



POTENTIEL DES ENERGIES MARINES RENOUVELABLES POUR LA TRANSITION ENERGETIQUE



Sommaire

1. Qui vous parle?
2. Contexte climatique et énergétique
3. Energies marines renouvelables

Eolien en mer posé

Eolien en mer flottant

Energie thermique des mers

Energie des vagues

Energie des courants/marée

(Energie des gradients de salinité)

Qui vous parle?

Aurélien BABARIT

46 ans, marié, 2 enfants

Aurelien.babarit@ec-nantes.fr

FORMATION

2002: Ingénieur Centrale Nantes

2005: Doctorat en Dynamique des Fluides, Centrale Nantes & Université de Nantes

2016: Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Nantes

EXPERIENCE

2006-2010: Ingénieur de projet, Centrale Nantes

2010-2011: Chercheur invité, NTNU, Norvège

2012-2020: Resp. de l'Equipe Energies Marines et Océan, LHEEA, Centrale Nantes – CNRS

2016-2020: Directeur du GDR « Energies Marines Renouvelables » du CNRS

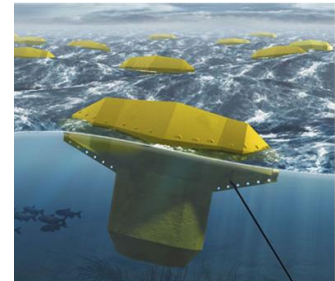
2016: Chercheur invité, NREL, USA

2020-2023: Co-fondateur et Directeur technique FARWIND ENERGY

2023-auj.: Ingénieur de recherche, LHEEA, Centrale Nantes - CNRS

THEMES DE RECHERCHE

- Décarbonation: énergies marines renouvelables & propulsion vélique, modélisation mathématiques et numérique, étude des performances
- Génie océanique, interactions vagues-structures, tenue à la mer, modélisation numérique et expérimentale



Centrale Nantes

Centrale Nantes, fondée en 1919, forme des ingénieurs polyvalents de très haut niveau scientifique et technique, dotés d'une solide culture managériale, capables de replacer les matières scientifiques dans un contexte global intégrant les questions environnementales et sociétales.

2 150 étudiants

- 1 550 élèves ingénieurs
- 350 étudiants en Master
- 240 doctorants

250 professeurs et personnels de recherche

150 personnes dans l'équipe administrative et technique

6 laboratoires dotés de nombreux moyens d'essais



Centrale Nantes est dotée de plateformes de recherche exceptionnelles qui permettent de créer un lien fort avec les industriels :

- bassins océaniques
- plateforme génie civil
- banc d'essais moteurs
- plateforme robotique
- site d'expérimentation en mer SEM-REV
- fabrication additive et usinage
- Centre de ressources en essais dynamiques (CRED)
- mésocentre de calcul

Quelques domaines scientifiques:

- Aéronautique
- Calcul intensif en sciences de l'ingénieur
- Matériaux et procédés
- Robotique
- Systèmes Embarqués et Réseaux Electriques
- Génie Civil
- Sciences de l'Ingénieur pour l'Habitat et L'Environnement Urbain
- Génie industriel
- Océan
- Production et gestion d'Energie
- Propulsion et transports
- Sciences du numérique pour les sciences de la vie et de la santé
- Informatique
- Réalité Virtuelle...

www.ec-nantes.fr



Laboratoire de recherche en Hydrodynamique, Énergétique et Environnement Atmosphérique

Le LHEEA est une unité mixte de recherche Centrale Nantes/CNRS (UMR6598). Ses missions concernent autant l'avancée de connaissances théoriques que la résolution de problématiques concrètes



Thématiques scientifiques :

- hydrodynamique à surface libre,
- interactions fluide-structure,
- dynamique de l'atmosphère,
- modélisation et performance des systèmes énergies marines renouvelables
- performance des systèmes propulsifs terrestres et marins.

Activités liées à des enjeux sociétaux et technologiques forts :

- le développement des énergies marines renouvelables (EMR) (éolien offshore, éolien flottant, hydrolien, énergie des vagues...),
- la sécurité des biens et des personnes dans les activités maritimes,
- la réduction des émissions polluantes associées aux transports terrestres et maritimes,
- la qualité de l'atmosphère urbaine...



Le LHEEA compte aujourd'hui sur une équipe de 127 personnes, dont 56 permanents (chercheurs, techniciens et administratifs, Centrale Nantes ou C.N.R.S.), 16 chercheurs sous contrat et 26 doctorants.

Sommaire

1. Qui vous parle?
2. Contexte climatique et énergétique
3. Energies marines renouvelables

Eolien en mer posé

Eolien en mer flottant

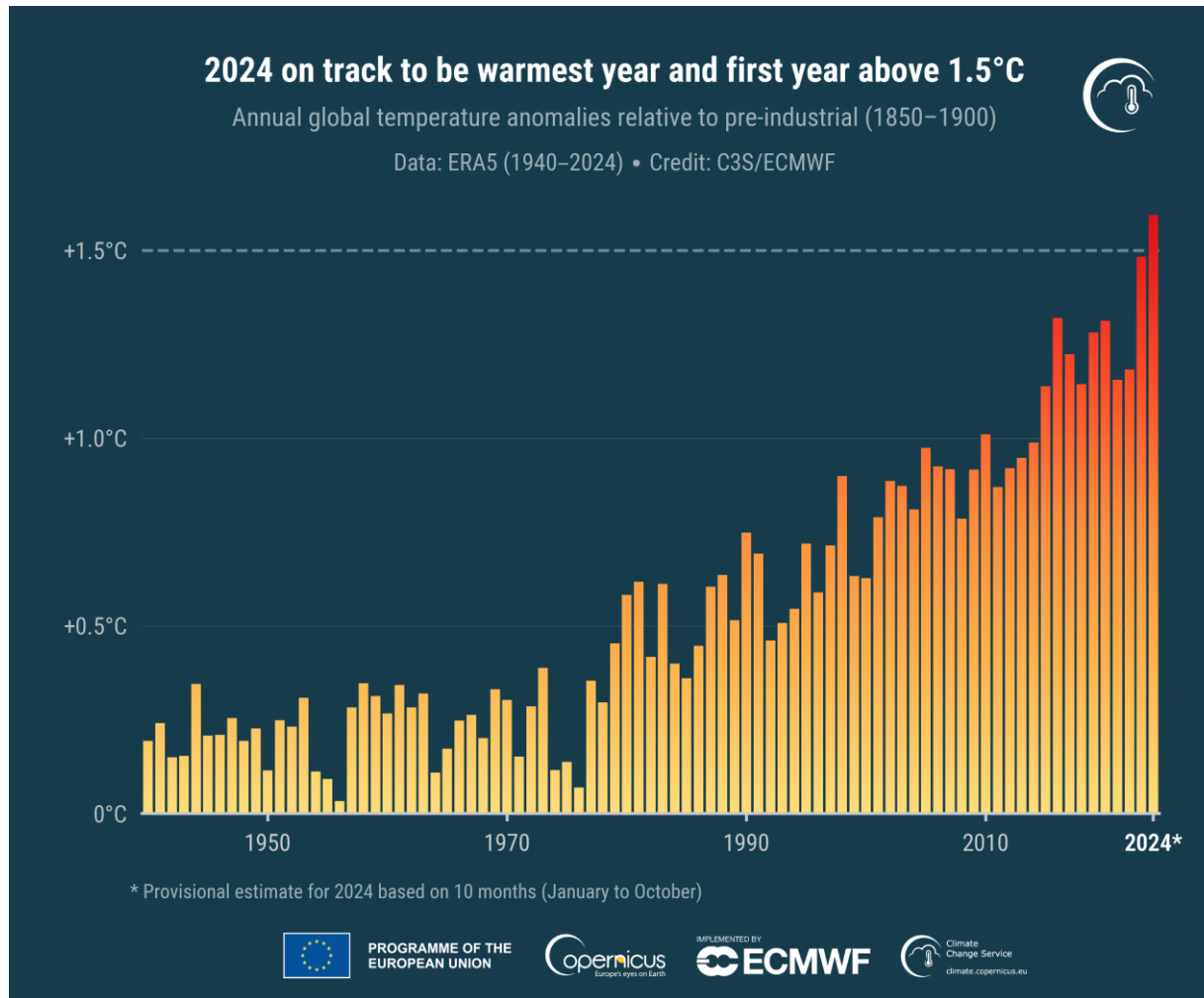
Energie thermique des mers

Energie des vagues

Energie des courants/marée

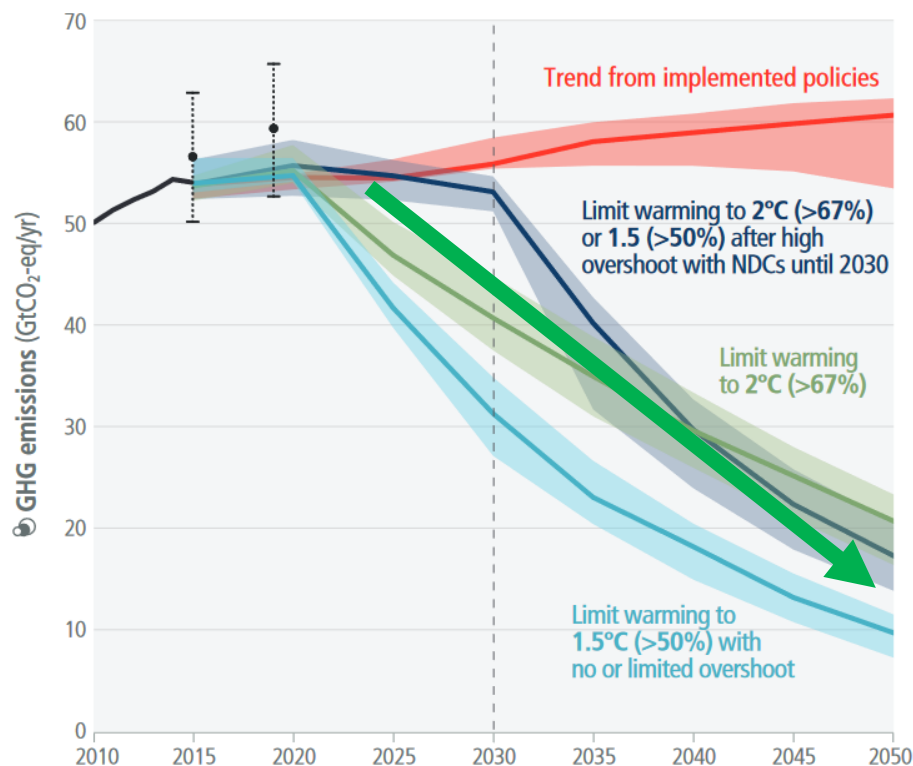
(Energie des gradients de salinité)

2024 : +1.5°C de changement climatique



Demain : **+2°C** entre 2035 et 2045 ...
+3.2°C [2.2 – 3.5] en 2100 ...

