

Les Energies Renouvelables

Marine

Mars 2009



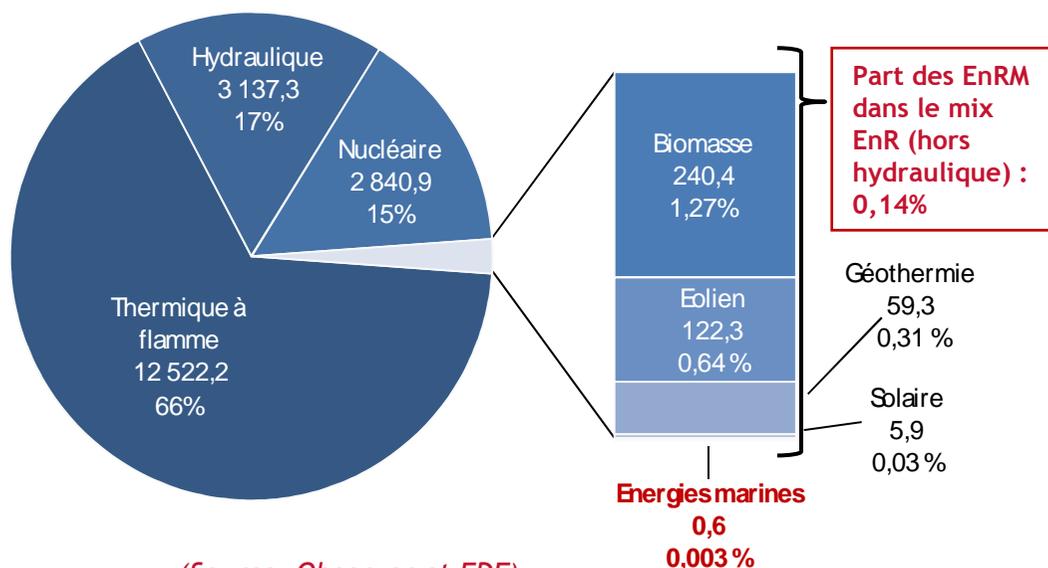
1. Panorama des énergies



Mix énergétique – Périmètre monde

Production mondiale d'électricité par source en 2006 (TWh)

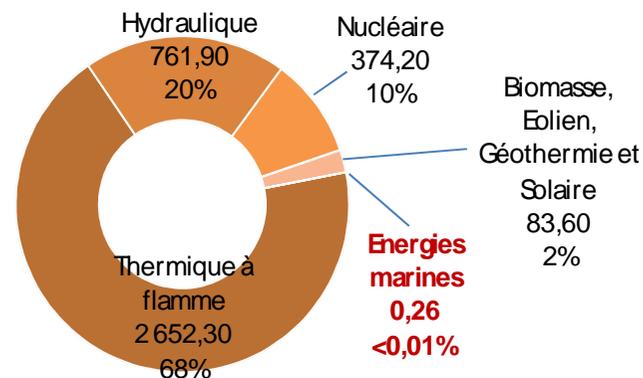
Total: 18 928,9 TWh



(Source: Observer et EDF)

Puissance électrique installée dans le monde par source au 01.01.05 (GW)

Total: 3 872,26 GW



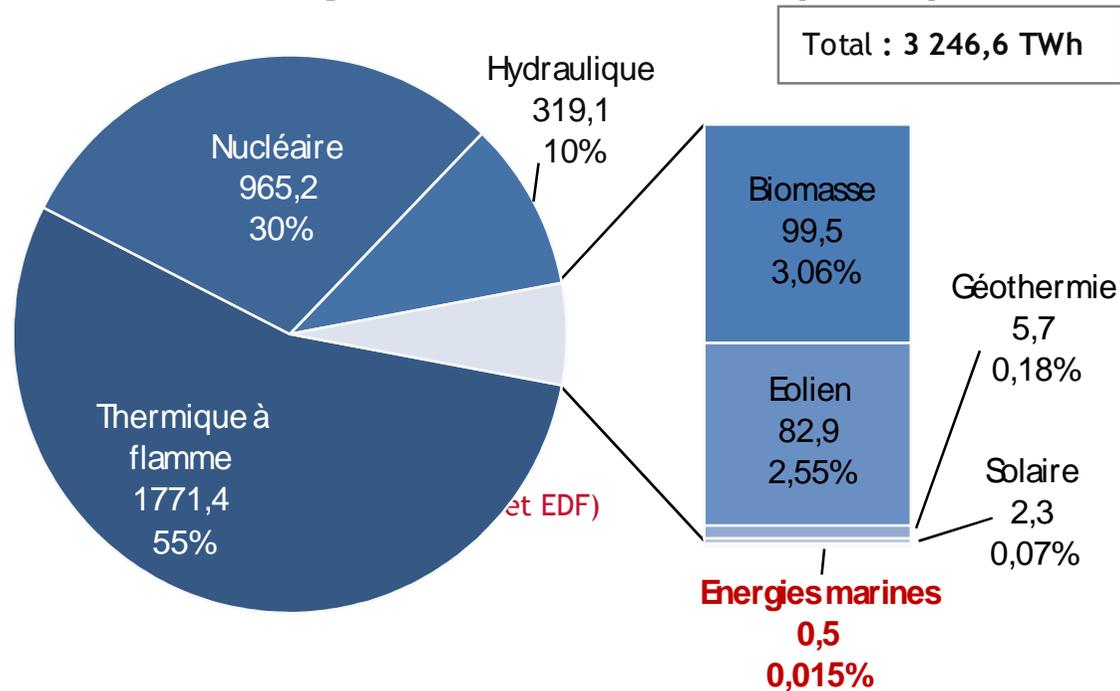
(Source: Energy Information Administration)

En 2006, la production d'électricité à partir d'énergies marines était de près de 600 GWh dans le monde, dont 90% assurée par l'Usine marémotrice de la Rance (550 GWh).

