

*Rôles de l'hydro-électricité dans le futur mix  
énergétique*

## L'eau, énergie de demain

- le Stockage (STEP)
- les Energies Marines

Denis AELBRECHT

Expert  
EDF-CIH

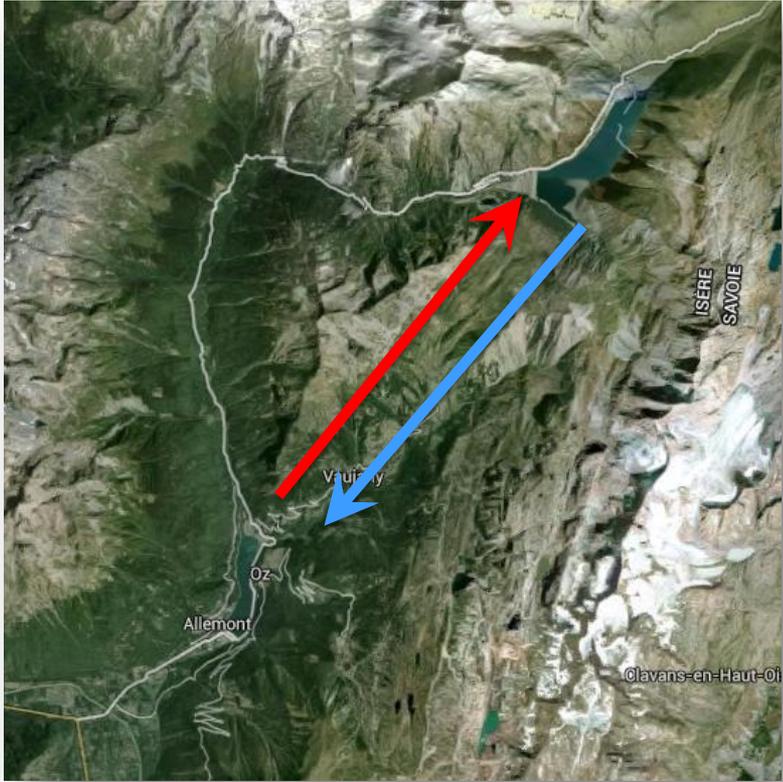
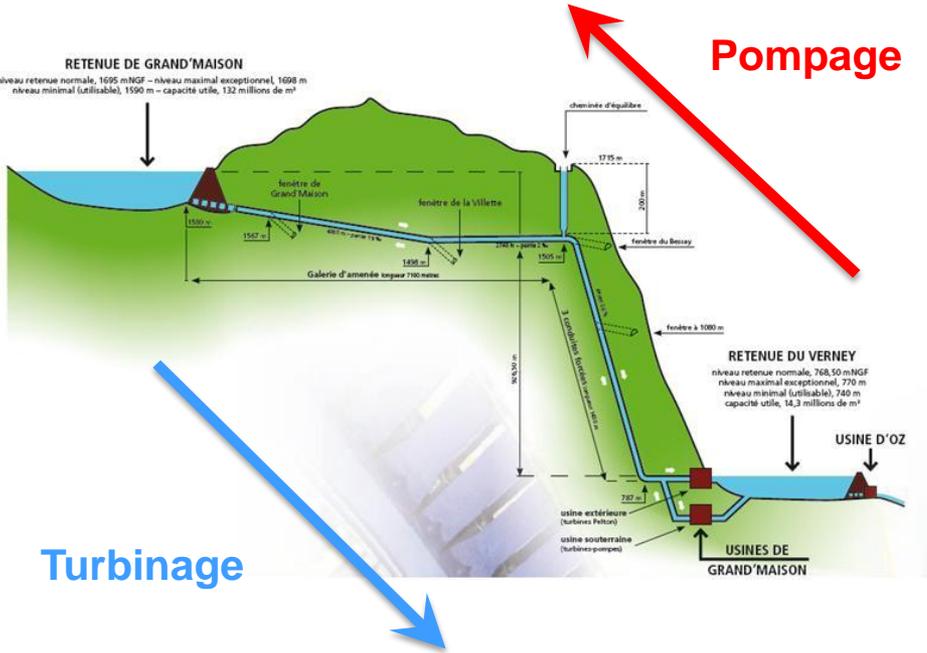
# Focus 1

**Stockage d'énergie :**

**Stations de Transferts d'Energie par Pompage  
(STEP)**

# Rappel : le fonctionnement hydraulique d'une STEP

## Exemple : Grand'Maison / Verney (EDF, Alpes)



# Les STEP : les fonctions énergétiques

---

## ▶ Participer à la régulation du système électrique

- Report d'énergie entre creux et pointe
- Services système : réglages primaire / secondaire Tension et Fréquence
- Marché d'ajustement infra-journalier : réserve tertiaire

## ▶ Constante de temps : $\tau = V_{\text{utile\_min}} / Q_{\text{turbiné}}$

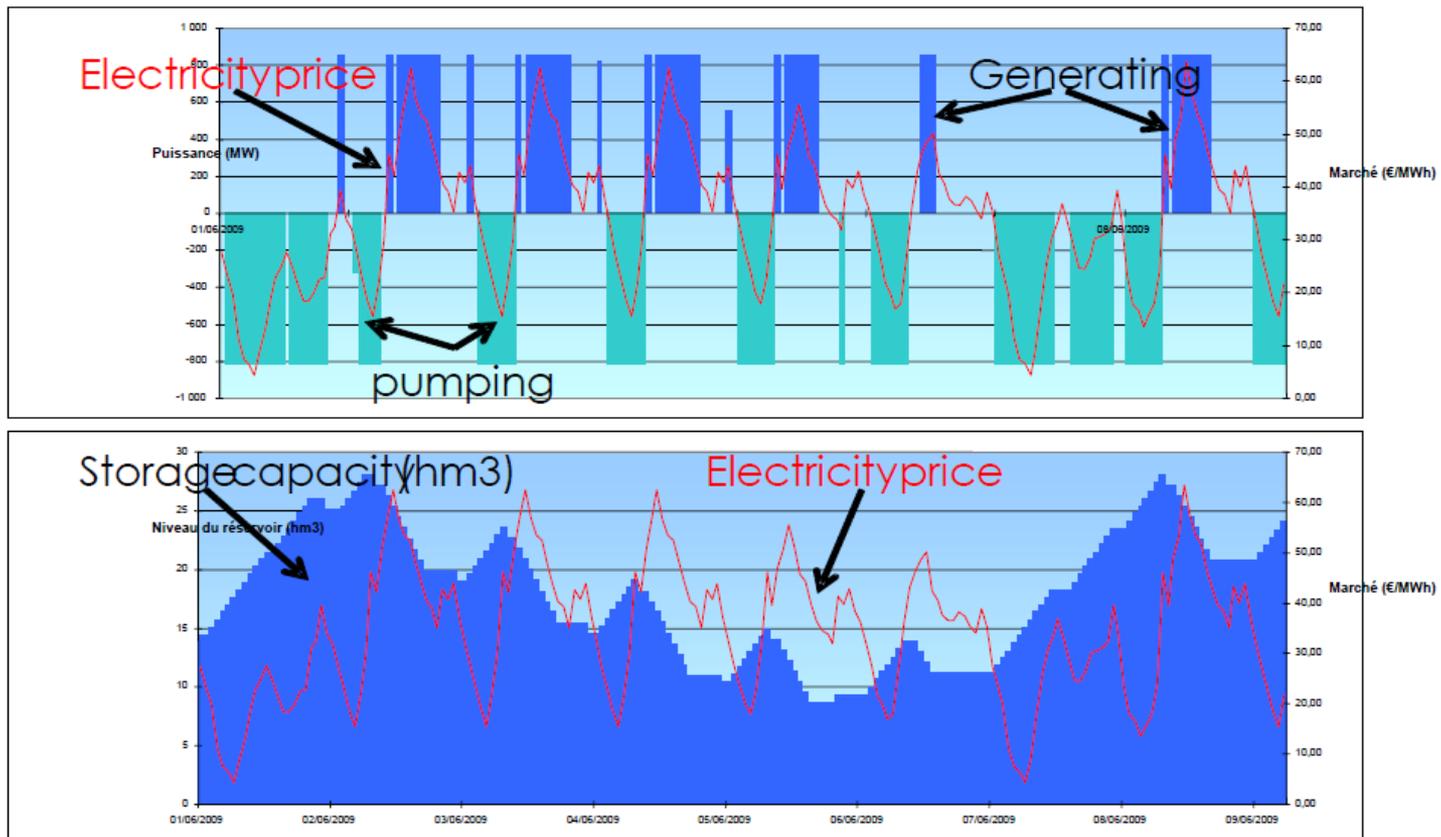
- « Journalier » : stockage pour quelques heures de marche
- « Hebdo » : stockage pour quelques dizaines d'heures de marche