... A moins de réduire rapidement et
fortement les émissions de GES



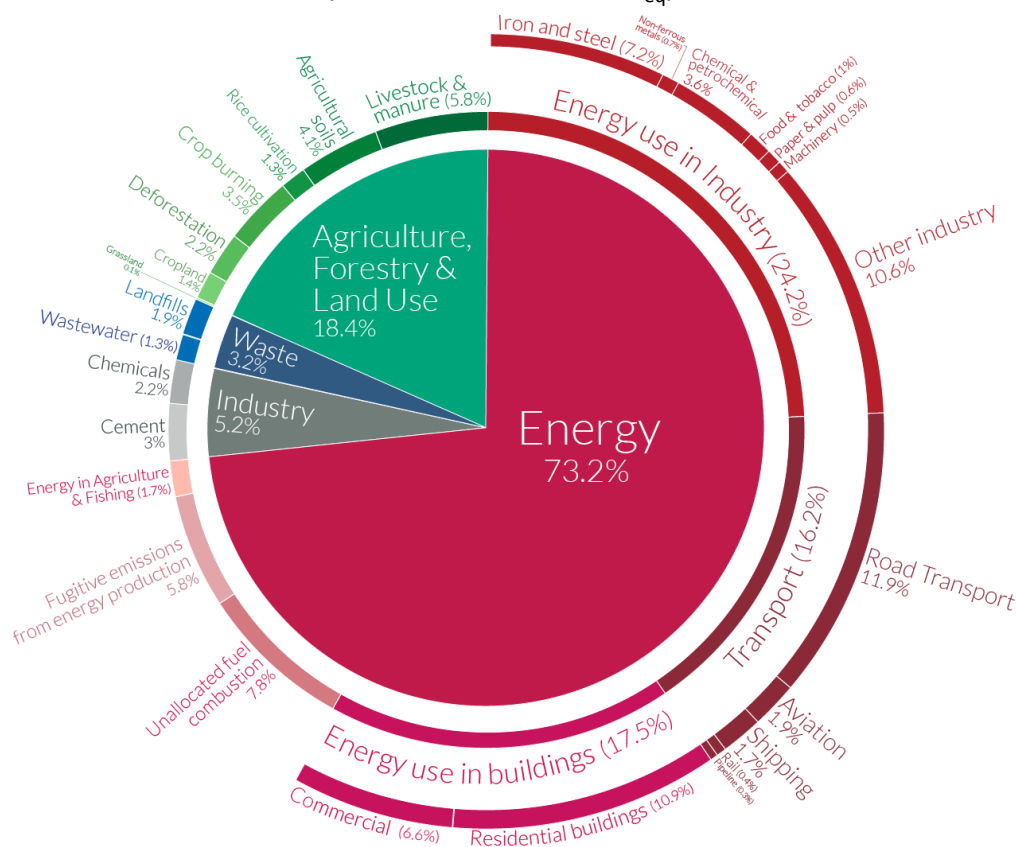
Source: IPCC, 2023: Sections. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

L'essentiel du problème: les énergies fossiles

(Pétrole, gaz et charbon)

Répartition des émissions mondiales de gaz à effet par secteur

(année 2016 ~50 Gt CO_{2eq})

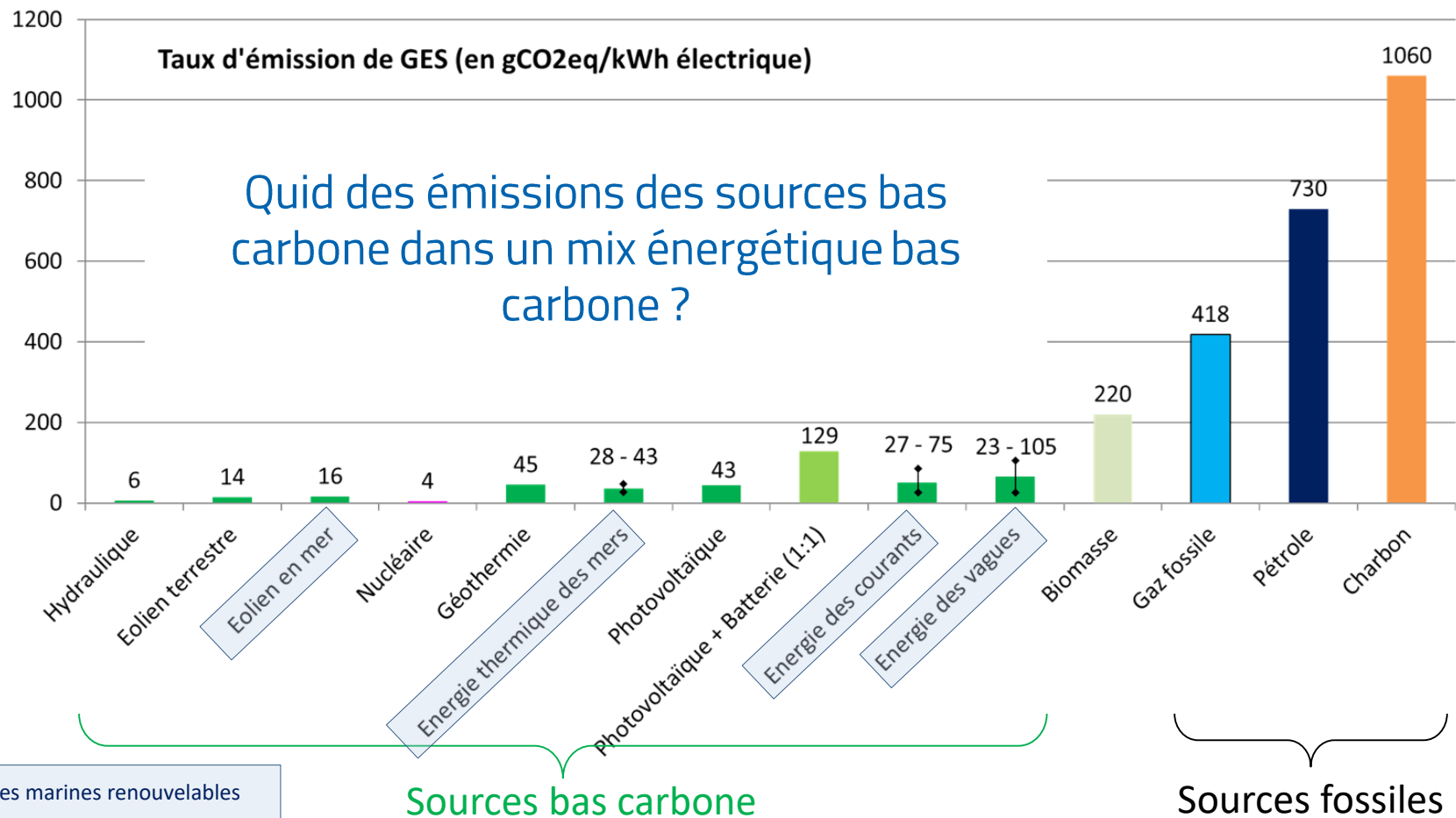


OurWorldinData.org – Research and data to make progress against the world's largest problems.

Source: Climate Watch, the World Resources Institute (2020).

Licensed under CC-BY by the author Hannah Ritchie (2020).

Les énergies renouvelables et nucléaire sont-elles plus vertes que les énergies fossiles?

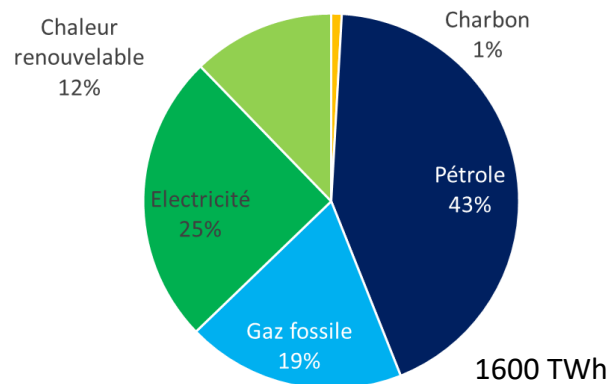


Sources : Base carbone ADEME (2023): <https://base-empreinte.ademe.fr> ; V. Fthenakis, E. Leccisi: Updated sustainability status of crystalline silicon-based photovoltaic systems: life-cycle energy and environmental impact reduction trends. *Progress in Photovoltaics*, 1-10, 2021; W. Wang, P. Dwivedi, R. Abt, M. Khanna : Carbon savings with transatlantic trade in pellets: accounting for market-driven effects. *Environmental Research Letters* 10 114019, 2015; S. Pennock, M.M. Vanegas-Cantarero, T. Bloise-Thomaz, H. Jeffrey, M.J. Dickson: Life cycle assessment of a point-absorber wave energy array. *Renewable energy* 190, 1078-1088, 2022; G. Li, W. Zhu: Tidal current energy harvesting technologies: a review of current status and life cycle assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 179(113269), 2023; M.G. Paredes, A. Padilla-Rivera, L.P. Guereca: Life cycle assessment of ocean energy technologies: a systematic review. *Journal of Marine Science and Engineering* 7(322), 2019; F.B. Jasper, J. Spathe, M. Baumann, J.F. Peters, J. Ruhland, M. Weil (2022) Life cycle assessment (LCA) of a battery home storage system based on primary data. *Journal of Cleaner Production* 366, 132899.

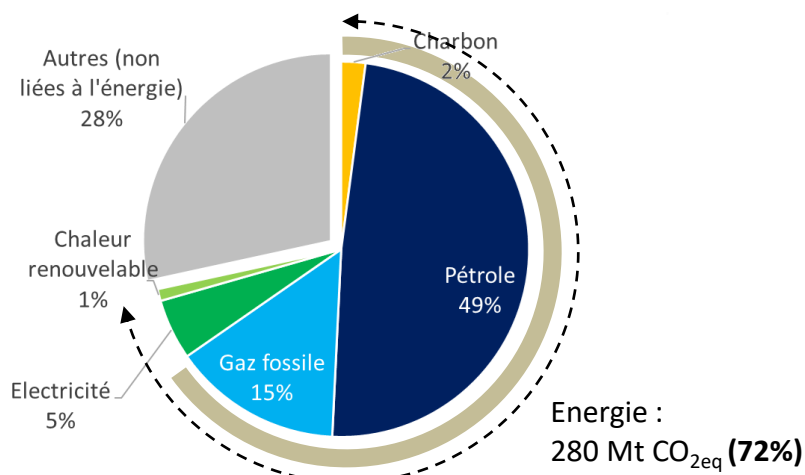
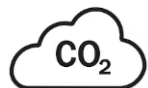
Les enjeux pour la France

2022

Consommation finale d'énergie



Emissions gaz à effet de serre



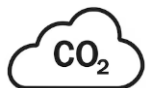
Sources: Ministère de la transition énergétique: Bilan énergétique de la France en 2022. Données provisoires, avril 2023; RTE : Futurs Energétiques 2050 : rapport complet. Février 2022; Base carbone ADEME (2023): <https://base-empreinte.ademe.fr>; Gouvernement Français: Projet de stratégie nationale bas-carbone n°3 – premières grandes orientations à l'horizon 2030 et enjeux à l'horizon 2050