Les énergies marines ne représentent qu'une part négligeable de la production mondiale.

Mix énergétique – Périmètre Union Européenne

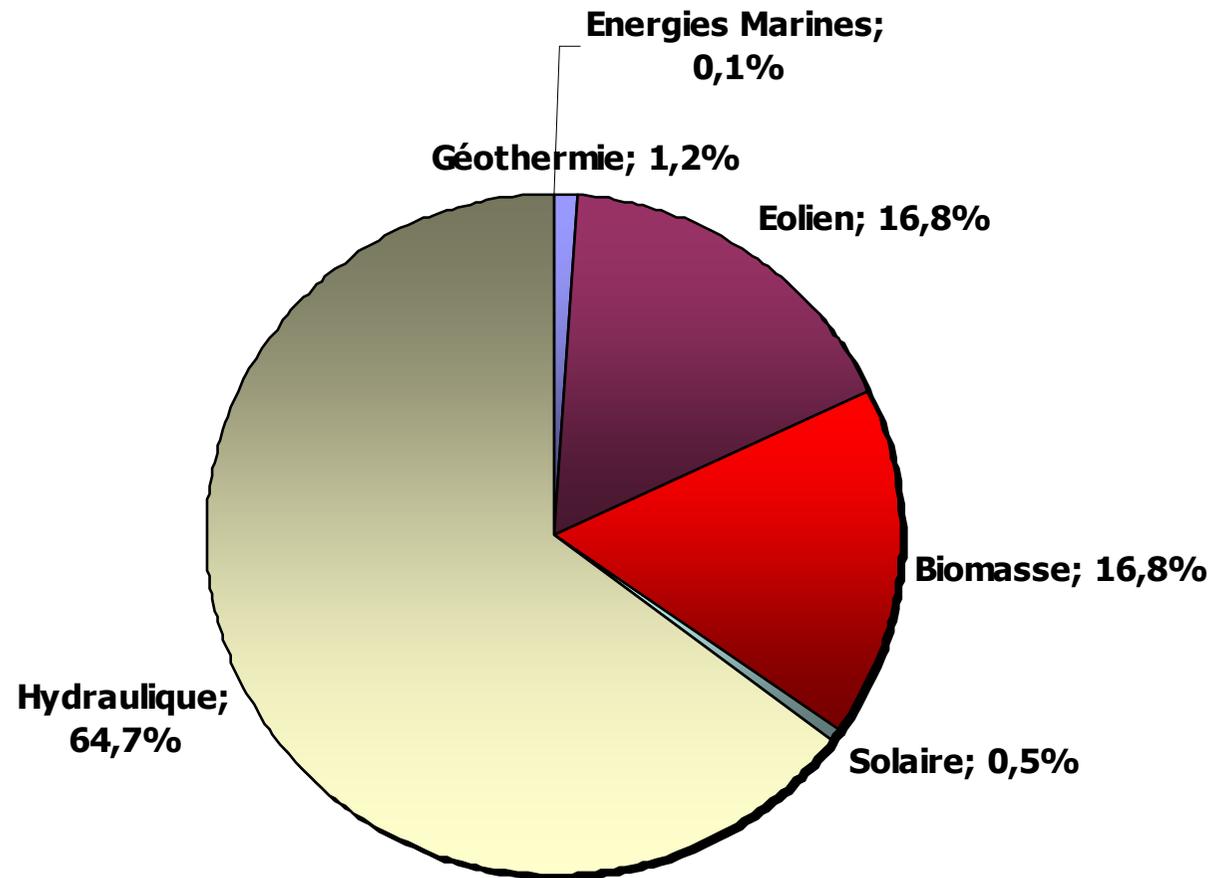
Production d'électricité par source dans l'Europe des 25 en 2006 (TWh)



En Europe, la production d'électricité à partir d'énergies marines est largement due à l'activité de l'usine marémotrice de la Rance, soit 0,015% (cinq fois plus qu'à l'échelle mondiale)

