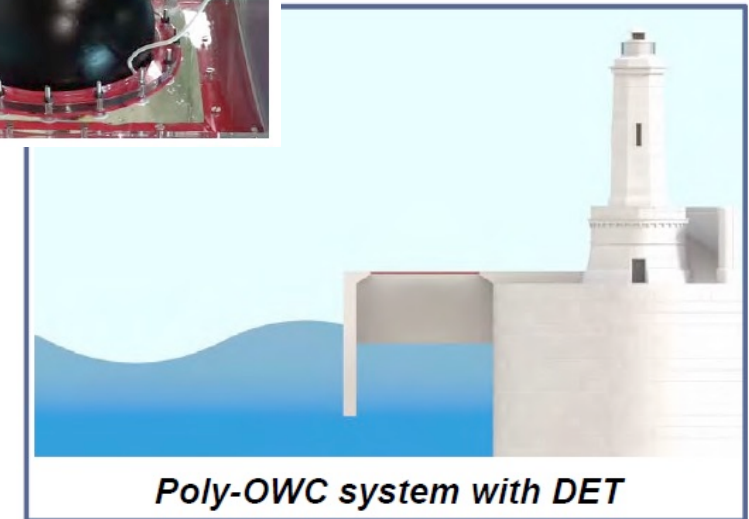
- SRI International (Laboratoire américain entre le public et le privé – « équivalent » du CEA)
- Structure flottante sur laquelle est montée une masse mobile suspendue qui déforme directement le générateur diélectrique DEG au grès des mouvements des vagues. Structure nearshore
- DEG de 30cm de diamètre et 20cm de haut (220g de matériau actif)
- 25J par cycle en laboratoire sous une tension de polarisation de 2kV



- Testé en mer au large de Santa Cruz (Californie)
- 11J par cycle (puissance moyenne de 0,25W) pour des vagues ayant une hauteur de 10cm et une période de 2,5s.

Exemple 2 : Colonne oscillante

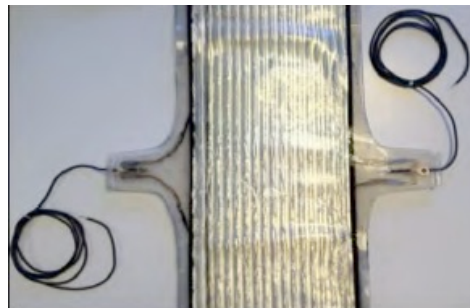
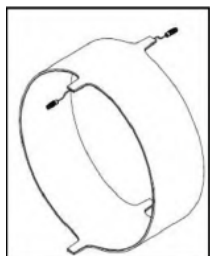
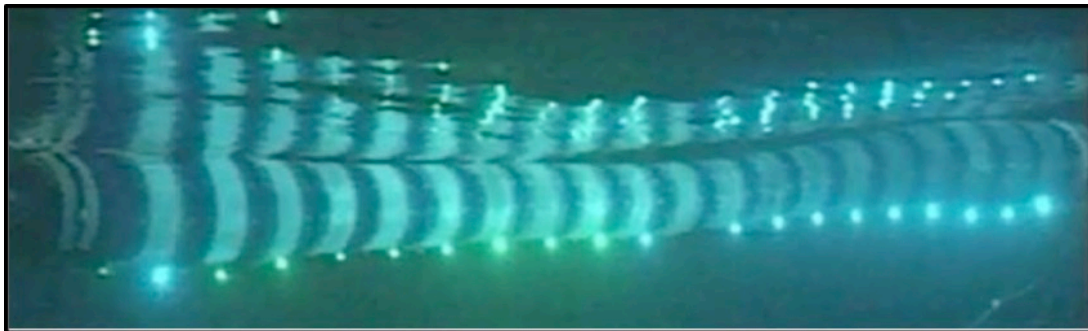
- Santa Anna Pise Italie (dans le cadre d'un projet européen)
- Structure de côte. Les vagues font monter/descendre une colonne d'eau/air. La variation de pression de l'air entraine la déformation du DEG.