## ▶ Opportunité économique de la STEP

- Si écart important entre prix heures creuses et pleines => SPREAD
- Si rendement STEP intéressant  
( $r = \text{Energie produite} / \text{Energie consommée}$ )

# Fonctionnement typique d'une STEP hebdo

## Ex. d'arbitrage pompage/turbinage typique horizon Hebdo



Source : URSAT X. (2011, colloque SHF « STEP »)

# Les STEP dans le monde et en France

► **Puissance STEP mondiale:**  
≈ 150 GW (5% P\_totale Hydro)

► **Puissance STEP EDF en France:**  
≈ 5 GW



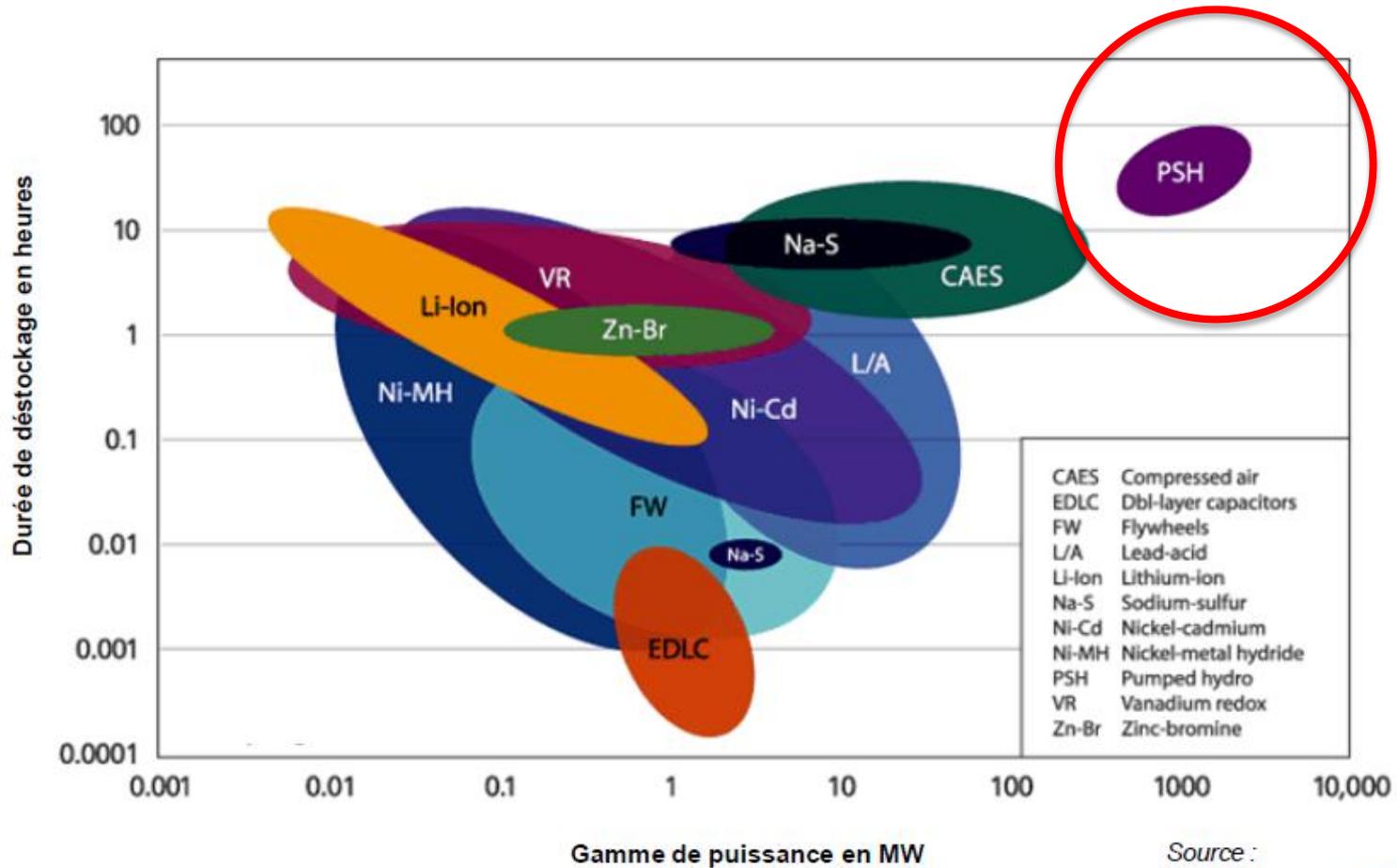
site	P_turbinage (MW)	P_pompage (MW)	Nombre groupes	Cste temps (heures)
Montézic	910	870	4	40
Revin	720	720	4	5
Grand'Maison	1790	1160	8	30
Super Bissorte	730	630	4	5
La Coche	330	310	2	3
Le Cheylas	460	480	2	6

# Prospective : le futur des STEP ?

---

- ▶ **Evolution du mix énergétique : de + en + d'intermittence liée aux énergies renouvelables EOLIEN + SOLAIRE**
- ▶ **Les solutions +/- en compétition pour gérer cette variabilité**
  - Accroître les capacités d'interconnexion des réseaux électriques
  - Accroître les capacités de **stockage d'énergie**
    - STEP
    - Batteries
    - Volants d'inertie
    - Stockage air comprimé (CAES)
  - Lisser la charge de consommation au niveau local => **Smart Grid**
  - **Ou plus probablement ... un mix de toutes les solutions ci-dessus**

# Les STEP : une solution de stockage performante



Source :  
Electricity Storage Association

# Le potentiel de STEP

---

## ▶ En France, les sites potentiels de STEP ne manquent pas

- Etude européenne JRC (2013) : plusieurs dizaines de GW
- Projet européen e-STORAGE : plus de 100 GW potentiels

## ▶ Les conditions de réussite :

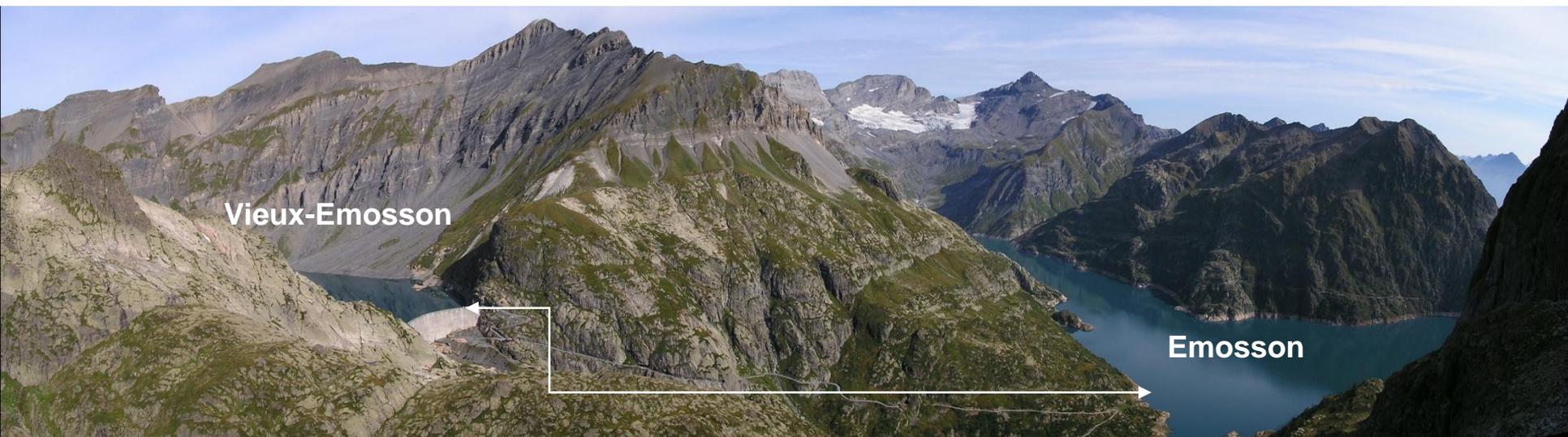
- **Critères techniques de sélection de sites** :  
ratio H / L ; proximité réseau ; présence de bassins existants ; ...
- **Technologie** : disponible et mature
- **Acceptabilité socio-environnementale** : STEP, une bonne solution si ...
  - Environnement & Sûreté
- **Economie des STEP** : une équation long terme à trouver
  - Dépenses : CAPEX (investissement), TURPE, Fiscalité
  - Recettes : SPREAD, Rémunération adaptée des services système