Les enjeux pour la France

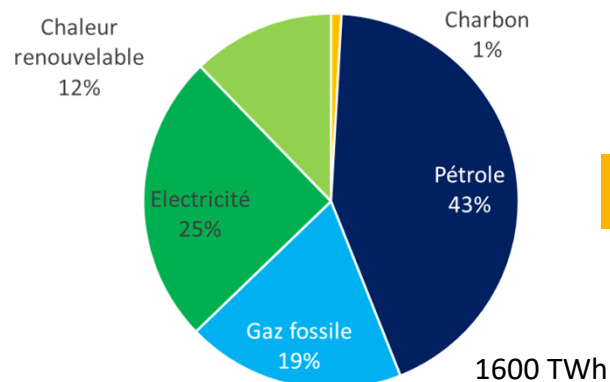
Consommation finale d'énergie



Emissions gaz à effet de serre

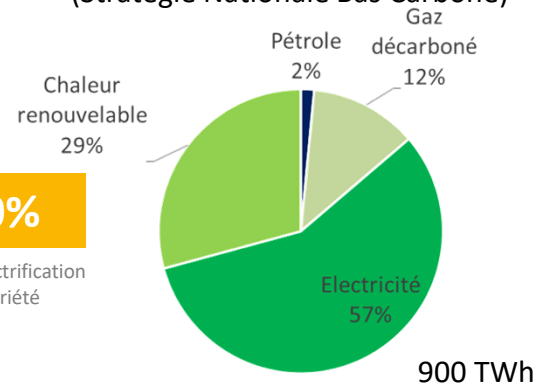


2022



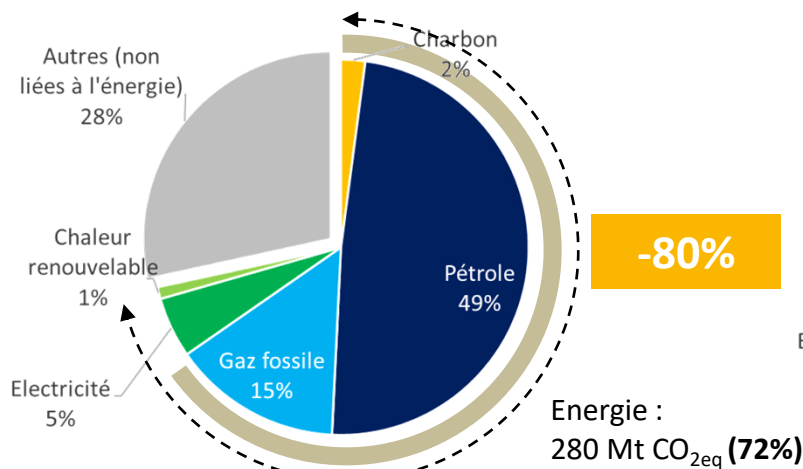
2050

(Stratégie Nationale Bas Carbone)

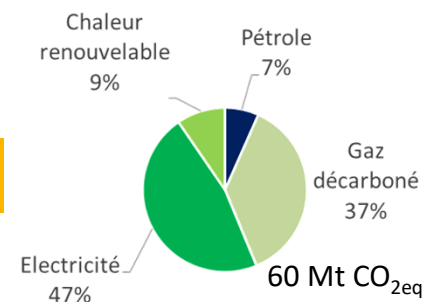


-40%

- Electrification
- Sobriété



-80%



Sommaire

1. Qui vous parle?
2. Contexte climatique et énergétique
3. Energies marines renouvelables

Eolien en mer posé

Eolien en mer flottant

Energie thermique des mers

Energie des vagues

Energie des courants/marée

(Energie des gradients de salinité)

Les Energies Marines Renouvelables

Énergie des courants

Sabella D03 à Bénodet
© SABELLA



Énergie des vagues

Oyster en Ecosse
© Aquamarine Power



Énergie thermique des mers

La centrale ETM à Hawaï
© Luis Vega



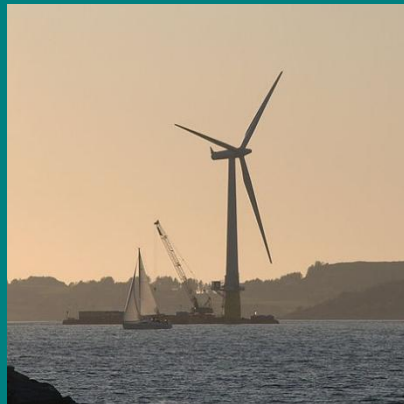
Énergie marémotrice

Usine de la Rance



Énergie du vent en mer

Hywind en Norvège
© Lars Christopher

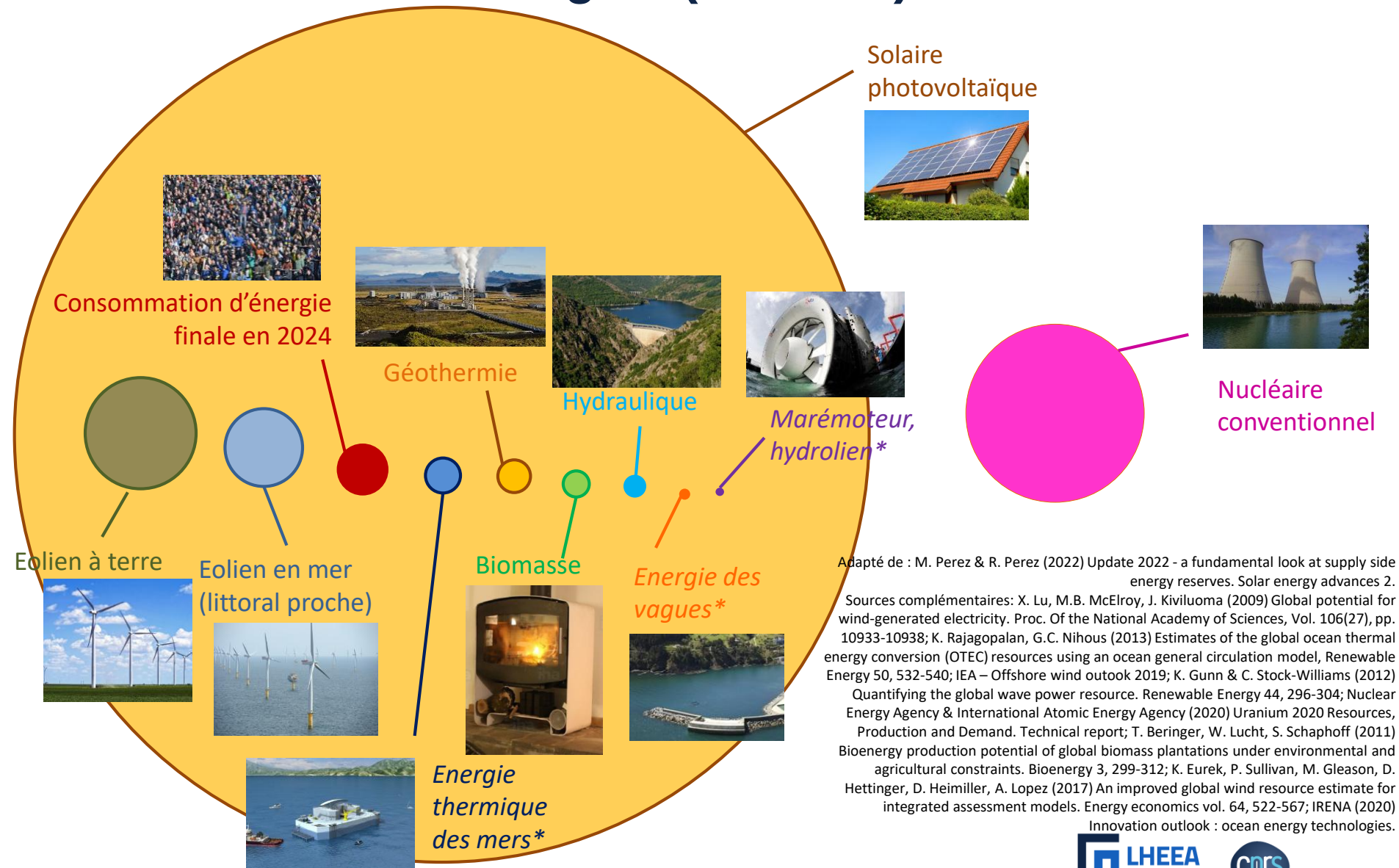


Énergie des gradients de salinité

Installation pilote de Statkraft
© Bjoertvedt



Potentiel des énergies (marines) renouvelables



*Théorique car technologie non mature

En chiffres

- | | |
|---|---------------------|
| 1. Eolien en mer flottant
En littoral proche, i.e <200 km rivage | ← 182 000 TWh/an |
| 2. Eolien en mer posé
Profondeur d'eau <60 m | ← 92 000 TWh/an |
| 3. (Energie thermique des mers)
Faisabilité technique incertaine | ← 61 000 TWh/an |
| 4. L'énergie des vagues | ← 2 100 TWh/an |
| 5. (L'énergie des gradients de salinité) | ← 1 600 TWh/an |
| 6. L'énergie des courants de marée | ← <1 200 TWh/an |
| Consommation d'énergie finale : | ~125 000 TWh (2024) |

Sommaire

1. Qui vous parle?
2. Contexte climatique et énergétique
3. Energies marines renouvelables

Eolien en mer posé

Eolien en mer flottant

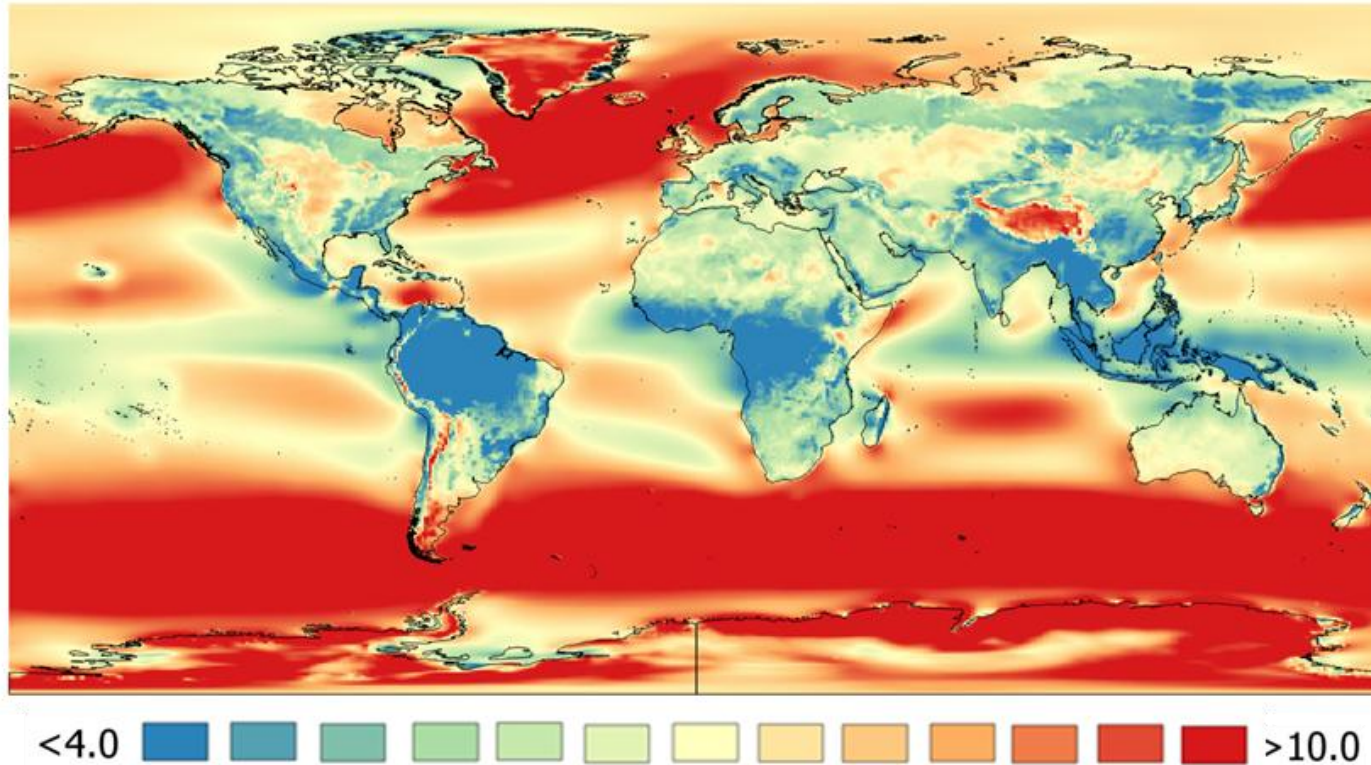
Energie thermique des mers

Energie des vagues

Energie des courants/marée

(Energie des gradients de salinité)