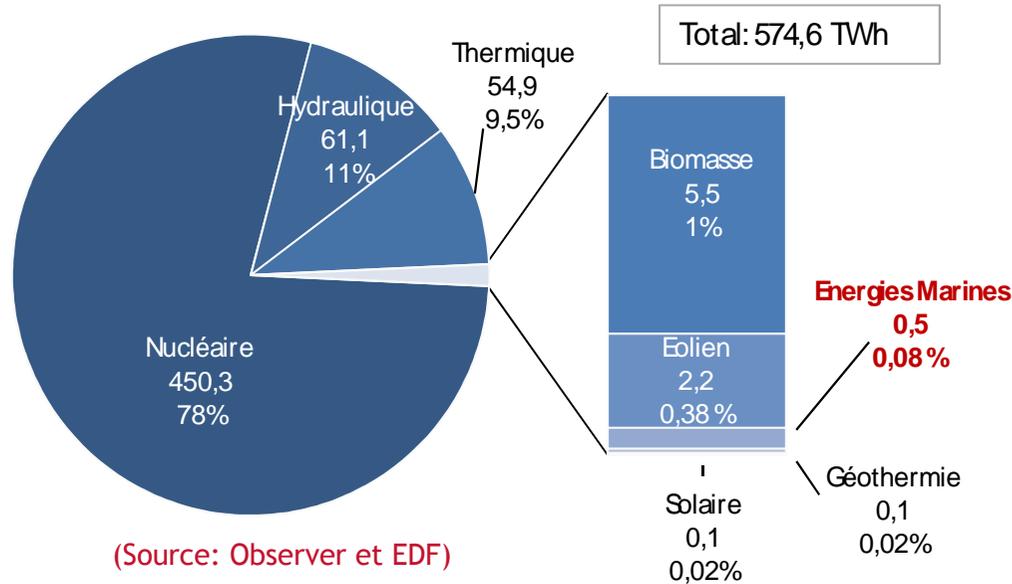
Production d'électricité renouvelable en Europe en 2006

- ▶ ***Production Europe de 490 TWh soit 15 % de la production totale d'électricité***

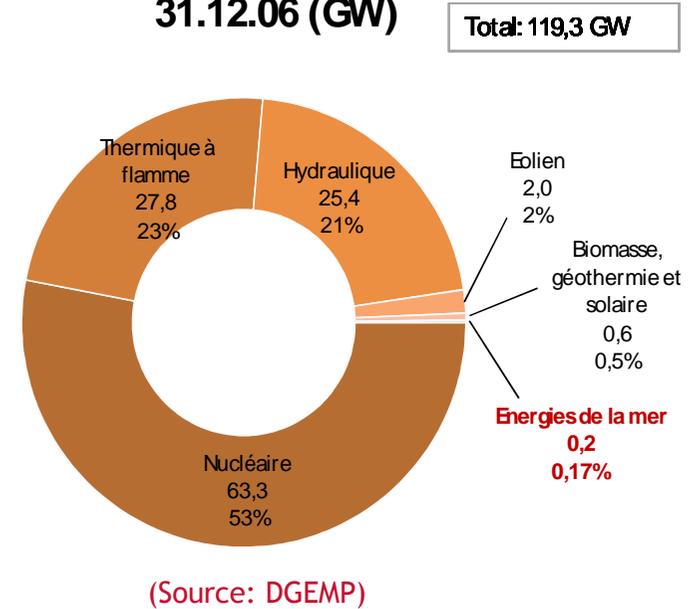


Mix énergétique – Périmètre France

Production d'électricité en France par source en 2006 (TWh)



Puissance du parc Français au 31.12.06 (GW)



Avec 240 MW installés pour une production moyenne annuelle de 550 GWh, les énergies marines, et plus spécifiquement marémotrices, sont sensiblement mieux placées dans le mix énergétique français.