# Projets de STEP en Suisse, au Portugal, en Norvège, ...

---

▶ **Projet Hongrin-Léman 240 MW**

▶ **Projet Nant-de-Dranse 900 MW** (entre Chamonix et Martigny)



# Prospective STEP : pour aller plus loin ...

---

▶ Colloque S.H.F « STEP » (2011, Lyon)

■ [www.shf-hydro.org](http://www.shf-hydro.org)

▶ JRC report : Assessment of the European potential for pumped hydropower energy storage (2013)

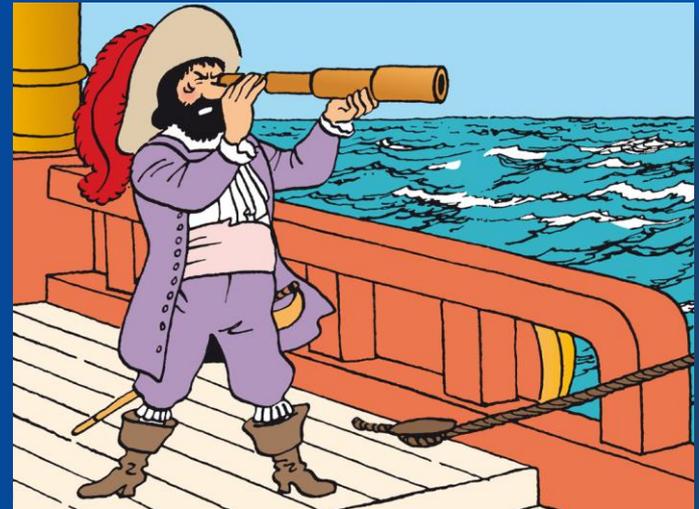
■ <https://ec.europa.eu/jrc/>

▶ Projet e-STORAGE (2015)

■ [www.estorage-project.eu](http://www.estorage-project.eu)

# Focus 2

## Energies Marines Renouvelables (EMR)



# EMR : un bouillonnement depuis 2 décennies

---

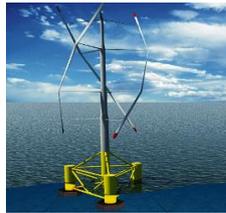
- ▶ **L'Océan** : nouvelle **frontière** des ressources pour la production d'énergie électrique et le développement des Energies Renouvelables (France, Europe, Monde)
  
- ▶ **La Mer et l'Océan** : un milieu ...
  - **Sensible** : richesse Environnementale / activités socio-économiques
  
  - **Hostile et difficile d'accès** :
    - Conception simple / robuste souvent dictée par les moyens logistiques
    - Maintenance : elle est complexe par nature => à simplifier
  
- ▶ **Le challenge économique** : **coûts et compétitivité des EMR**

# Les EMR à potentiel industriel avéré ou probable

## ▶ Eolien offshore : posé



## flottant



## ▶ Marémoteur



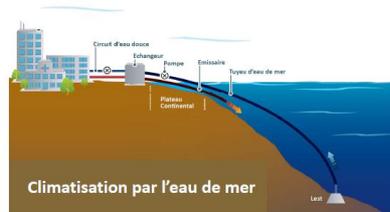
## ▶ Houlomoteur



## ▶ Hydrolien



## ▶ ETM / SWAC



## ▶ Marélien

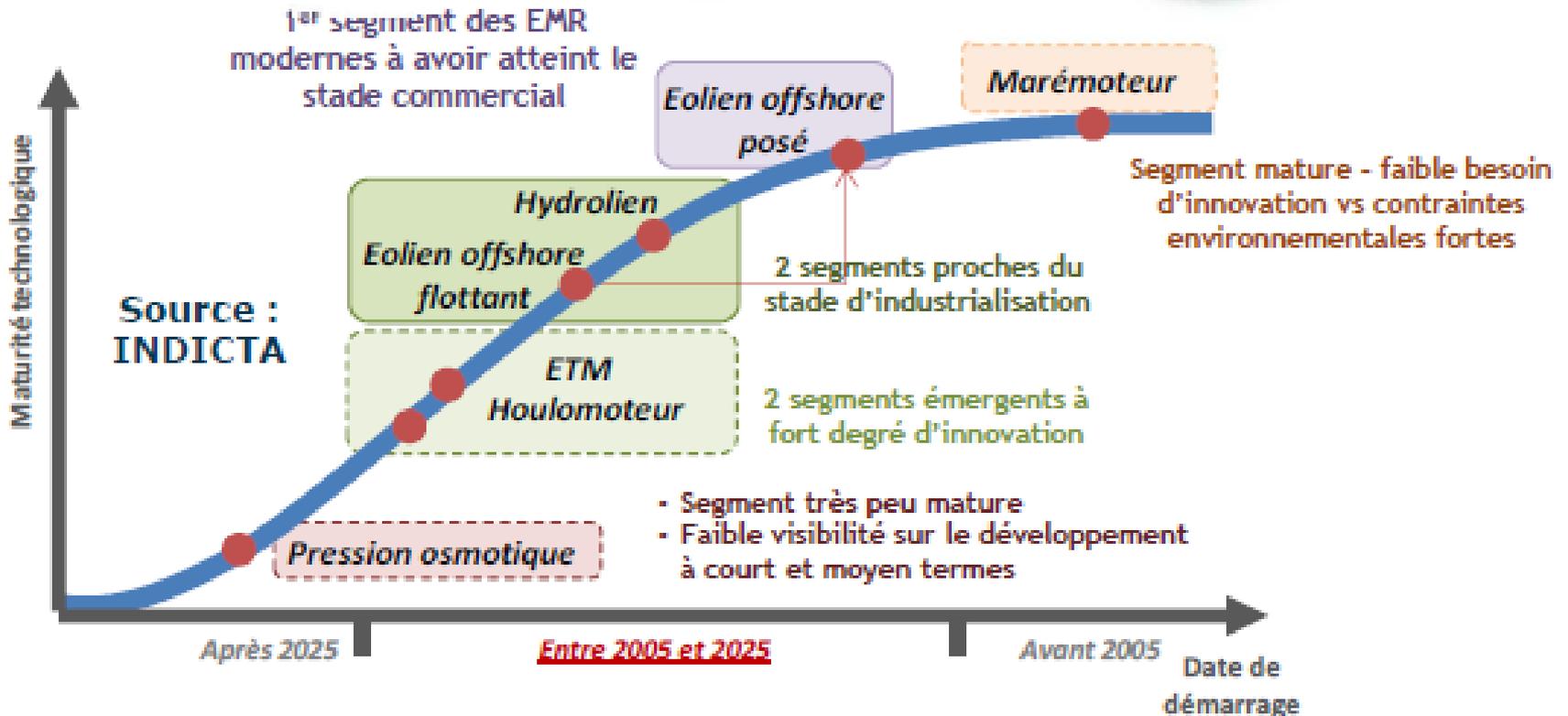


## ▶ STEP marines



## ▶ Pression osmotique

# EMR : une maturité très variable selon les filières



Source : INDICTA (2014)

# Zoom 1:

# STEP Marines

# STEP marines

---

- ▶ **1 réalisation de taille industrielle : Okinawa (1998, Japon)**
  - $P = 30 \text{ MW}$  ;  $H = 150\text{m}$  ;  $V = 0.56 \text{ hm}^3$
- ▶ **Peu de verrous technologiques ... hormis gérer eau de mer**
- ▶ **De nombreux sites potentiels sur sites littoraux falaise / montagneux**
- ▶ **Opportunité pour milieux insulaires : Eolien + STEP marines**