Meilleure qualité de vent (force)

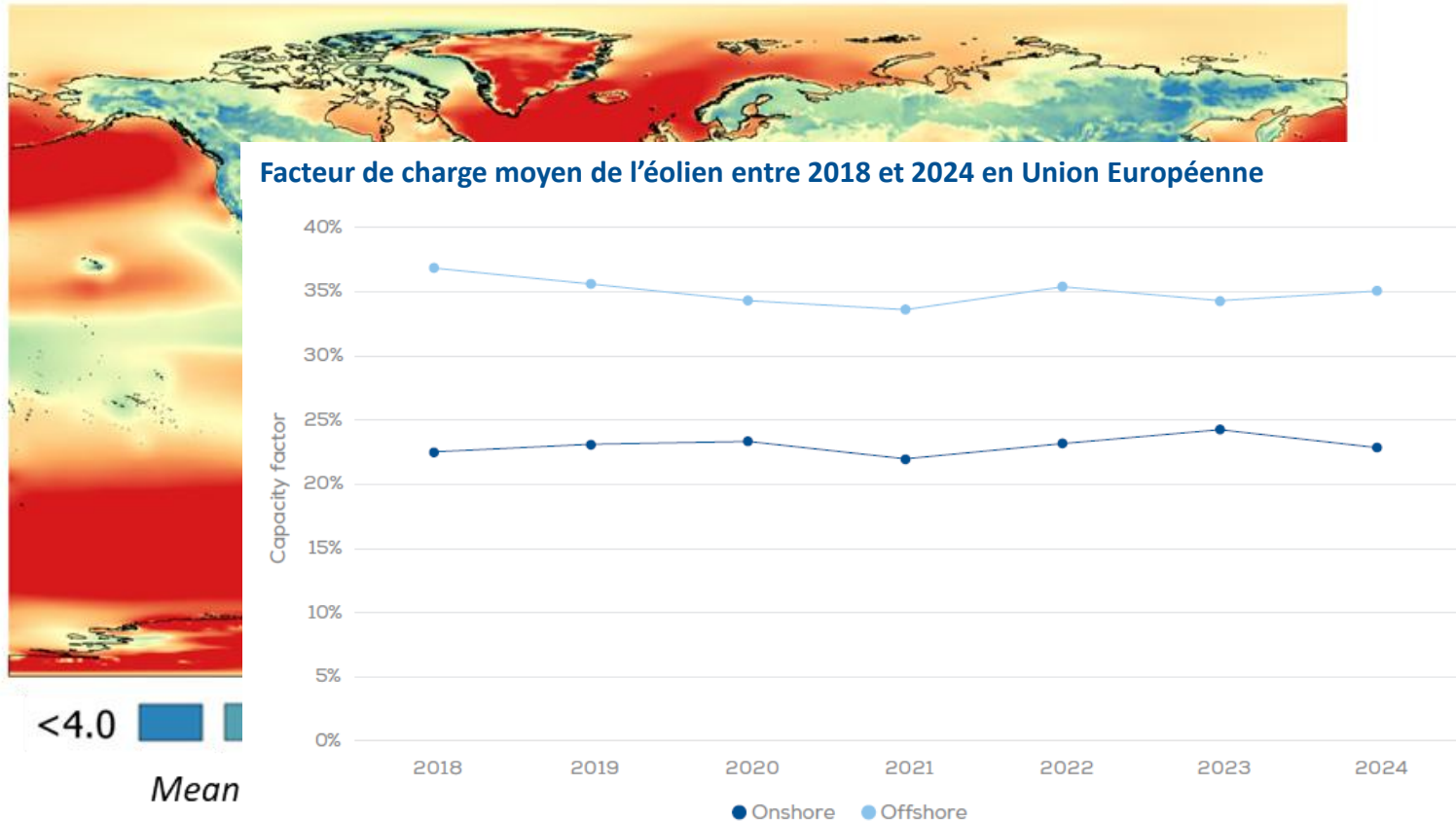


Mean wind speed at 100 m from MERRA analysis. Period 1979–2013.

Source: DTU Wind energy, Global Wind Atlas 1.0

Motivations pour l'éolien en mer (1/2)

Meilleure qualité de vent (force)

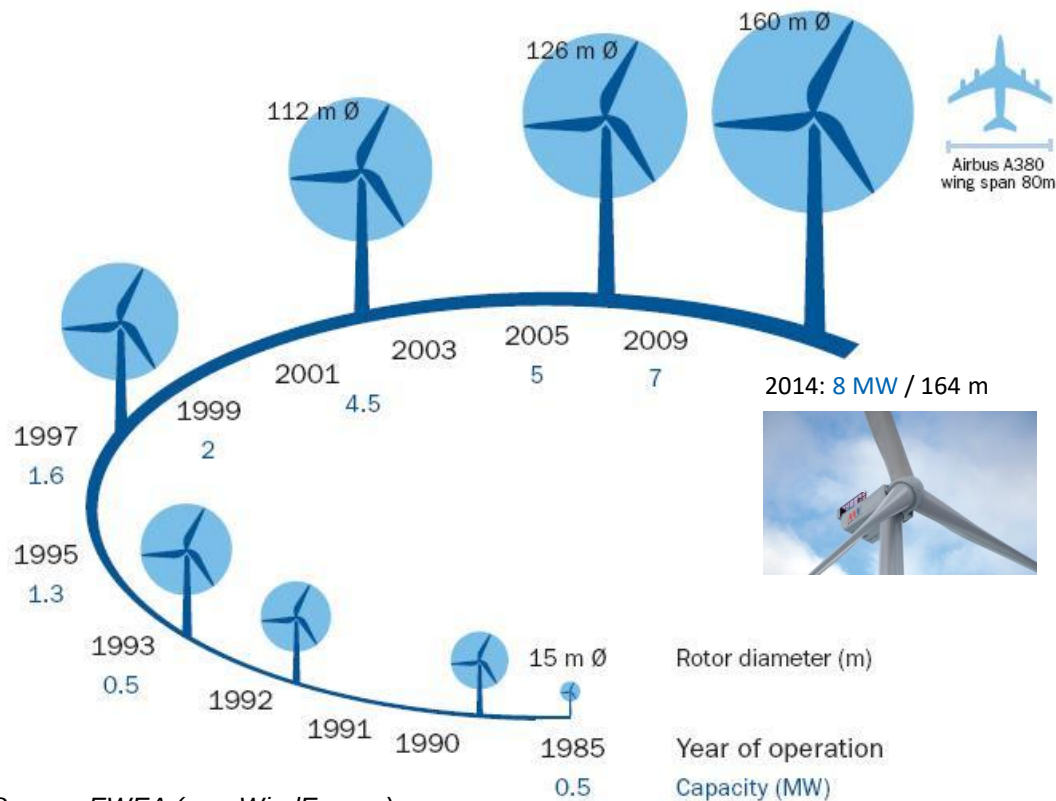


Source: Wind Energy in Europe – 2024 Statistics and the outlook for 2025 - 2030

Motivations pour l'éolien en mer (2/2)

Turbines de plus grande dimension

Size evolution of wind turbines over time



Source: EWEA (now WindEurope)

2025: 26 MW / 310 m



2024: 20 MW / 292 m



2023: 16 MW / 260 m



2021: 12 MW / 220 m



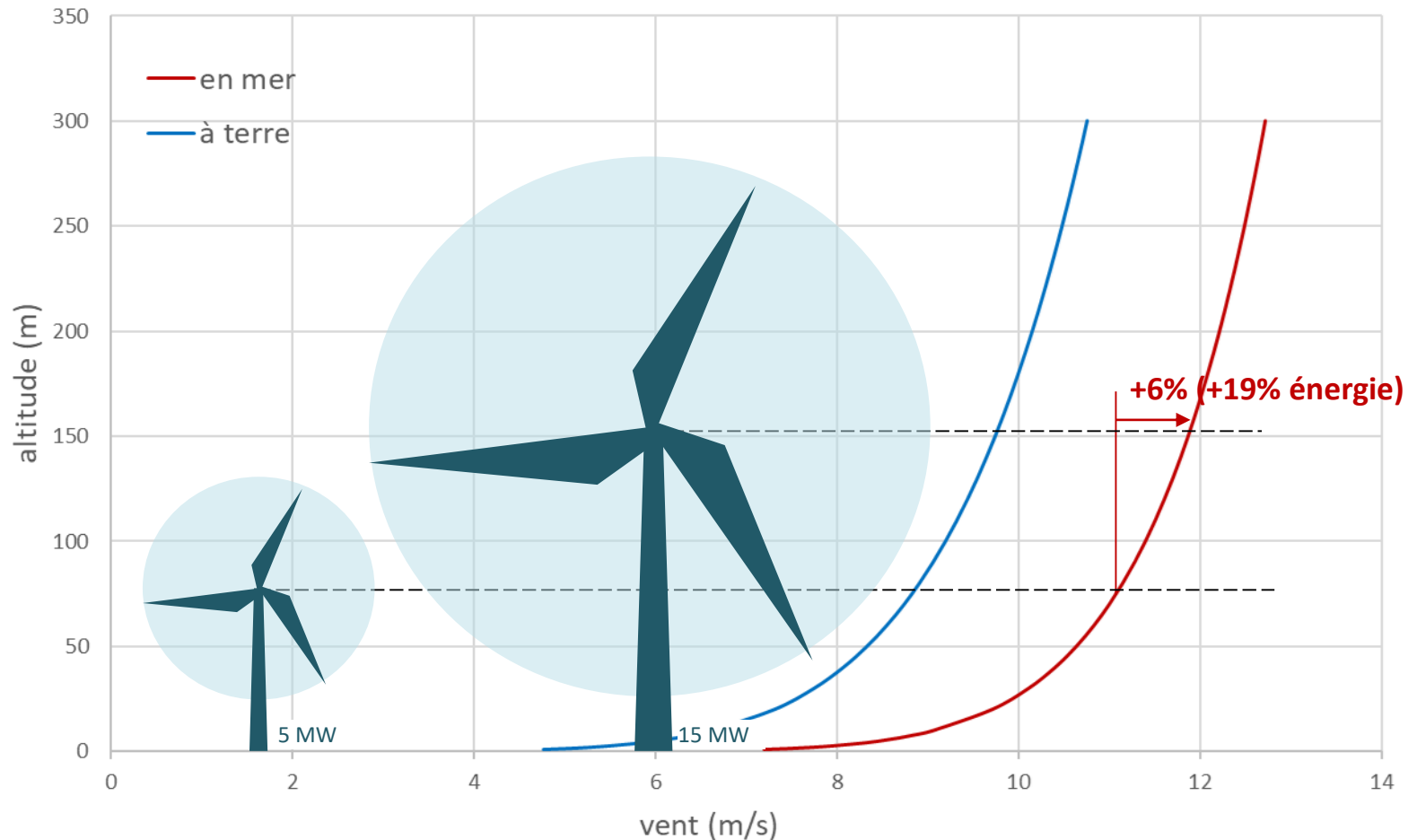
2017: 9.5 MW / 164 m



Motivations pour l'éolien en mer (2/2)