2. Energie Renouvelable Marine

Généralités

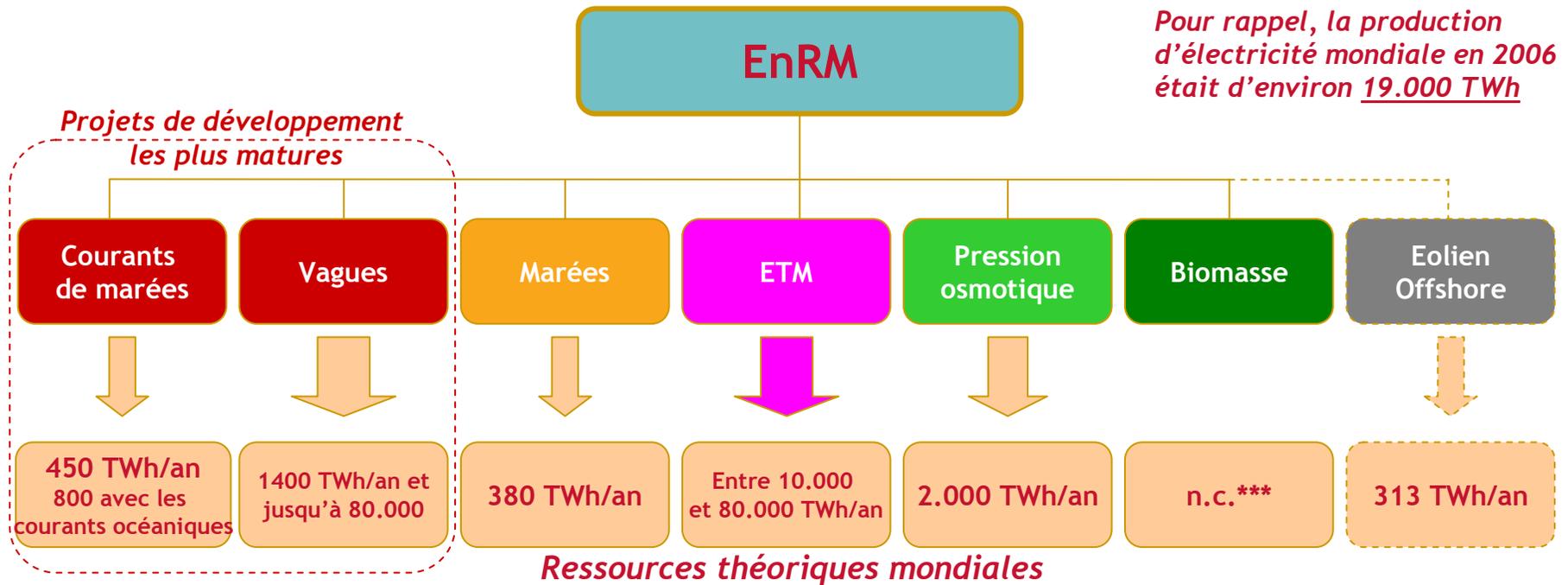


Les énergies renouvelables marines (EnRM) – Définition

La captation des énergies marines comprend l'exploitation de tous les flux et ressources fournis par les mers et les océans:

- ◆ ***Courants de marées : énergie hydrolienne***
 - ◆ ***Marées : énergie marémotrice (barrages côtiers avec retenue)***
 - ◆ ***Vagues et houle : énergie houlomotrice***
 - ◆ ***Biomasse marine : énergies des algues***
 - ◆ ***Energie Thermique des Mers (ETM) : différentiel de température***
 - ◆ ***Pression osmotique : gradient de salinité***
-

Segmentation des EnRM et ressources potentielles



- L'ETM est la filière dont la ressource théorique est la plus élevée, mais avec une accessibilité réduite.
- L'énergie houlomotrice a un potentiel plus important que l'énergie hydrolienne, ce qui peut expliquer en partie des efforts de développement plus avancés.

Energies Marine renouvelables: houle et courants marins

- ▶ ***DEUX SOURCES PRINCIPALES OBJET DE LA MAJORITE DES PROJETS: VAGUES ET COURANTS MARINS***
 - ◆ ***Houle: marché très vaste mais lié à la météo***
 - ◆ ***Courants marins: production prévisible (courants de marée pour un potentiel mondial de 100 GW) mais zones limitées (UK pour 5 à 6 GW, Norvège en Europe, Bretagne et Manche en France pour 3 GW)***
 - ▶ ***ENERGIE DES VAGUES: source d'énergie prépondérante- estimation du potentiel 350 GW en Europe, un gisement important en France, un potentiel mondial de 1,5 TW (source IEA)***
 - ▶ ***Un facteur moyen d'utilisation supérieur à 40 % de la capacité maximale annuelle (éolien 20 %)***
-

PRODUCTION D'ELECTRICITE RENOUVELABLE

- ▶ **LES COÛTS D'INVESTISSEMENT ACTUELS 2008 (source cabinet INDICTA)**
 - ◆ **Eolien terrestre: 1200- 1400 €/kW**
 - ◆ **Barrage: 1200- 1500 €/kW**
 - ◆ **Solaire PV: 7000 €/kW**
 - ◆ **Solaire CSP: 4000- 6000 €/kW (filière Tour coût élevé)**
 - ◆ **Marine courants: 2000- 4000 €/kW**
 - ◆ **Marine houle: 2500- 6000 €/kW**
 - ◆ **Eolien en mer: 2000- 3000 €/kW (source Cluster Maritime Français)**
 - ▶ **LES COÛTS D'EXPLOITATION DES ER MARINE**
 - ◆ **Coûts de maintenance élevés du fait de l'implantation en milieu marin et tenue des équipements non démontrée à ce jour**
 - ◆ **Coût de production éolien offshore entre 110 et 220 €/MWh (source REW April 2008)**
-

La production électrique: conditions administratives en France

▶ CONDITIONS DE RACHAT ELECTRICITE EN EURO par MWh:

- ◆ Cogénération: 61 à 91,5 € sur 12 ans**
 - ◆ Eolien terrestre: 82 € sur 10 ans puis entre 28 et 82 € sur 5 ans**
 - ◆ Eolien marin: 130 € sur 20 ans (juillet 2006)**
 - ◆ Biomasse et méthanisation: entre 75 et 150 € sur 15 ans**
 - ◆ Solaire (Photovoltaïque et CSP sans distinction): 300 € sur 20 ans**
 - ◆ Energie des mers (houle et courants) : 150 € sur 20 ans (mars 2007)**
-

Prix de rachat de l'électricité ENR marine- comparaison France - UK

France:

- ◆ ***Prix de rachat de l'énergie marine: 150 €/MWh***

Royaume-Uni:

- ◆ ***Prix de rachat de l'énergie marine: 275 €/MWh***

La différence de prix de rachat de l'électricité produite à partir d'énergies marines en France et au Royaume-Uni explique en partie le dynamisme des projet d'hydroliennes.