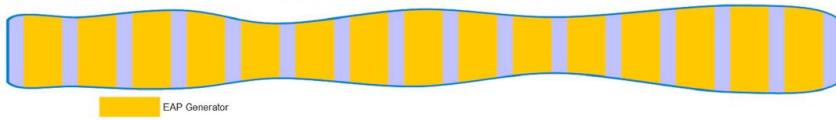
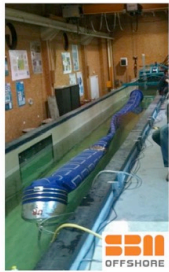
- Prototype à l'échelle 1/50 qui développe une densité d'énergie maximale de $32 \text{ mJ} \cdot \text{g}^{-1}$ ($H=4\text{cm}$, $f=0,6\text{Hz}$)
- Un système à taille réelle pourrait extraire 68kW en moyenne pour $H=2\text{m}$ et $T=11,7\text{s}$

Exemple 3 : Tube oscillant

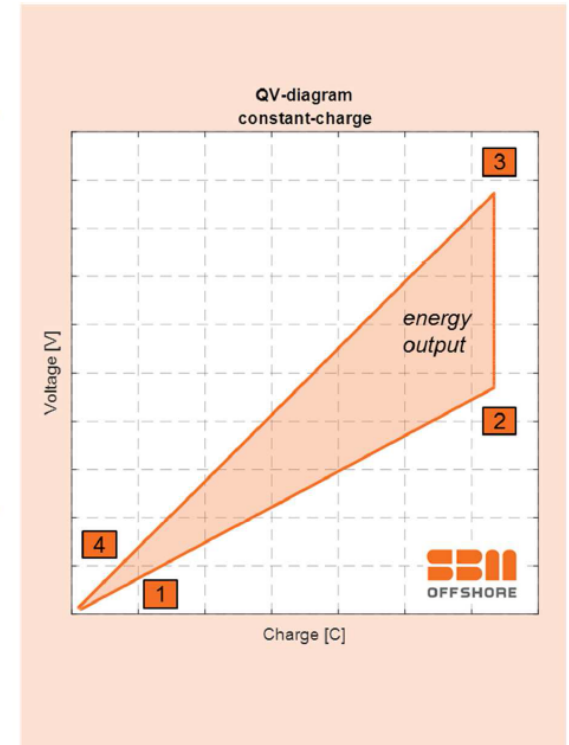
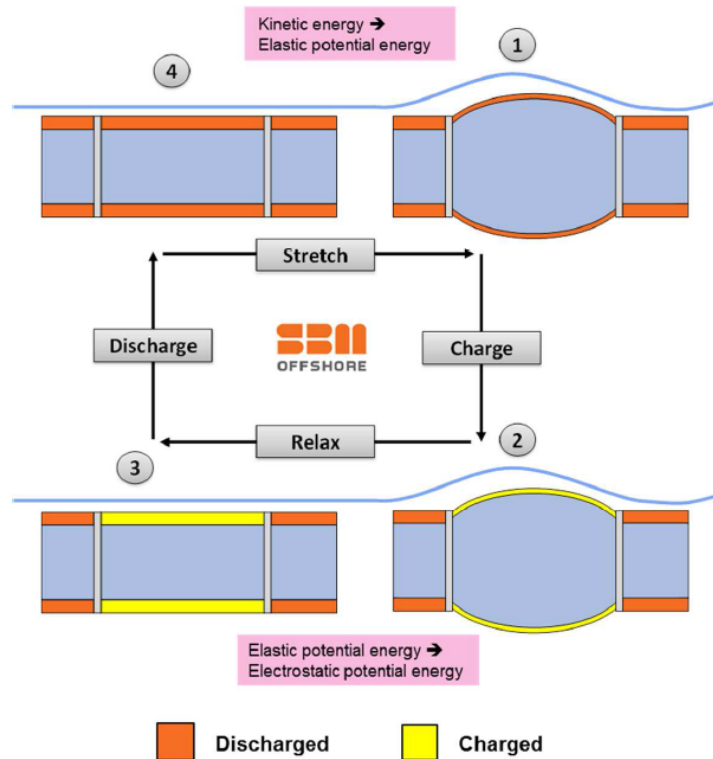
- SBM Offshore (Monaco – holding hollandaise)
- Structure fermée, composée de 25 bagues en élastomère liées par des renforts, rempli d'eau de mer légèrement sous pression. Les vagues appliquent une pression variable sur le tube qui se déforme. Le tube est directement le DEG.