Turbines de plus grande dimension

Couche limite atmosphérique



Motivations pour l'éolien en mer (2/2)

Turbines de plus grande dimension

Problématique du transport (notamment pales)



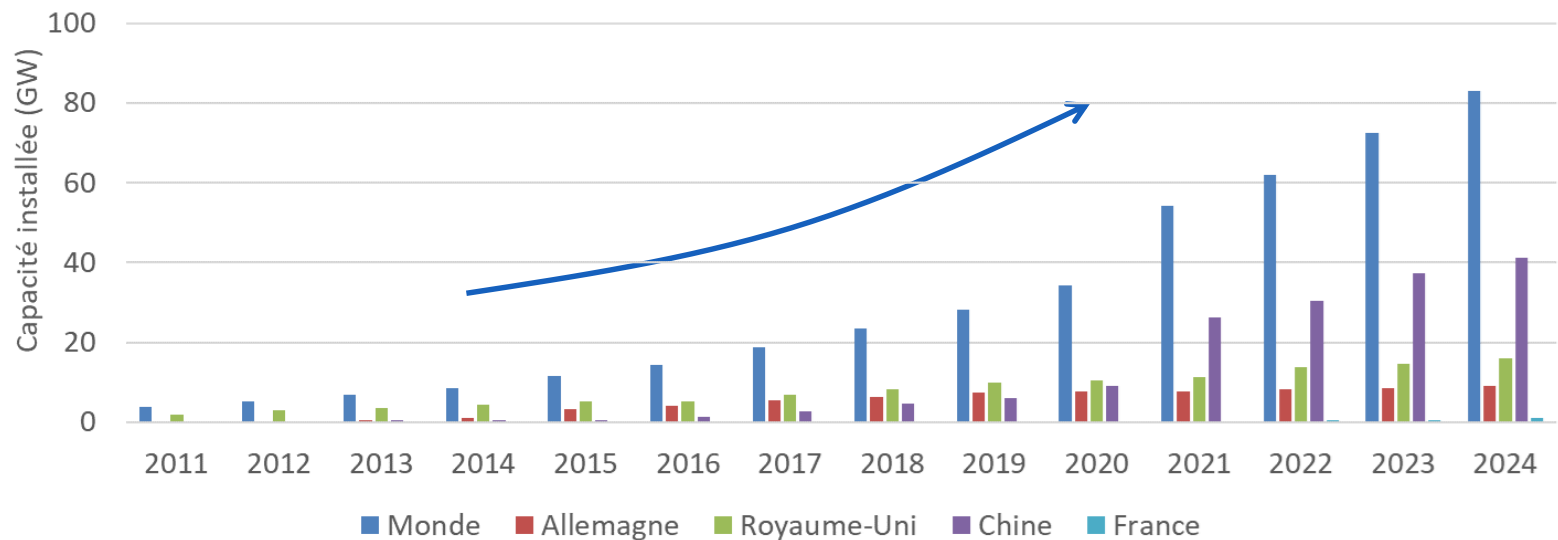
Historique et perspectives

1991 : Première ferme éolienne en mer

- Vindeby, Danemark (1991)
- 11 turbines Bonus - 450 kW
- profondeur : 4 m
- distance à la côte : 2 km
- démantelé en 2017

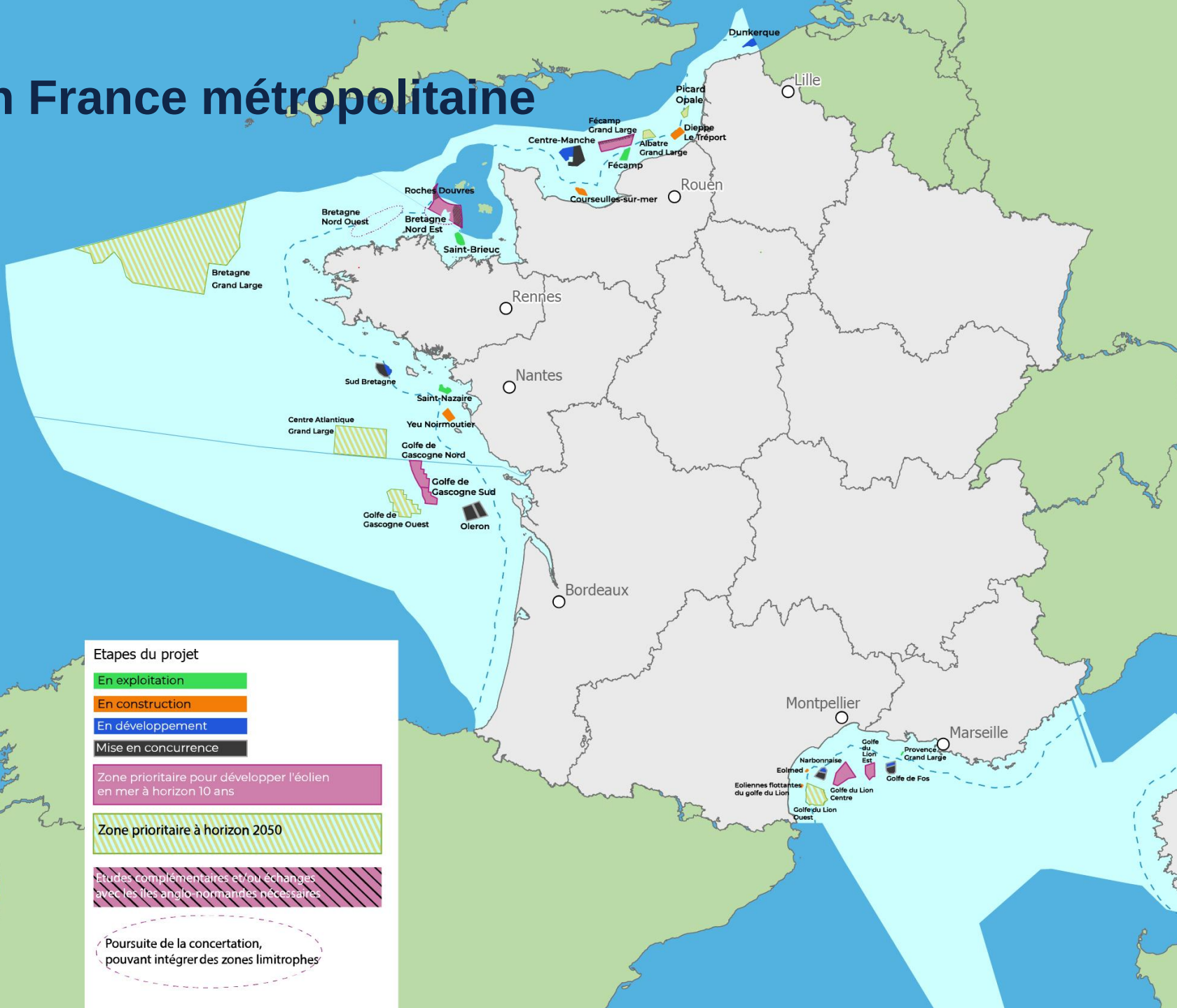
Filière en fort développement (+ ~15%/an)

- EU depuis 2010
- Chine depuis 2015



Source : Global Wind Energy Council

En France métropolitaine



Etapas du projet

En exploitation

En construction

En développement

Mise en concurrence

Zone prioritaire pour développer l'éolien
en mer à horizon 10 ans

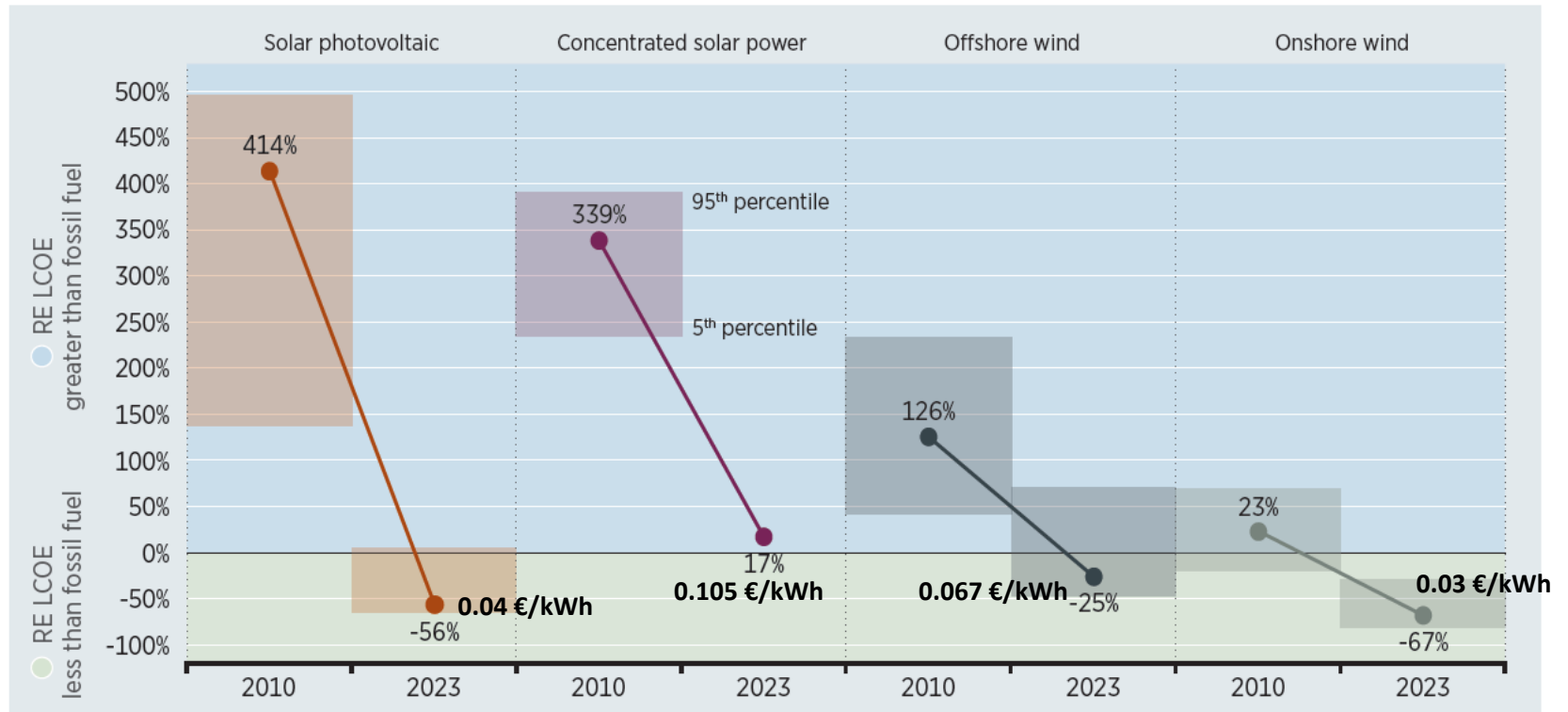
Zone prioritaire à horizon 2050

Etudes complémentaires et/ou échanges
avec les îles anglo-normandes nécessaires

Poursuite de la concertation,
pouvant intégrer des zones limitrophes

Coût de l'éolien en mer posé

Source: WindEurope: Offshore wind energy 2023 statistics, April 2024



Note: RE = renewable energy.