CRITERES DIFFERENCIANT DANS LES ER MARINE

▶ PREDICTIBILITE

- ◆ *Hydroliennes très bien placées (courant de marée)*
- ◆ *Eoliennes: très court terme*
- ◆ *Hydraulique: court et moyen terme (sauf pluviométrie)*

▶ ADAPTABILITE: capacité à adapter la production à la demande

- ◆ *Hydroliennes et turbines fil de l'eau mal placées*
- ◆ *Eoliennes: très mal placées*
- ◆ *Hydraulique lacs: bien placée*

▶ IMPACT ENVIRONNEMENT

- ◆ *Fort impact pour les barrages et éoliennes*
- ◆ *Impact considéré réduit pour les énergies marine- surtout pour les structures immergées (certains types d'hydrolienne)*

3. Energie houlomotrice

Le projet MGI – Machine de grande inertie (SEAREV)

L'ENERGIE HOULO- MOTRICE

- ▶ **UN POTENTIEL MONDIAL ESTIME ENTRE 1 A 1,5 TW- source International Energy Agency- et 350 GW en Europe**
 - ◆ **Concentration sur les côtes ouest entre 40 et 60° latitude nord et sud, au large**

 - ▶ **4 FAMILLES DE TECHNOLOGIE CONCURRENTES**
 - ◆ **1- Colonne d'eau oscillante compression d'air dans une chambre entraînant une turbine, sur rivage ou offshore**
 - ◆ **2- Systèmes à déferlement overtopping- énergie potentielle convertie dans une turbine basse chute (wave dragon)**
 - ◆ **3- Systèmes à corps flottant mouvement vertical de pilonnement ou horizontal de cavement (AWS en génératrice linéaire, Pelamis: moteurs hydrauliques et GE)**
 - ◆ **4- Systèmes divers: aquaboy- wave rotor**
-

L'ENERGIE HOULO- MOTRICE: les acteurs

▶ **SOCIETES D'EXPLOITATION**

- ◆ **British Columbia Hydro (Canada), Eskom (Afrique du Sud), EDP (Portugal)**
- ◆ **TOTAL, EDF (Energie Nouvelle)**

▶ **PRINCIPAUX CONCEPTEURS/FABRICANTS**

- ◆ **WaveGen (UK):** Colonne d'eau oscillante et centre d'essai
- ◆ **Pelamis WavePower (UK)**
- ◆ **Oceanlinx Limited (Australie ex energetech)** colonne d'eau oscillante
- ◆ **Ocean Power Technologies (USA)** technologie "powerbuoy"

Energie des vagues: le concept MGI- Machine de Grande Inertie (SEAREV)

- ▶ ***SYSTEME MGI: Flotteur fermé muni d'une masse mobile interne, en mouvement relatif par rapport au flotteur, lui-même en mouvement libre sur la houle et dont on récupère l'énergie***
 - ▶ ***AVANTAGES:***
 - ◆ ***Système clos, protégé, robuste, “low tech”, en surface***
 - ◆ ***Fermes de modules à 5/10 km des côtes, faible impact***
 - ◆ ***Pas de référence au sol, insensible à la marée, large gamme de profondeur de travail, bouée intermédiaire, pas d'amarrage tendu***
 - ◆ ***Décrochable et remorquable pour maintenance au port***
 - ◆ ***Optimisation du rendement énergétique par le contrôle***
-

L'ENERGIE HOULO- MOTRICE: le concept MGI

▶ **MGI**

- ◆ **Technologie jugée « la plus intéressante » selon EDF**
- ◆ **Intérêt élevé pour JE dans l'option génération électrique à entraînement direct: production de machines électriques différenciatrices fort couple**

▶ **EVALUATION DU MARCHÉ ACCESSIBLE A LA TECHNOLOGIE** source Principia et Douglas Westwood

- ◆ **En 2020, projection de production en Europe estimée entre 5 et 20 TWh/an, soit entre 3000 et 12 000 machines installées**
- ◆ **Pour 25 % du marché et une machine à 4 M€, activité entre 3 et 12 milliards d'Euro**

▶ **OBJECTIF DE REDUCTION DES COÛTS**

- ◆ **A l'horizon 2012: coût du MW installé mais non raccordé < 4 M€ et coût du MWh produit < 200 €**

4. Energie hydro- cinétique des courants marins (hydroliennes)

4.1 Le potentiel hydrolie

L'ENERGIE HYDRO- CINETIQUE- courants océaniques

- ▶ **HYDROLIENNE: assimilable à l'éolienne sous- marine**
 - **PUISSANCE FOURNIE DE L'ORDRE DE 1,2 kW/m² POUR UNE VITESSE MOYENNE DE COURANT DE 2 m/s ou plus, optimum technico- économique**
 - **ZONES COTIERES EN EAU PEU PROFONDE POUR COURANT RAPIDE**
 - **FACTEUR DE CHARGE DE L'ORDRE DE 4000 heures/an**
 - ▶ **UN INCONVENIENT, L'EXPOSITION DIRECTE AU MILIEU MARIN MAIS L'AVANTAGE DE LA PREVISIBILITE DE LA RESSOURCE (ondes de marée) ET INDEPENDANCE DE LA METEO**
 - ▶ **UN POTENTIEL ESTIME DE 1 A 3 GW EN FRANCE, environ 30 % du potentiel européen source Cluster Maritime Français (5 à 6 GW en UK- UK et France représentent 80 % du potentiel européen, potentiel hydrolien Europe entre 8,7 et 10,7 GW)**
 - ▶ **Estimation de 100 GW EXPLOITABLE DANS LE MONDE**
 - ▶ **En France, installation par EDF d'un démonstrateur constitué de 4 machines de 500 kW unitaires de OPENHYDRO, au large de Paimpol- (Bretagne et Normandie second gisement hydrolien en Europe)**
-