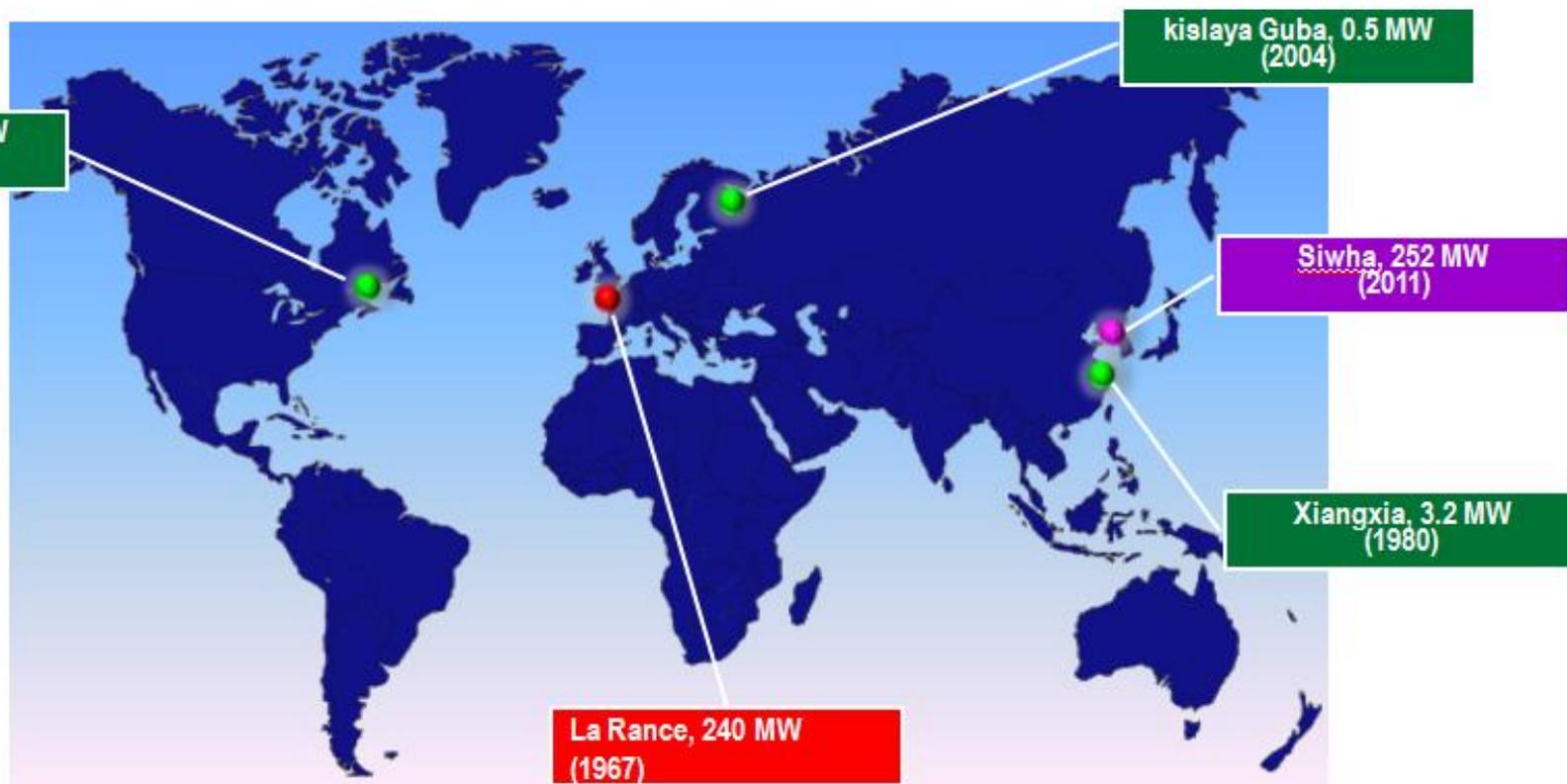
STEP marine  
Okinawa (Japon)

# Zoom 2:

# Le Marémoteur

# Les usines marémotrices en service en 2015

- ▶ La Rance (France, 1967) et Sihwa (Corée du Sud, 2011) sont les deux uniques sites de taille réellement industrielle