Coût moyen en 2023 : 6.7 c€/kWh

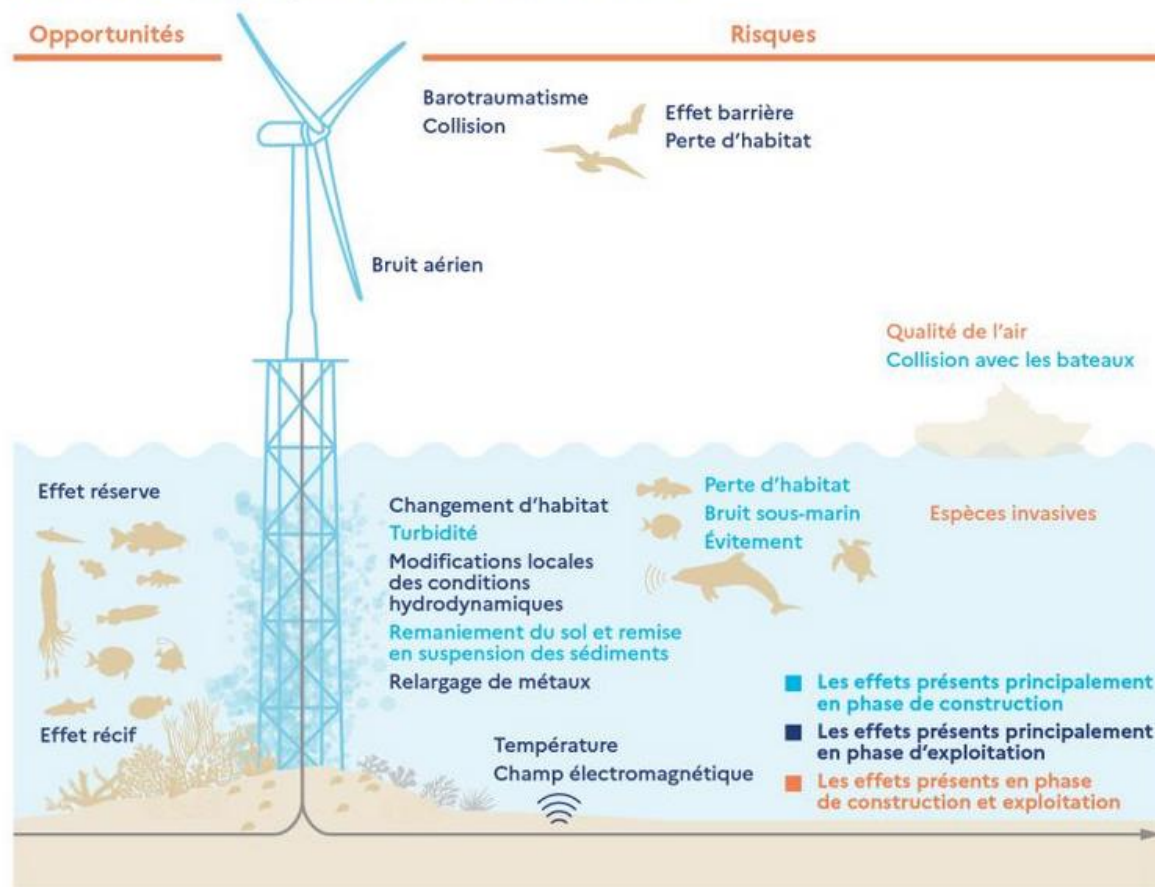
-64% / 2010 (18.3 c€/kWh)

Moins cher que les énergies fossiles & nouveau nucléaire (hors coût variabilité)

Parc « Centre Manche 2 » (2025) 1500 MWc : 6.6 c€/kWh

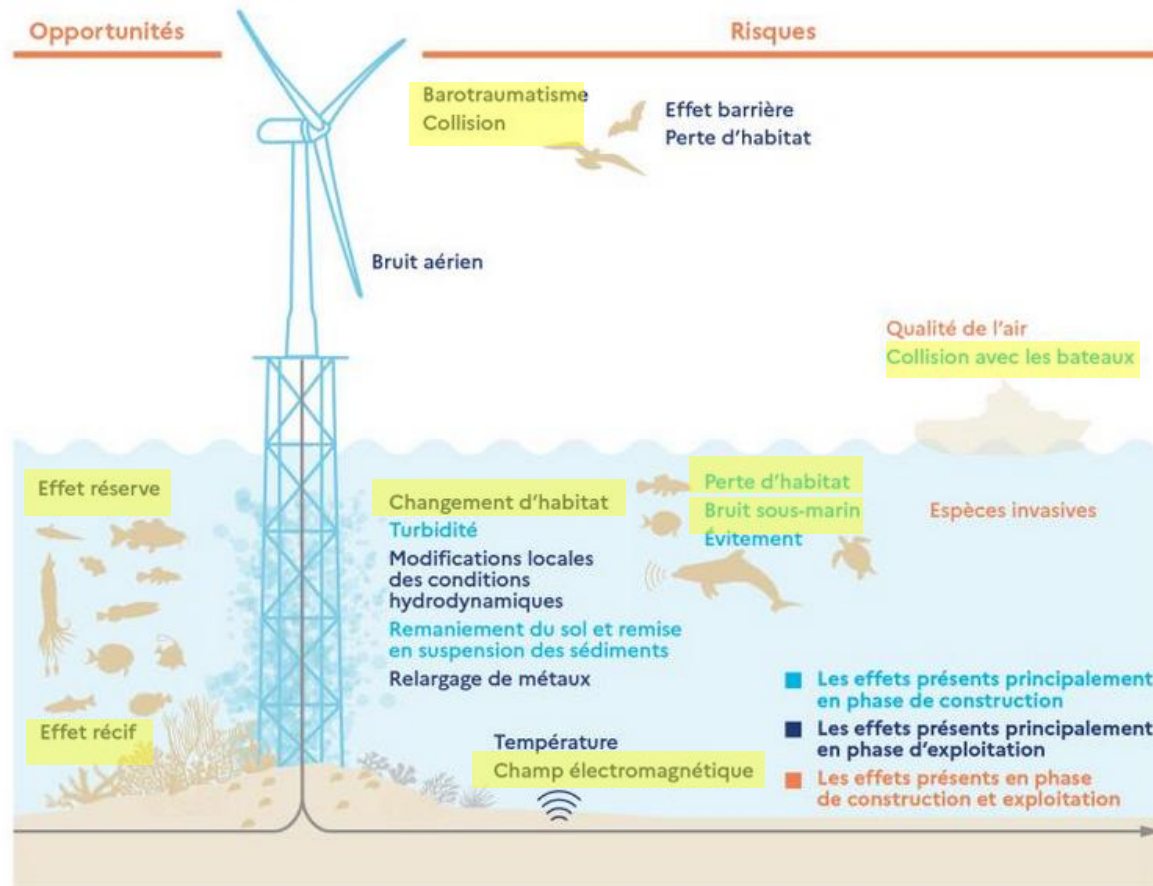
Impact environnemental

Les opportunités et les risques de l'implantation d'un parc éolien en mer et de son raccordement pour l'environnement marin



Impact environnemental

Les opportunités et les risques de l'implantation d'un parc éolien en mer et de son raccordement pour l'environnement marin

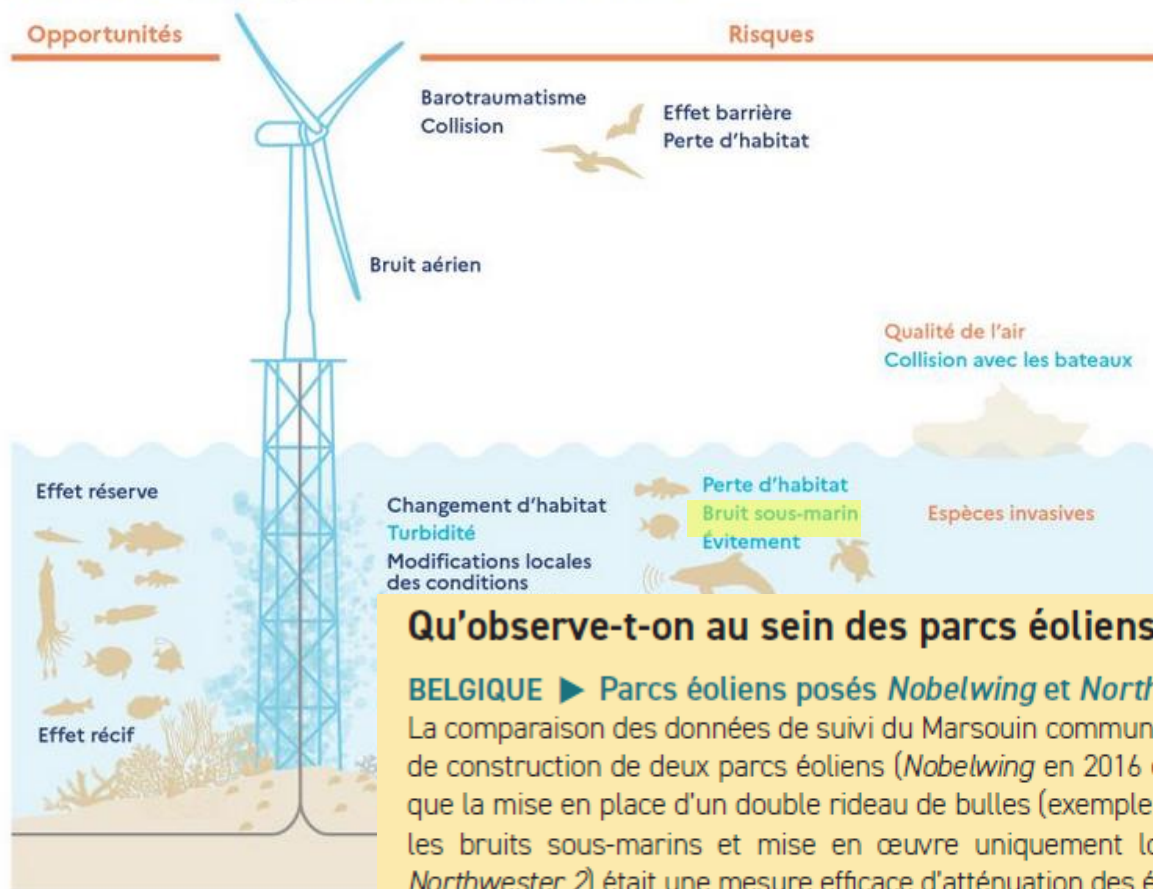


Enjeux principaux

Source: *Les effets de l'éolien en mer sur l'environnement. Fiches synthétiques.* Syndicat des Energies Renouvelables, France renouvelables, France Energies Marines, 2024 <https://www.france-renouvelables.fr/wp-content/uploads/2024/11/Effets-de-leolien-en-mer-2023-Fiches-Maj2024-HD.pdf>