Le potentiel hydrolien en Europe

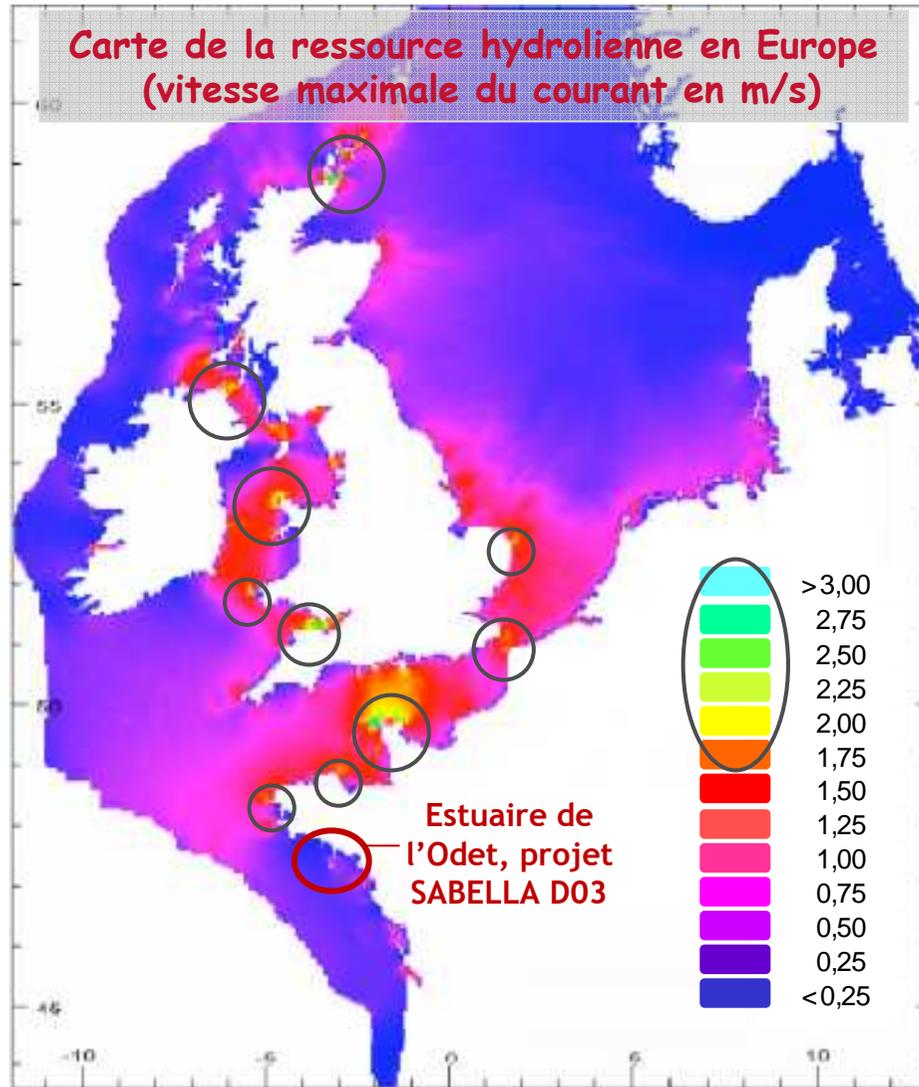
	Puissance hypothèse basse (GW)	% <i>hypothèse basse</i>	Puissance hypothèse haute (GW)	% <i>hypothèse haute</i>	Production hypothèse basse (TWh)	% <i>hypothèse basse</i>	Production hypothèse haute (TWh)	% <i>hypothèse haute</i>
Royaume-Uni	5	57%	6	56%	13	57%	23	55%
France	2,5	29%	3,5	33%	5	22%	14	33%
Italie	0,5	6%	0,5	5%	2	9%	2	5%
Norvège et Grèce	0,7	8%	0,7	7%	3	13%	3	7%
Total Europe	8,7	100%	10,7	100%	23	100%	42	100%

(Source: EDF, Université d'Oxford, Black & Veatch)

Le Royaume-Uni et la France totalisent entre 79% et 88% du potentiel européen de production d'électricité à partir des courants de marées.

- Pour un facteur de charge compris entre 2700 et 5000 heures par an

Gisements hydrolien - Royaume-Uni et France



- Les sites potentiels pour l'installation d'hydroliennes justifient des courants marins d'au moins 1,75 m/s, soit $P(\text{cinétique}) > 3 \text{ kW/m}^2$.

Exemple (pour un rendement $\eta=50\%$)