# Marémoteur : La Rance 1<sup>er</sup> projet industriel (240 MW)

## ► Un marnage très favorable

- Moyenne : 8.0 m
- Maximum : 13.5 m

## ► Une retenue importante

- 184 hm<sup>3</sup> volume
- 20 km<sup>2</sup> surface
- 20 km longueur

## ► Embouchure étroite

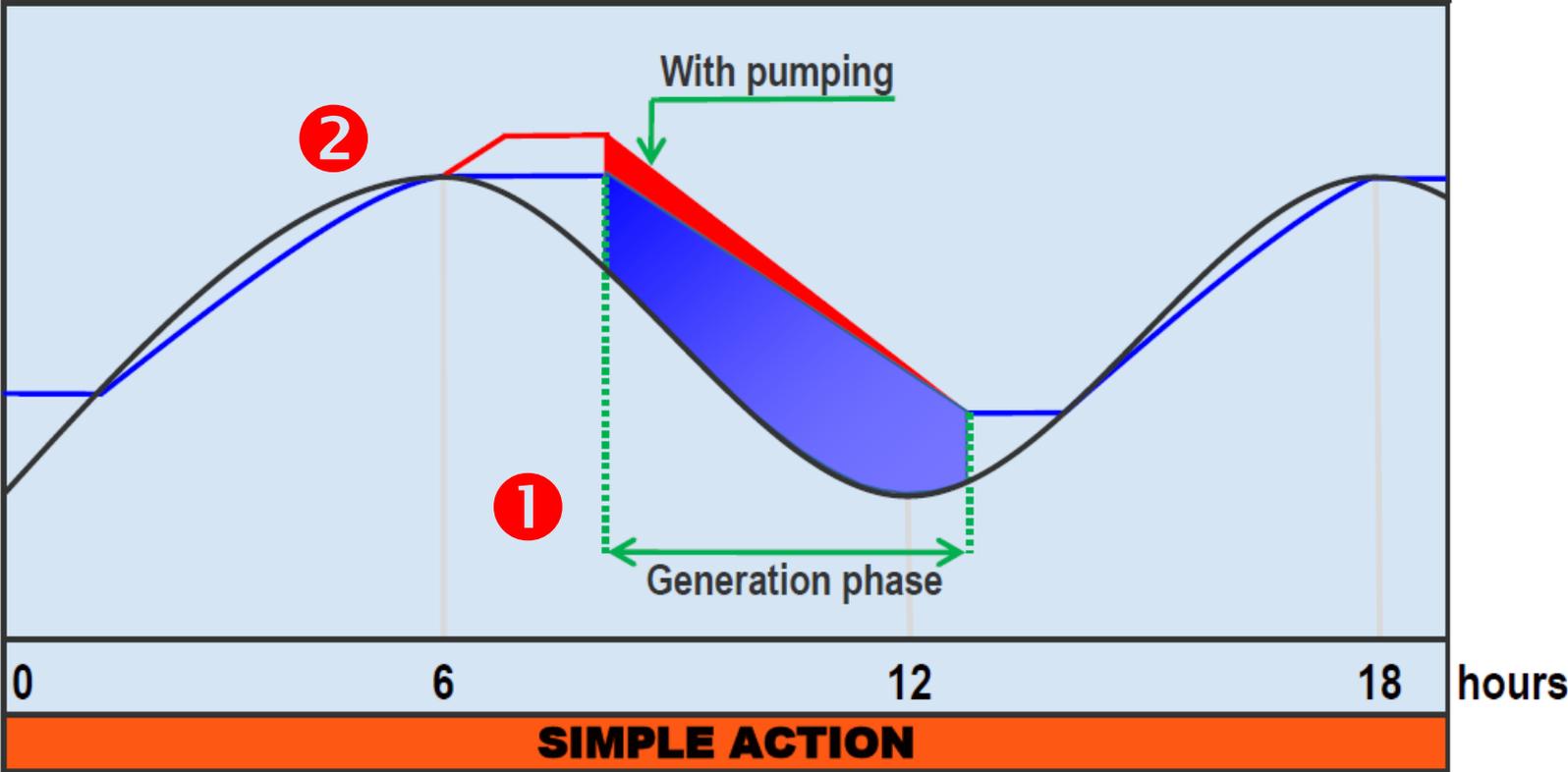
- 750 m à fermer

## ► Puissance installée: 240 MW (24 x 10 MW/unité)

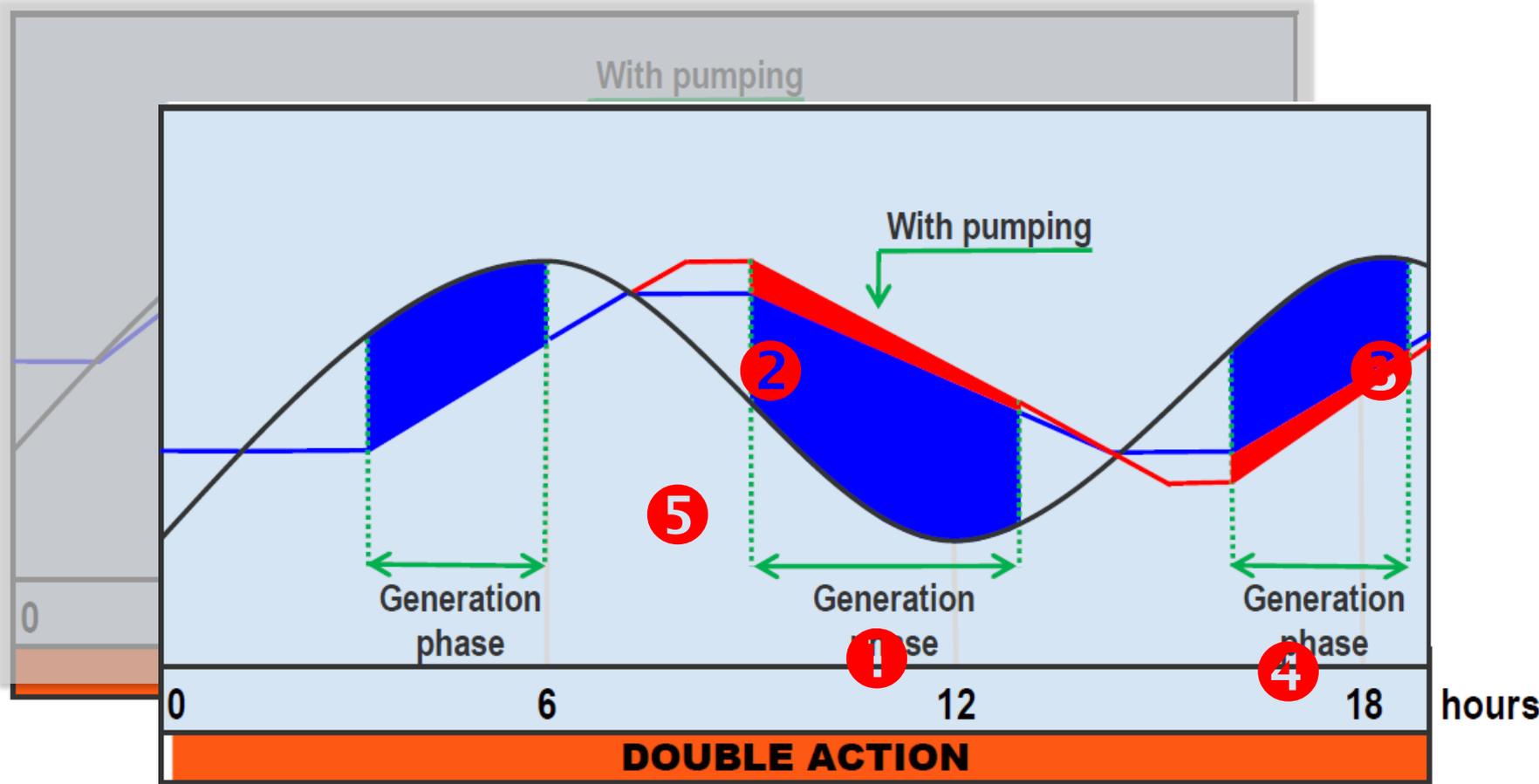
## ► Production : 540 GWh / an



# La Rance : Fonctionnement SIMPLE EFFET



# La Rance : Fonctionnement DOUBLE EFFET



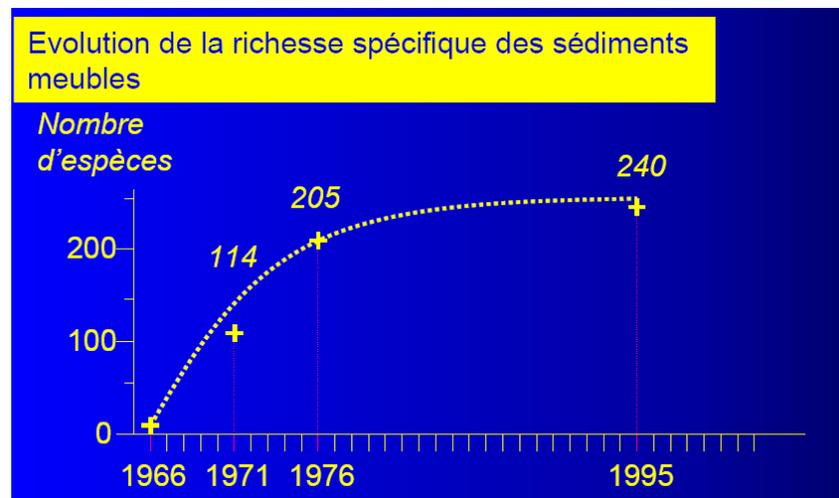
# La Rance et impact écologique

## ▶ Estuaire barré pendant 3 ans pendant la construction

- ▶ Impact pendant construction dominant, comparé à l'impact de l'exploitation

## ▶ Processus de restauration écologique après mise en service

- Nouvelle colonisation issue de la mer
- Retour des larves et juvéniles
- Perméabilité biologique du barrage => phoque !