- Longueur 11m, diamètre 40cm
- Test en bassin, puissance moyenne de 0,45W pour $H=20\text{cm}$ et $T=2,5\text{s}$
- 15000 cycles à 80% de déformation
- Ferme de 20 à 100 unité : 2.5MW
- LCOE 5 à 11ct/kWh



- Pas de PTO
- Structure multimodale
- Fréquence propre en adéquation avec celle des vagues



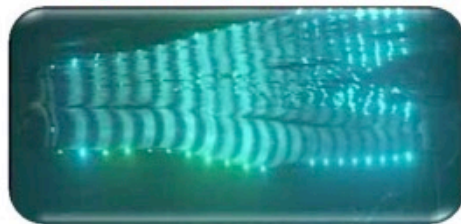
Engineering



Rigid Structure &
inappropriate PTO



Fatigue Friendly structure
Frequency indep. distrib. PTO
Large absorption bandwidth



Reduced CAPEX
&
Improved efficiency

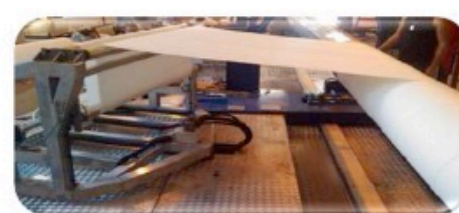
Procurement & Construction



Extensive
Construction



Industrial
Roll to Roll



True Ramp up
to commercialization

Installation



Heavy lift &
Installation



Easier load out
& Installation



Reduced Cost