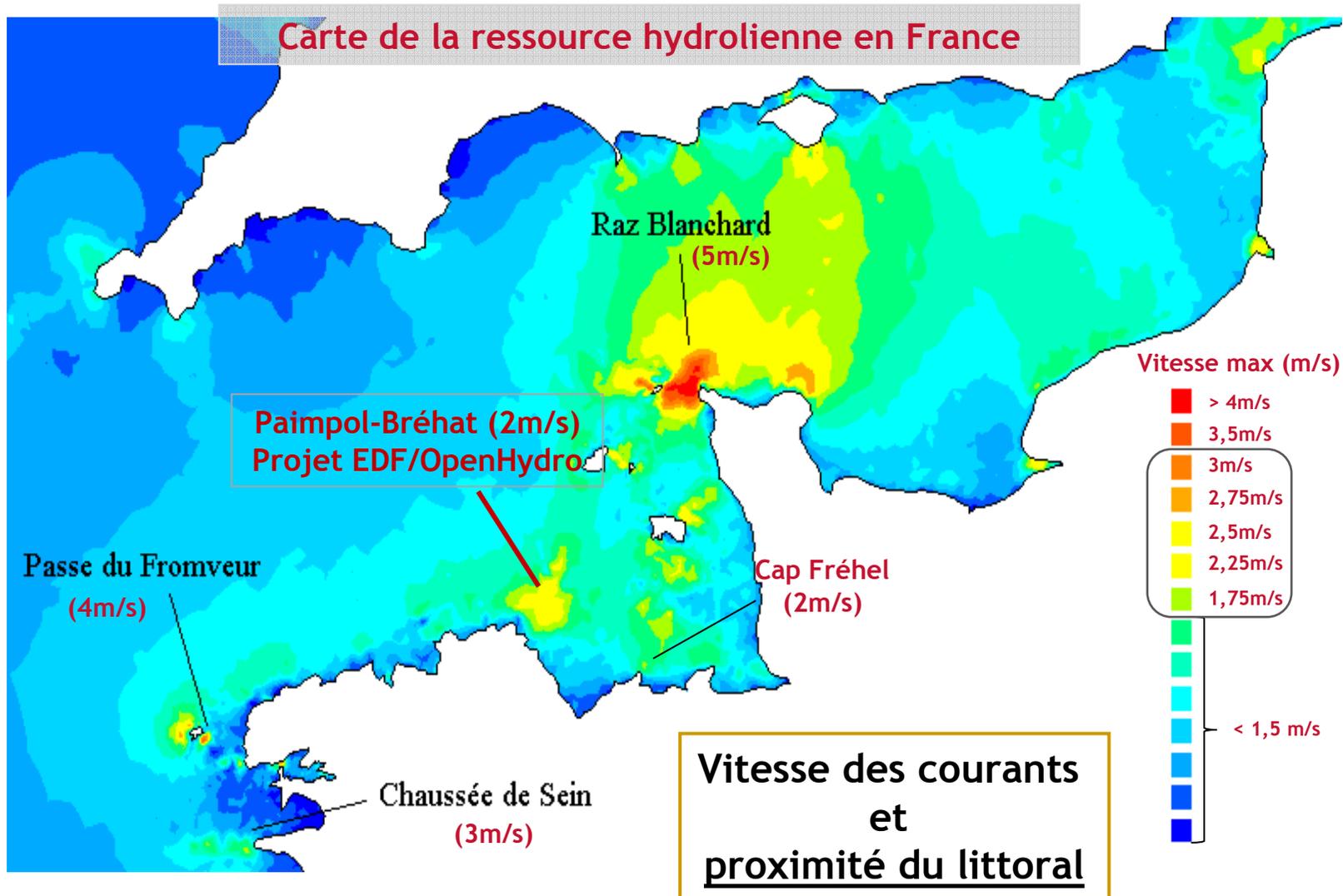
• Si $V = 1,75 \text{ m/s}$ et $r = 8 \text{ m}$ alors $P(\text{installée}) \approx 270 \text{ kW}$

• Si $V = 3 \text{ m/s}$ et $r = 8 \text{ m}$ alors $P(\text{installée}) \approx 1\,350 \text{ kW}$

Le doublement de la vitesse du courant a quintuplé la puissance installée.

- Selon ce critère le Royaume-Uni et la France constituent bien les pays les plus attractifs en Europe.

Gisements hydrolien - Focus France



4.2 Les technologies d'hydrolienne

Hydrolienne: principe

$$P(\text{cinétique}) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3$$

$$P(\text{installée}) = \eta \cdot P(\text{cinétique})$$

$P(\text{cinétique})$: puissance du courant

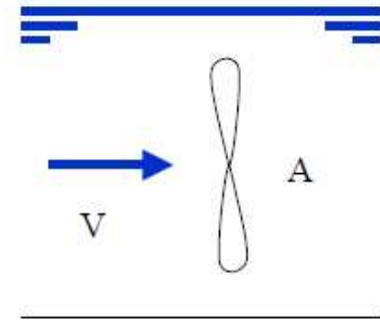
$P(\text{installée})$: puissance de l'installation

η : rendement de l'installation*

ρ : masse volumique du fluide**

A : surface décrite par les pales***

V : vitesse du courant



La puissance dépend du cube de la vitesse des courants, et du carré de la longueur des pales.



La vitesse du courant constitue ainsi l'élément clé dans l'évaluation des sites et des puissances espérées.