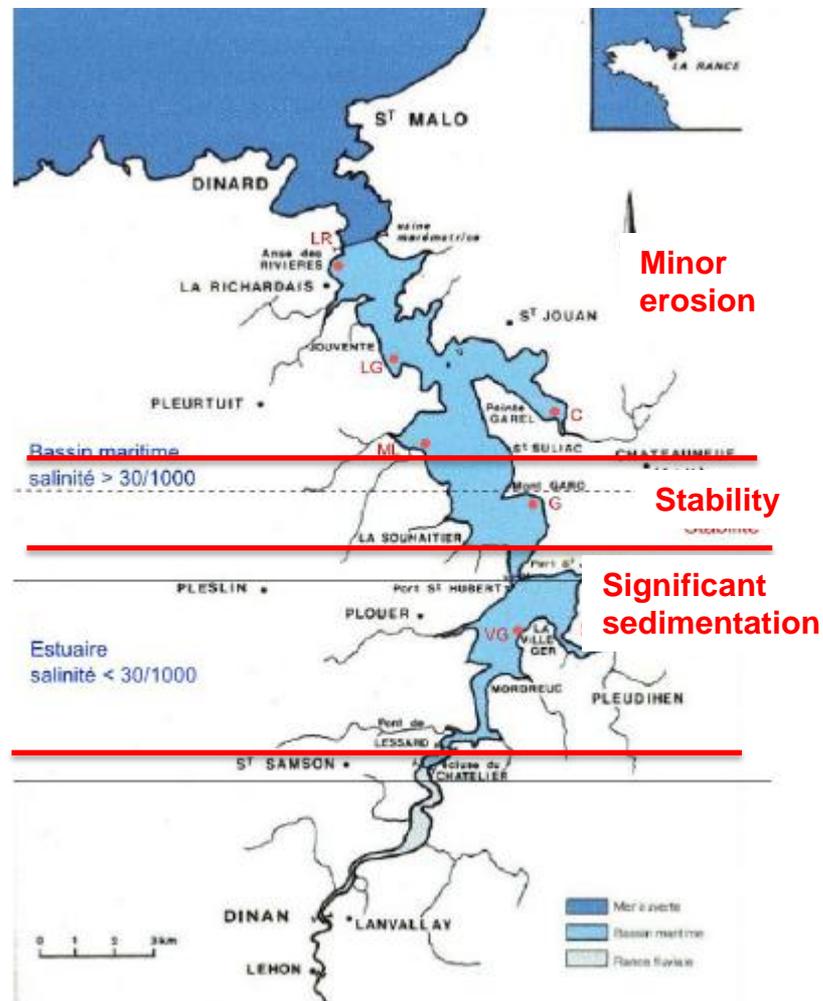


Benthic fauna - Source : Le Mao – Ifremer - 2006

**Après 10 ans : nouvel équilibre écologique, diversifié, adapté**

# La Rance et les sédiments

## ► Surveillance sédimentaire (1999-2011)

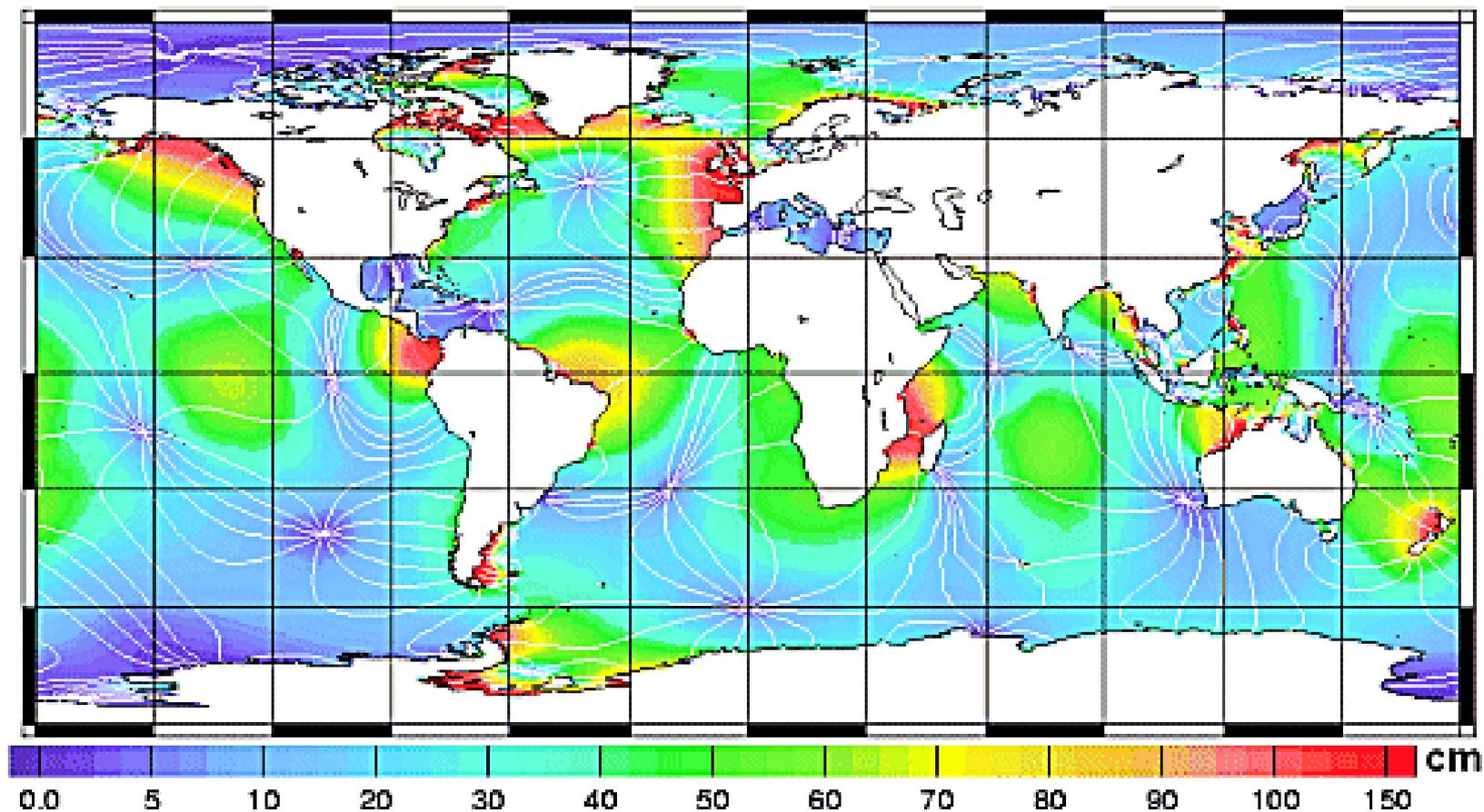


Source : CŒUR and INSA Rennes  
(A.Jigorel, JL Metayer, JY Brossault)