of Installation

Operations & Maintenance



Periodic
maintenance



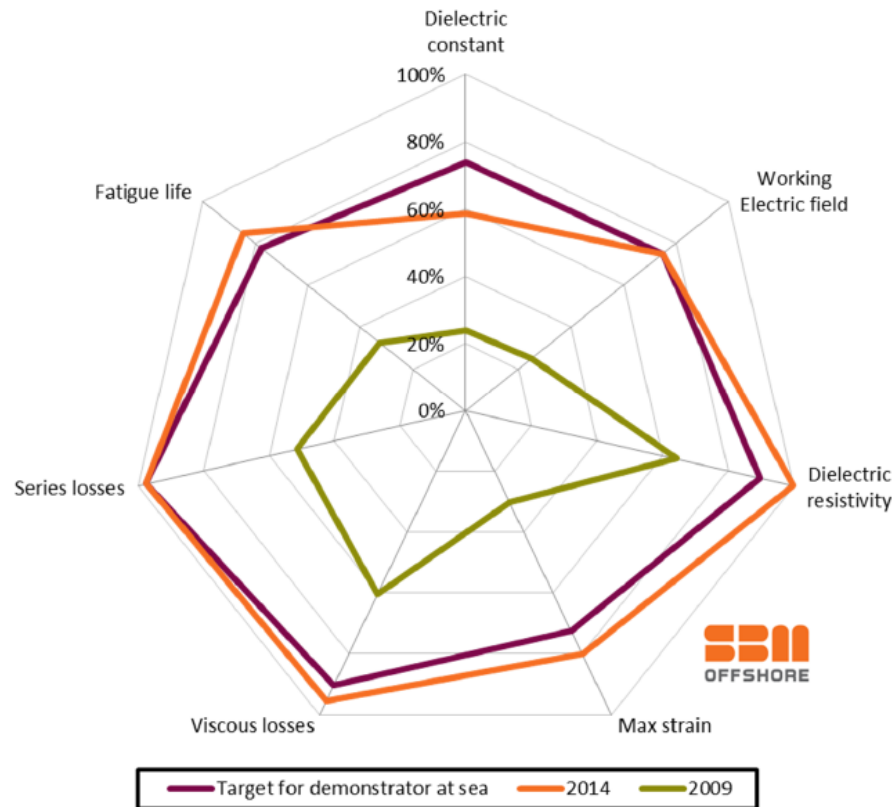
Run Until
Failure



Reduced OPEX

Lower Cost Of Electricity

Les générateurs à base de polymères électroactifs : CHALLENGES



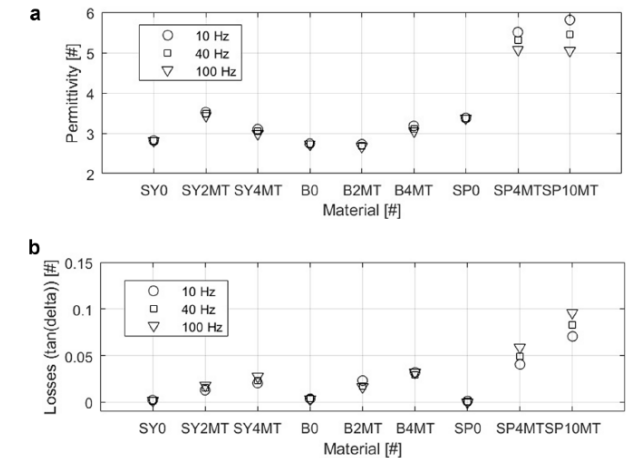
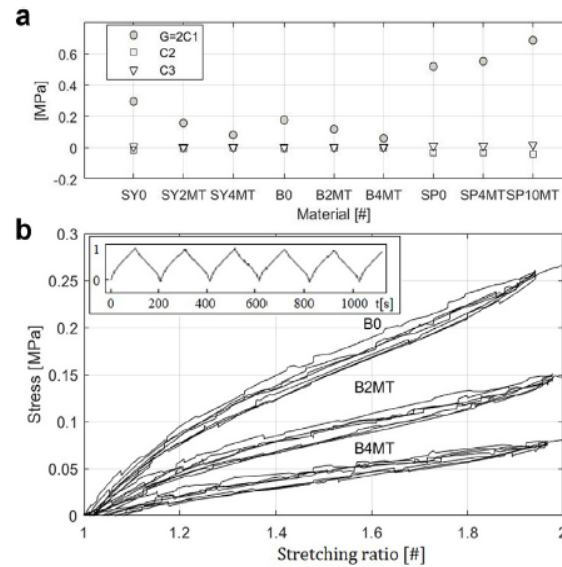
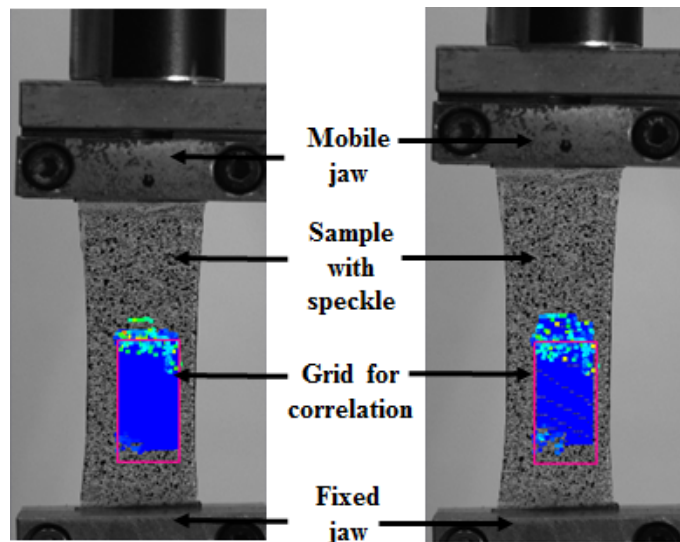
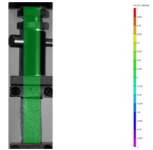
PROJET ANR 'SEASEA'

- Améliorer les matériaux utilisés dans un générateur EAP.
- Proposer une architecture mécanique et électrique qui optimise la conversion d'énergie.

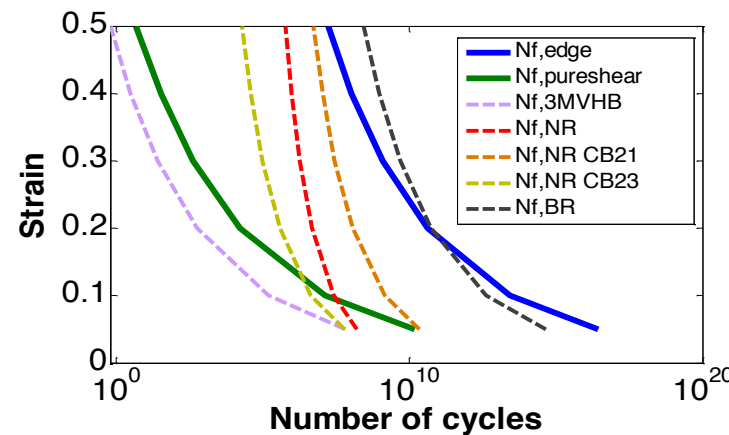
- Evaluer et analyser la fiabilité, la 'cyclabilité' et la fatigue des générateurs EAP lors d'un fonctionnement nominal. Augmenter la durée de vie des générateurs EAP.