Impact environnemental

Les opportunités et les risques de l'implantation d'un parc éolien en mer et de son raccordement pour l'environnement marin



Enjeux principaux

Source: Les effets de l'éolien en mer sur l'environnement. Fiches synthétiques. Syndicat des Energies Renouvelables, France renouvelables, France Energies Marines, 2024 <https://www.france-renouvelables.fr/wp-content/uploads/2024/11/Effets-de-leolien-en-mer-2023-Fiches-Maj2024-HD.pdf>

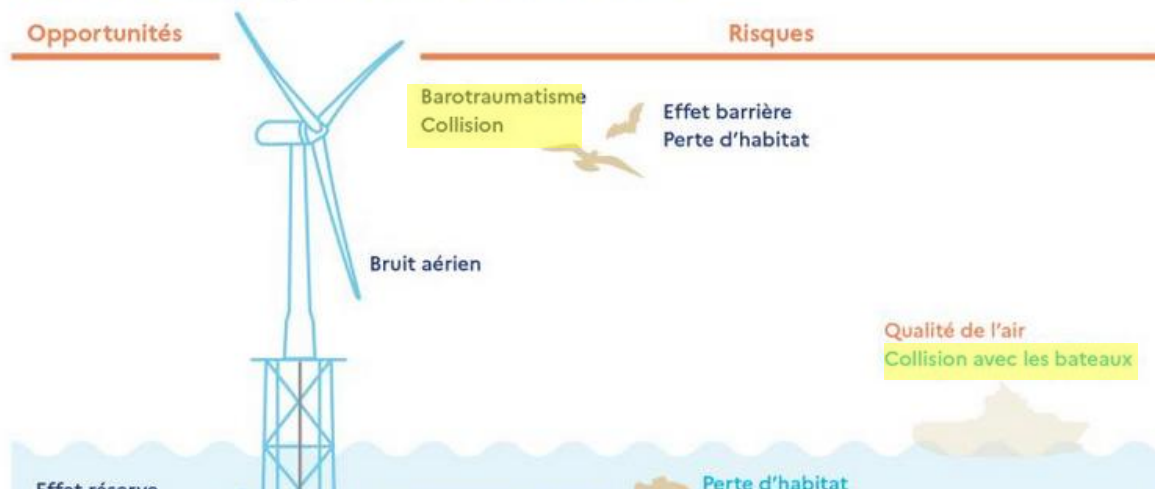
Qu'observe-t-on au sein des parcs éoliens déjà en activité ?

BELGIQUE ► Parcs éoliens posés *Nobelwing* et *Northwester 2*

La comparaison des données de suivi du Marsouin commun, mise en œuvre lors des opérations de construction de deux parcs éoliens (*Nobelwing* en 2016 et *Northwester 2* en 2019) a montré que la mise en place d'un double rideau de bulles (exemple de technique permettant d'atténuer les bruits sous-marins et mise en œuvre uniquement lors de la construction du parc de *Northwester 2*) était une mesure efficace d'atténuation des émissions sonores. A courte distance de la source de bruit (de 0 à 10 km), le taux de fréquentation du site par les marsouins est plus important lorsque des mesures d'atténuation sont mises en œuvre, témoignant de leur efficacité.

Impact environnemental

Les opportunités et les risques de l'implantation d'un parc éolien en mer et de son raccordement pour l'environnement marin



Qu'observe-t-on au sein des parcs éoliens déjà en activité ?

ROYAUME-UNI ► Parc éolien posé *Thanet*

Les suivis mis en place au sein et en périphérie du parc éolien *Thanet* ont mis en avant que les oiseaux marins suivis (Fou de Bassan, Goéland marin, Goéland argenté et Mouette tridactyle) ont tendance à éviter la zone d'implantation des éoliennes, ce qui réduit fortement les risques de collision avec les pales.

FRANCE ► Parc éolien posé *Saint-Brieuc*

Des suivis radars ont été mis en place sur le site d'implantation du parc éolien afin d'estimer l'importance de la Baie de Saint-Brieuc pour les oiseaux migrateurs. Ces suivis ont permis de montrer que l'activité des oiseaux migrateurs en Baie est modérée et que 80% des passereaux volent à une altitude inférieure à la hauteur des pales, réduisant ainsi le risque de collision.

Enjeux principaux

Source: *Les effets de l'éolien en mer sur l'environnement. Fiches synthétiques.* Syndicat des Energies Renouvelables, France renouvelables, France Energies Marines, 2024 <https://www.france-renouvelables.fr/wp-content/uploads/2024/11/Effets-de-leolien-en-mer-2023-Fiches-Maj2024-HD.pdf>

Impact enviro

Les opportunités et les risques de l'implantation d'un parc éolien en mer et de son raccordement pour l'environnement marin

Opportunités



Qu'observe-t-on au sein des parcs éoliens déjà en activité ?

ALLEMAGNE ► Parc éolien posé *Alpha Ventus*

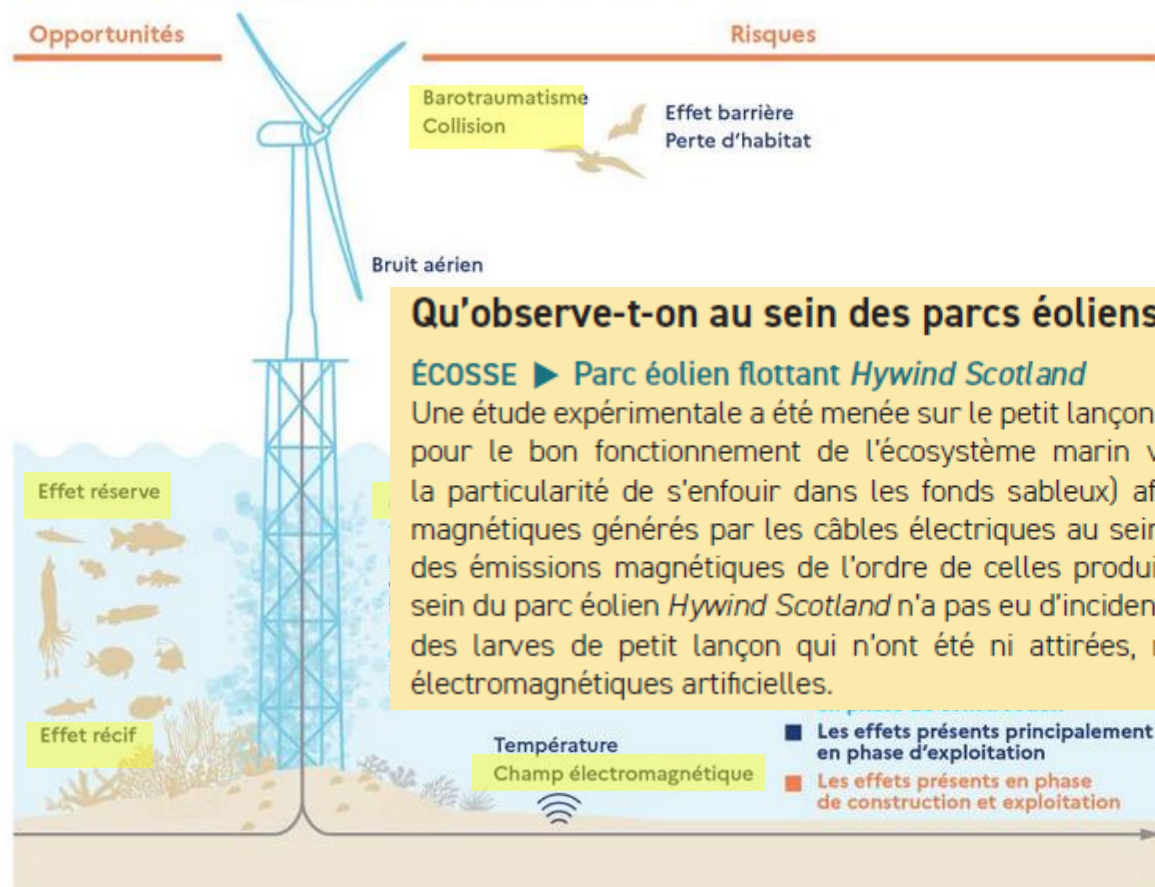
Les suivis menés au sein du parc éolien *Alpha Ventus* ont montré une augmentation locale de la diversité des espèces marines à proximité des fondations. Les fondations et les structures de protection des câbles ont créé des surfaces artificielles disponibles pour des espèces affectionnant les substrats durs (généralement des espèces vivant en milieux rocheux par exemple) et qui étaient naturellement absentes de cette zone dominée par des substrats dits « meubles » (sables, vases, etc.).

BELGIQUE ► Parcs éoliens posés *C-Power* et *Belwind*

Les 8 années de suivis menées au sein des parcs *C-Power* et *Belwind* sur plusieurs espèces, vivant dans ou à proximité des sédiments meubles, ont montré que les populations de poissons au sein des parcs n'avaient pas subi de changements radicaux, à moyen et long terme, après la mise en service des parcs. La présence des parcs a eu pour effet principal d'augmenter le nombre d'espèces généralement associées aux substrats durs (crabe dormeur, bar, etc.) mais aussi le nombre d'espèces associées aux substrats meubles (plie, sole, petite vive, etc.) à l'intérieur des parcs et à proximité immédiate.