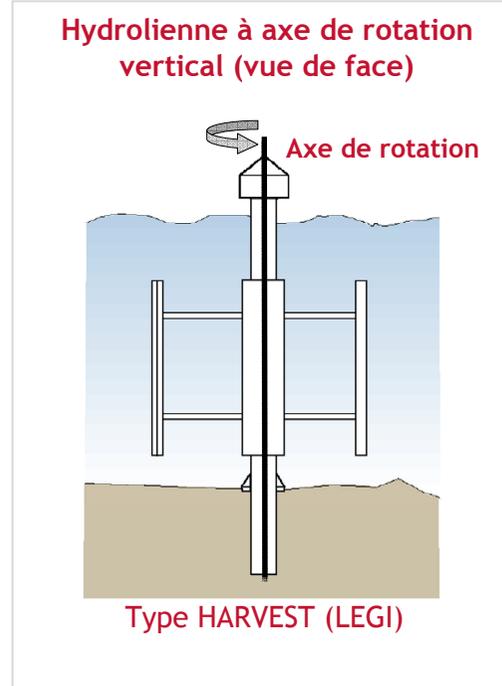
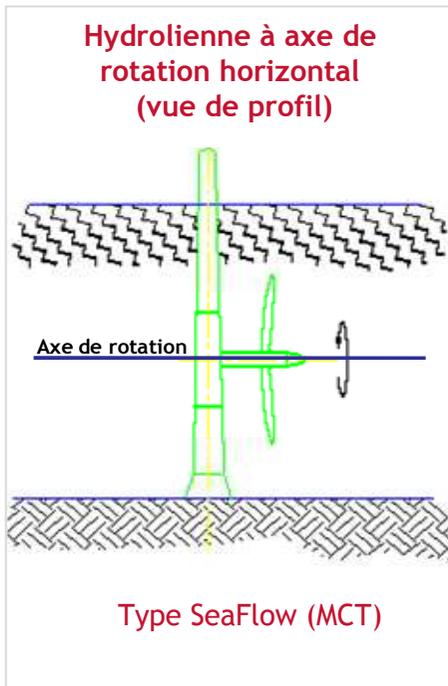
* $\eta \leq$ limite de Betz : $16/27 \approx 59\%$

** Pour rappel: $\rho(\text{eau de mer}) = 1\,025 \text{ kg/m}^3$ vs. 1.23 pour l'air

*** Calculée à partir de la longueur des pâles : r ($A = \pi \cdot r^2$)

Les hydroliennes – Architectures

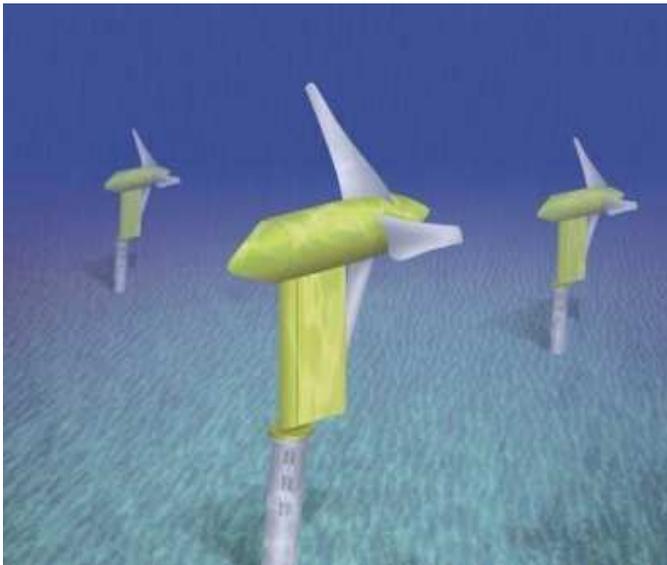
Trois grandes familles d'hydroliennes



Les hydroliennes – Structures

En vue de faciliter les opérations de maintenance, une partie de la structure des hydroliennes peut être apparente:

Structure totalement immergée



Type RITE (Verdant Power)

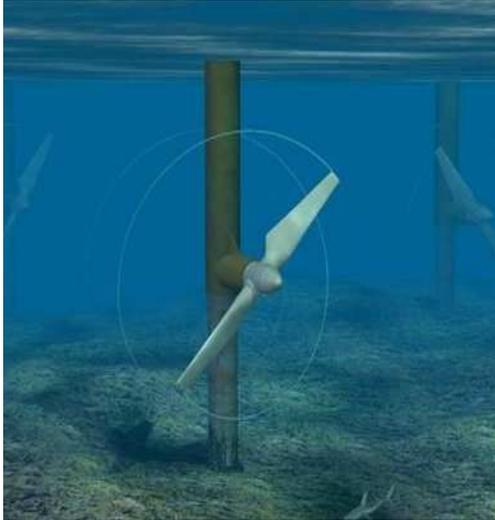
Une partie de la structure apparente en surface



Type SeaGen (MCT)

Focus sur la structure

Absence de carénage



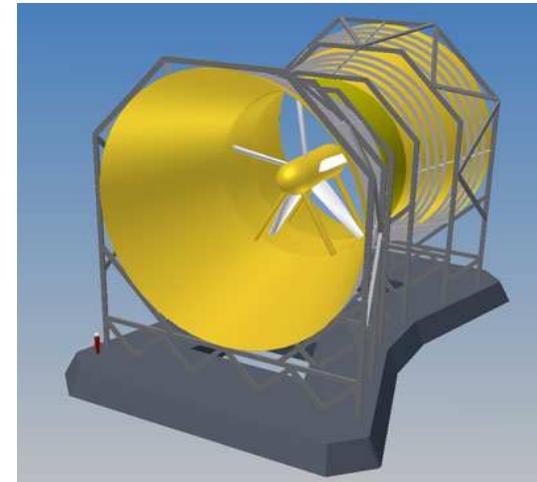
Type SeaFlow (MCT)

Carénage simple



**Type Sabella D03
(Hydrohélix)**

**Carénage avec
accélérateur de flux**



Type turbine Rotech