Amélioration des matériaux

- Nouveaux matériaux : Particule OMMT dans matrice silicone



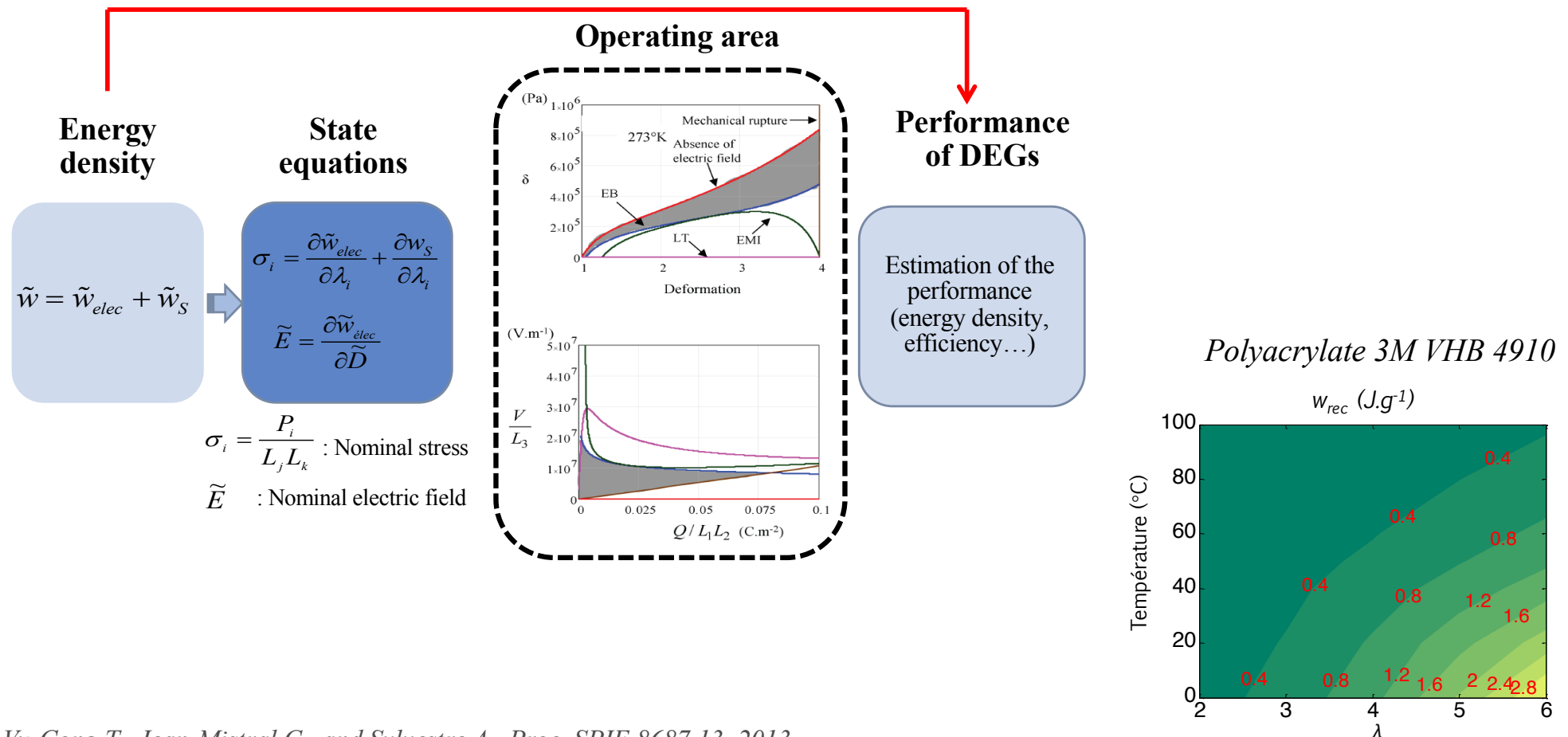
- Test de durée de vie mécanique



*Silicone Elastosil 2030
160 μ m 50% : 17,3 millions
de cycles estimés*

Estimation des performances

Toutes les caractérisations électriques et mécaniques du matériau sont utilisées comme données d'entrée d'un modèle thermodynamique du transducteur (comparaison, perfs).



Conclusions

- Fort potentiel pour la filière houlomotrice
- Nombreux concepts de générateurs proposés. Énergie propre (peu de CO₂) mais chère (construction, maintenance)
- Innovation possible, prise en compte des contraintes et coût de l'énergie
- Rupture envisagée sur les formes et sur les matériaux