Carte d'après Bonnot-Coutois et al., 2002

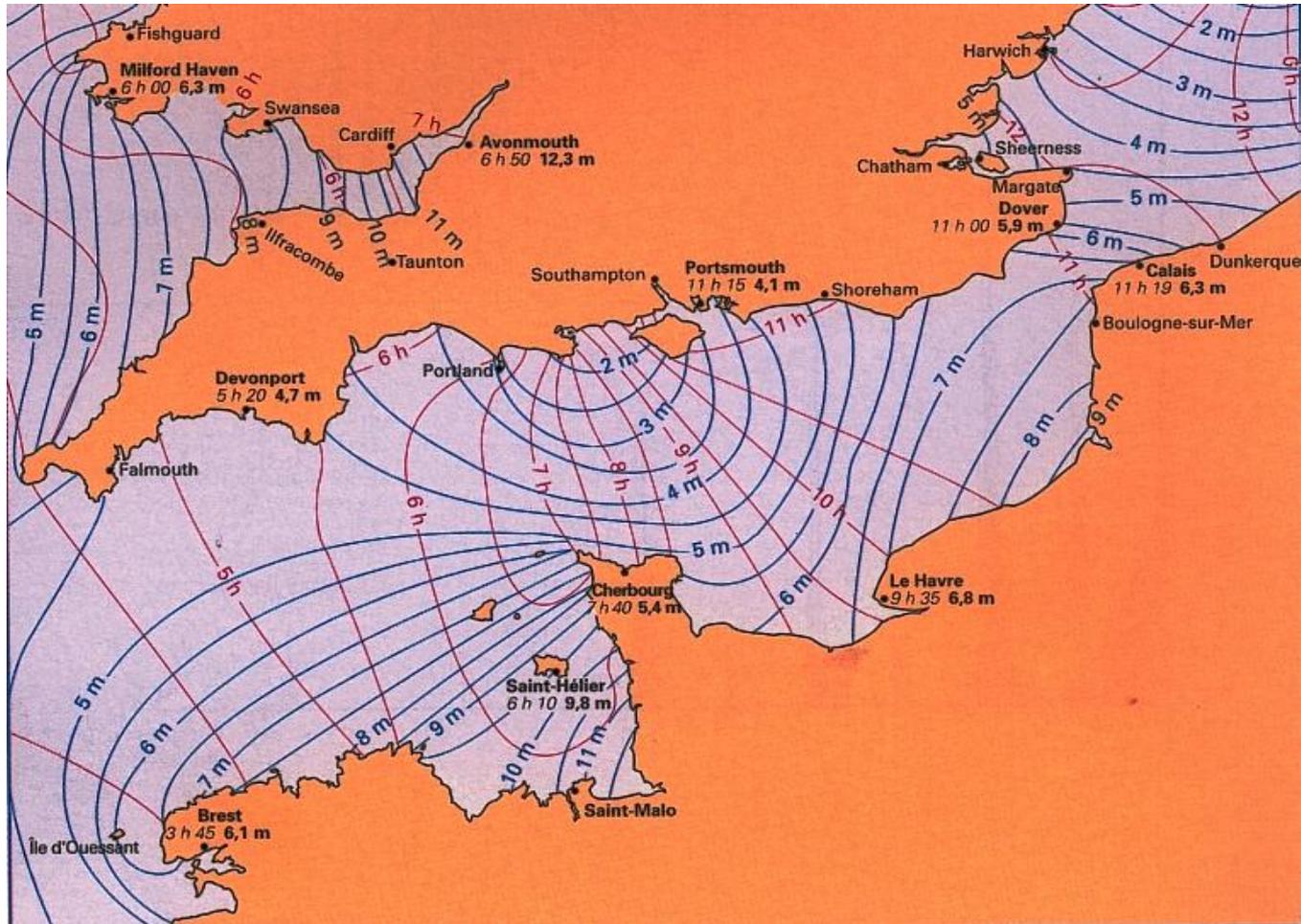
# Le potentiel mondial Marémoteur

## ► Onde de marée M2 (données LEGOS)

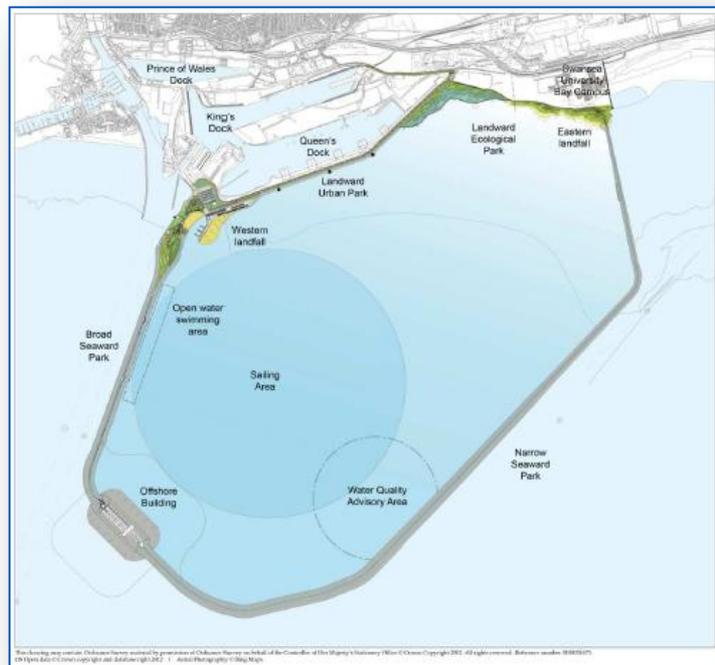
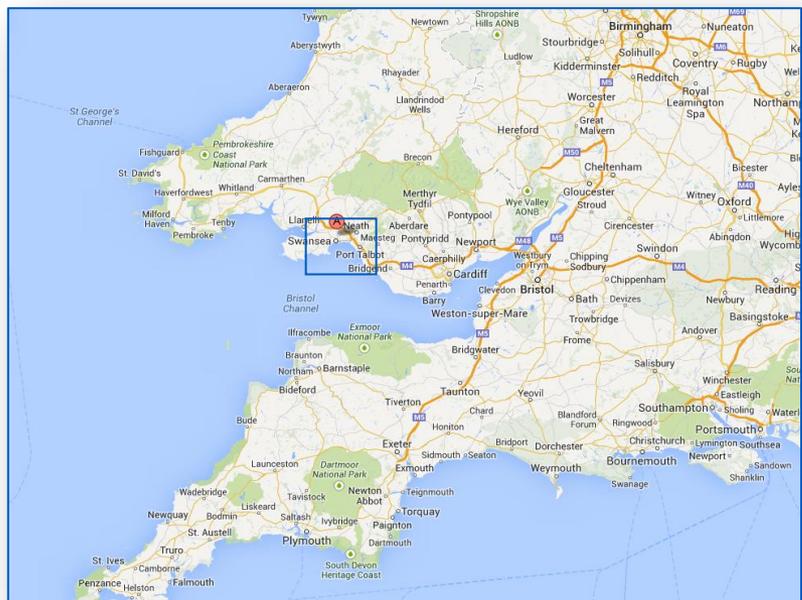


# Le potentiel Marémoteur en Manche et dans la Severn

## ► Amplitude et phase de la marée



# UK: Le projet Swansea Bay Tidal Lagoon – SBTL (TLP)



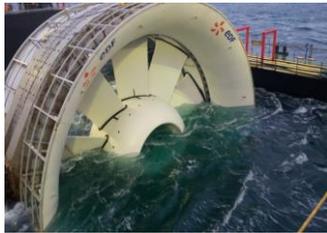
- ▶ **320 MW**
- ▶ **Coût ≈ 1000 millions £**
- ▶ **Mise en service : 2018/19 ?**
- ▶ **Durée de construction : 24 / 30 mois**
- ▶ **Longueur digue : 9.5 km**
- ▶ **Taille bassin : 11.5 km<sup>2</sup>**

# Zoom 3:

## Les Hydroliennes

# Hydroliennes

► L'hydrolien : de nombreuses technologies en développement, de nombreux efforts de R&D



© DCNS-OpenHydro



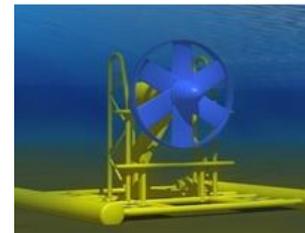
© TGL-Alstom



© MCT



© HydroQuest

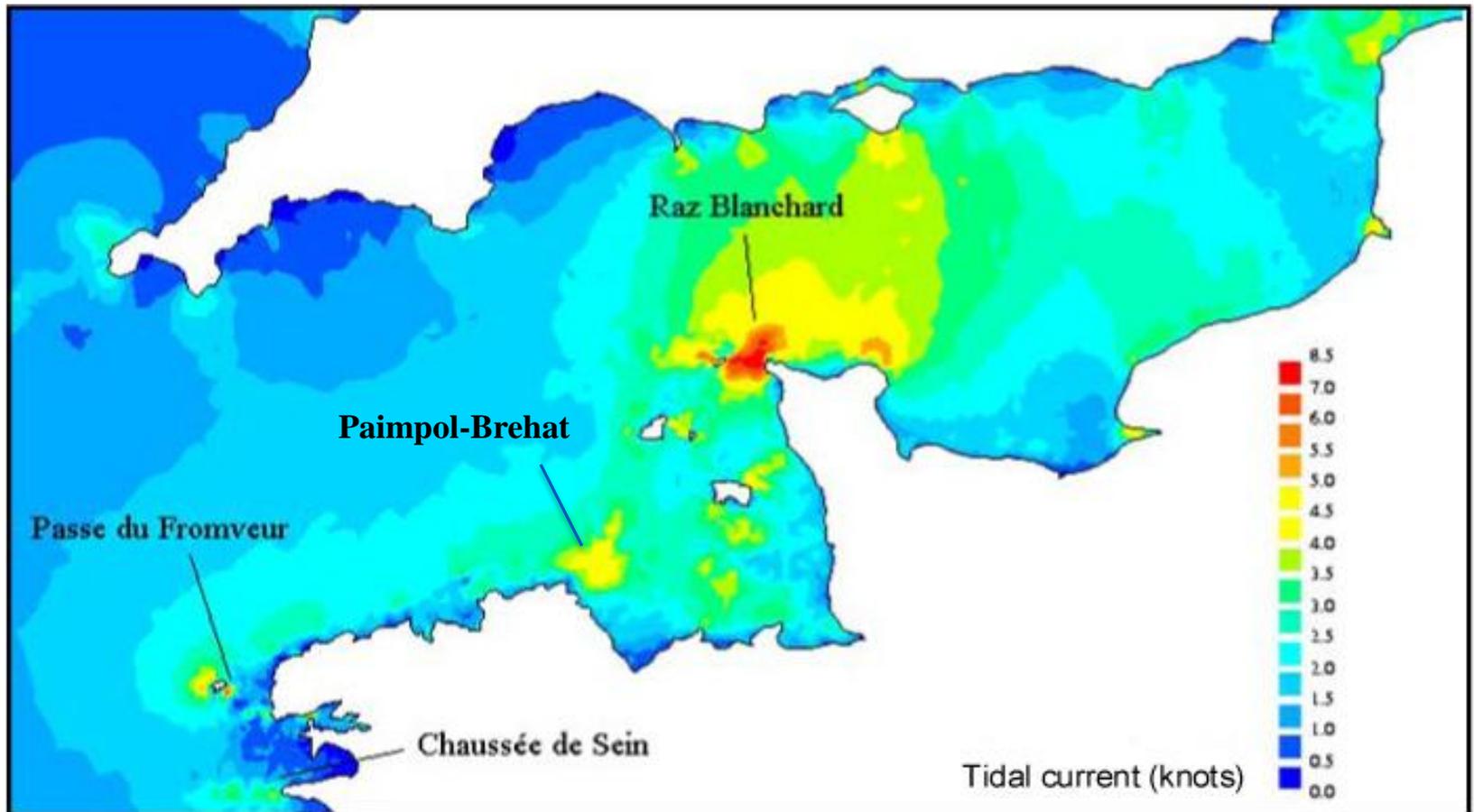


© Sabella

et plein d'autres ...

# Le potentiel Hydrolien en France métropolitaine

## ► Simulation courants de vives-eaux (EDF-R&D, Telemac-2D)



# Hydroliennes : démonstrateur EDF de Paimpol-Bréhat



## Objectifs

- Développer un site **démonstrateur** pour tester des technologies en conditions réelles
- Bâtir un référentiel de conception, méthodes et outils dans le domaine des EMR
- Explorer les leviers de réduction des coûts
- Etablir un référentiel de données terrain pour la **performance Environnementale**
- Développer un **cadre participatif** avec toutes les parties-prenantes



# « AMI » de l'ADEME pour fermes Hydroliennes

► 2 Projets ont été retenus par l'ADEME en Dec. 2014 :

**NORMANDIE-Hydro (EDF-EN)**

7 x 2 MW (Techno : OpenHydro)



**NEPTHYD (ENGIE)**

4 x 1,4 MW (Techno : Alstom-TGL)



► D'autres projets sont en cours d'évaluation par l'ADEME

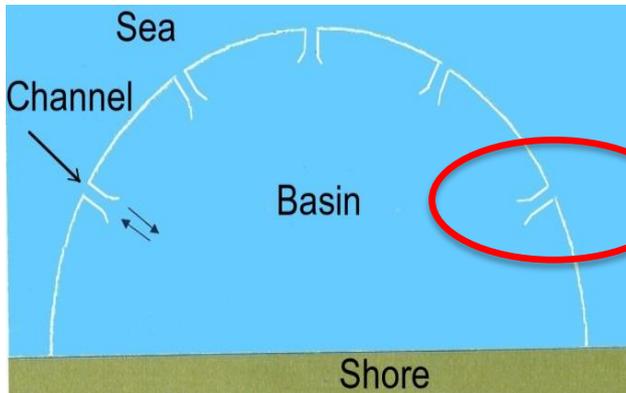
# Zoom 4:

# La Marélienne

# Le concept de « Marélienne » ou « Tidal Garden »

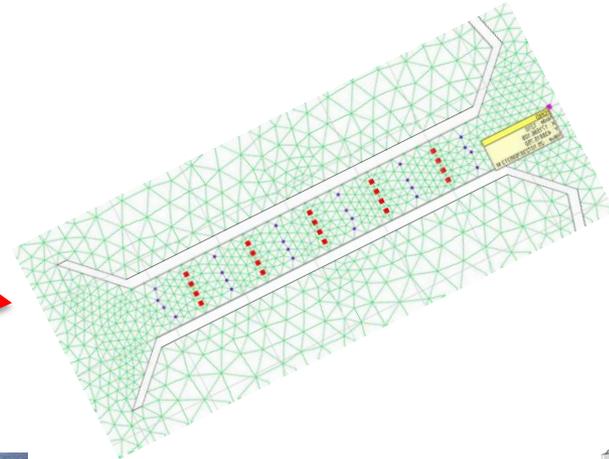
- ▶ D'après une idée originale de F. Lempérière (ICOLD'2015)
- ▶ Combiner les principes du marémoteur avec la technologie hydrolienne

Basin ou Lagon marémoteur  
avec chenaux ouverts



+

Rangées d'hydroliennes  
équipant les chenaux



© DCNS-OpenHydro

ou



© TGL-Alstom

ou



© HydroQuest

ou ... ?

# La « Marélienne » : des avantages potentiels ...

---

## ▶ ... en comparaison du Marémoteur « conventionnel »

- Applicable à des marnages modérés : environ 3 à 5 m
  - ⇒ extension importante du potentiel d'applications

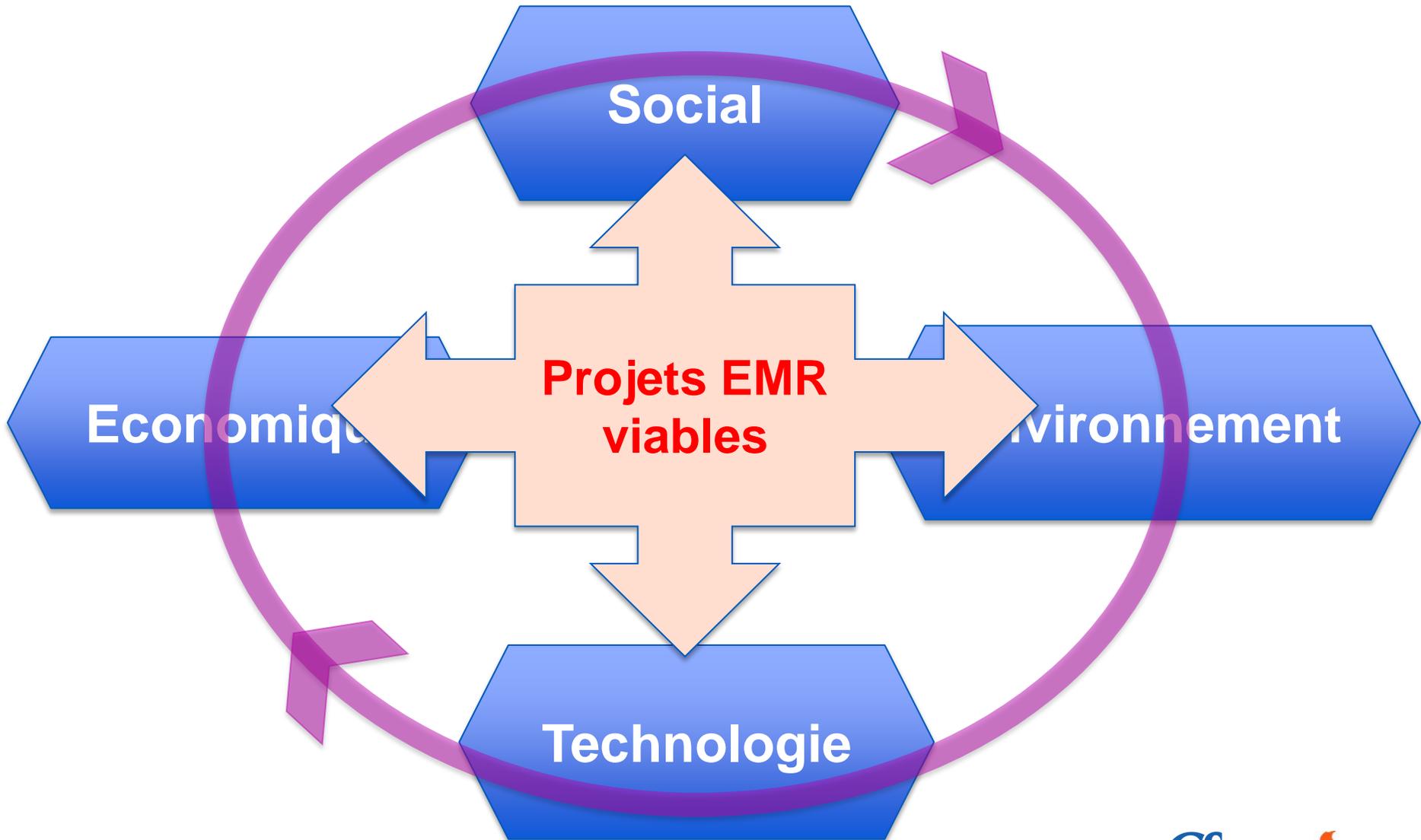
## ▶ ... en comparaison des fermes Hydroliennes en mer ouverte

- Permet de maintenir durablement l'intensité des vitesses proches des conditions énergétiques optimales
- Effet d'échelle sur la production de machines (typiquement 100 unités par projet)
  - ⇒ **espérance de réduction des coûts des machines**

**Conclusion « EMR » :**

**Les conditions de réussite de futurs  
projets d'Énergie Marines**

# Conditions de réussite des projets EMR



# L'acceptabilité sociale

► Concertation à l'échelle locale anticipée

► Des prix de l'énergie compétitifs

► Des Projets **MULTI-USAGES** : développer les bénéfices locaux

Exemples pour le Marémoteur ou le Marélien :

- Protection du littoral, protection contre l'inondation côtière
- Développer les transports
- Développer les activités d'aquaculture, de pêche
- Développer les activités culturelles, sportives
- ...

**Expérience en France du multi- usages  
des barrages et de l'Hydro:**

- Irrigation
- Eau potable
- Protection contre les crues
- Services environnementaux

## Passer de N.I.M.B.Y.

« N.I.M.B.Y. = **Not** In My BackYard »

## à Y.I.M.B.Y.

« Y.I.M.B.Y. = **Yes**, In My BackYard »

des projets pour les Territoires, avec les Territoires

# Prospective EMR : pour aller plus loin ...

---

- ▶ Colloque S.H.F. « EMR » (Brest), 9-10 Oct. 2013
  - [www.shf-hydro.org](http://www.shf-hydro.org)
- ▶ SeaTechWeek - Marine Energy Brest, (Brest), Oct. 2014
- ▶ Conférence EWTEC'2015 (Nantes), Sept. 2015
  - [www.ewtec.org/ewtec2015](http://www.ewtec.org/ewtec2015)
- ▶ IPCC / SRREN : Special Report on Ren. Energy (2012)
  - Chapter 6 : Ocean Energy
  - <http://srren.ipcc-wg3.de/report>
- ▶ Institut « France-Energies-Marines »
  - [www.france-energies-marines.org](http://www.france-energies-marines.org)



Merci