Impact environnemental

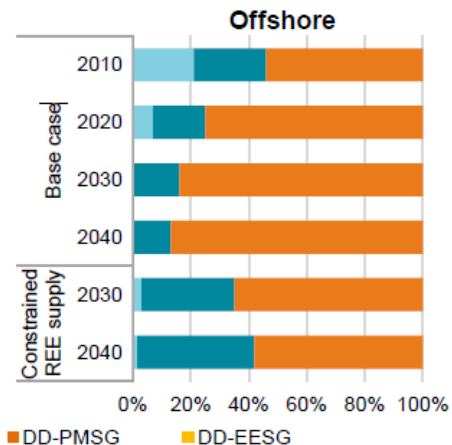
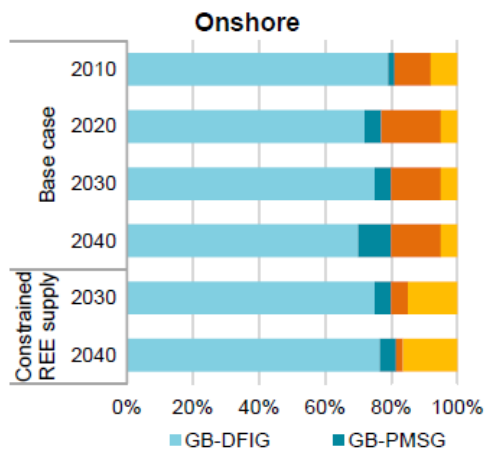
Les opportunités et les risques de l'implantation d'un parc éolien en mer et de son raccordement pour l'environnement marin



Enjeux principaux

Source: Les effets de l'éolien en mer sur l'environnement. Fiches synthétiques. Syndicat des Energies Renouvelables, France renouvelables, France Energies Marines, 2024 <https://www.france-renouvelables.fr/wp-content/uploads/2024/11/Effets-de-leolien-en-mer-2023-Fiches-Maj2024-HD.pdf>

Consommation de ressources naturelles



IEA. All rights reserved.

Répartition du marché par types d'éoliennes et projections

Terrestre : génératrice à rotor bobiné 75% (peu de terres rares)

Offshore : génératrice à aimants permanents 80% (terres rares)

Composition:

Acier (mat, arbre, structure) : ~100 t/MWc

Aluminium : ~7 t/MWc

Cuivre : ~4 t/MWc

Autres métaux : ~4 t/MWc

Composites (pales): ~8 t/MWc

Béton (fondation terrestre) 500 t/MWc / 700 t/MWc (gravitaire offshore)

Acier (fondation monopieu offshore) 200 t/MWc

Terres rares : 13 – 239 **kg**/MWc en fonction du type de génératrice

Recyclabilité >90%

Développement de pâles recyclables pour encore augmenter le taux de recyclabilité

Durée de vie :

Terrestre : 20+ ans

Offshore : 25+ ans

Consommation des ressources naturelles

Ressource (tonne/TWh)	Charbon	Gaz	Nucléaire	Eolien offshore posé (1 éolienne de 12 MWc)	Eolien terrestre (8 éoliennes de 3MWc)	Solaire (~50ha de panneaux de 300Wc)
Aluminium	3	3	<1	84	45	480
Zinc	0	0	0	48	100	50
Béton	800	800	1 600	120 / 8 400	8 000	2 000
Cuivre	<1	<1	1.3	48	42	200
Verre	0	0	0	96	140	2 100
Chrome	0	0	1.2	6	11	0
Plomb	0	0	0 x10	0	0	0
Plastique	0	0	0	80	160	310
Silicium	0	0	0	0	0	200
Acier	340	340	1 400	2 400 / 2200	1 100	2 000
Sous total	1 143	1 143	3 002	2 882 / 11 162	9 598	7 340

Sources: U.S. DOE (2015) Quadriennial technology review. An assessment of energy technologies and research opportunities & U.S. DOI and U.S.G.S (2018) Mineral commodity summaries, Sfen (2022) Combien coûte le nucléaire? Economie du nucléaire dans le système électrique. Note technique

Consommation des ressources naturelles

Ressource (tonne/TWh)	Charbon	Gaz	Nucléaire	Eolien offshore posé (1 éolienne de 12 MWc)	Eolien terrestre (8 éoliennes de 3MWc)	Solaire (~50ha de panneaux de 300Wc)
Aluminium	3	3	<1	84	45	480
Zinc	0	0	0	48	100	50
Béton	800	800	1 600	120 / 8 400	8 000	2 000
Cuivre	<1	<1	1.3	48	42	200
Verre	0	0	0	96	140	2 100
Chrome	0	0	1.2	6	11	0
Plomb	0	0	0 x10	0	0	0
Plastique	0	0	0	80	160	310
Silicium	0	0	0	0	0	200
Acier	340	340	1 400	2 400 / 2200	1 100	2 000
Sous total	1 143	1 143	3 002	2 882 / 11 162	9 598	7 340
Combustible	429 000	133 000	20	0	0	0
Total	430 185	133 572	3 022	2 882 / 11 162	9 598	7 340

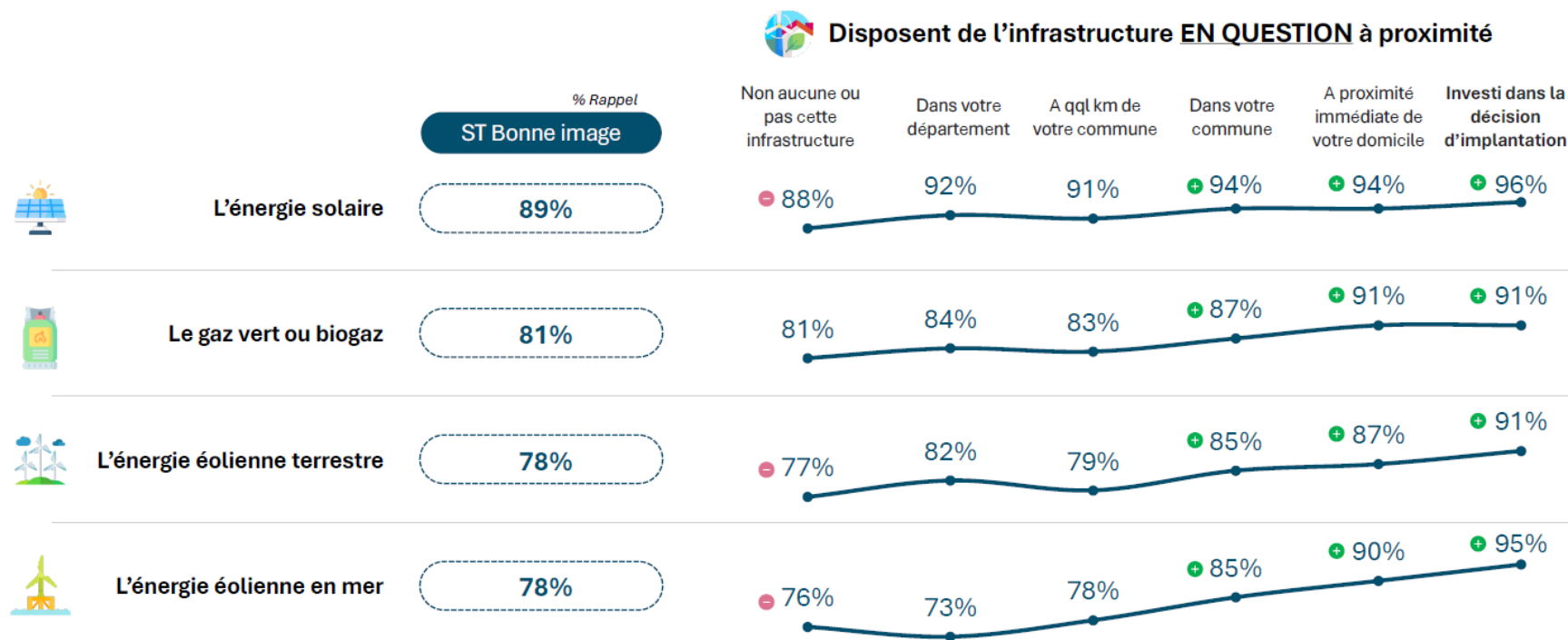
/10+

Sources: U.S. DOE (2015) Quadriennial technology review. An assessment of energy technologies and research opportunities & U.S. DOI and U.S.G.S (2018) Mineral commodity summaries, Sfen (2022) Combien coûte le nucléaire? Économie du nucléaire dans le système électrique. Note technique

Perception des Français de l'éolien en mer ?

Un constat avéré pour tous les types d'énergies renouvelables.

L'image des différents types d'énergie chez les riverains



Sommaire

1. Qui vous parle?
2. Contexte climatique et énergétique
3. Energies marines renouvelables

Eolien en mer posé

Eolien en mer flottant

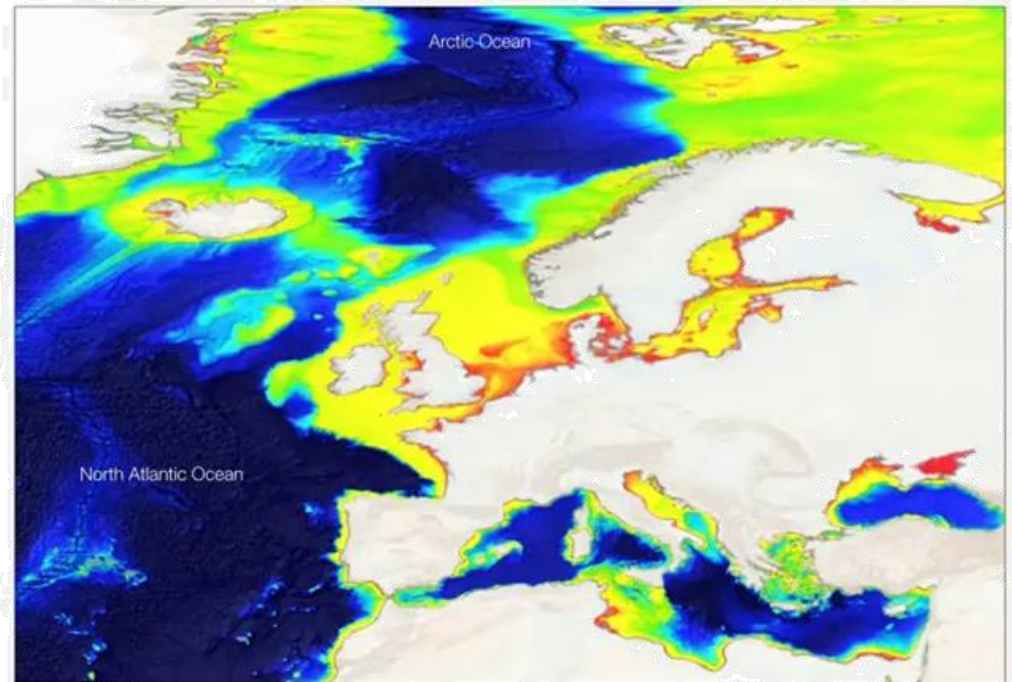
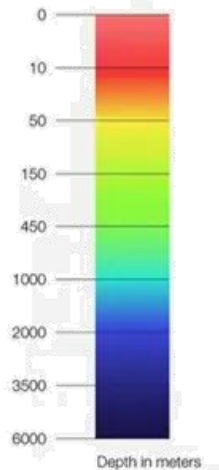
Energie thermique des mers

Energie des vagues

Energie des courants/marée

(Energie des gradients de salinité)

Motivation pour l'éolien flottant : exploiter des zones plus profondes



Potentiel éolien en mer posé : 92 000 TWh/an

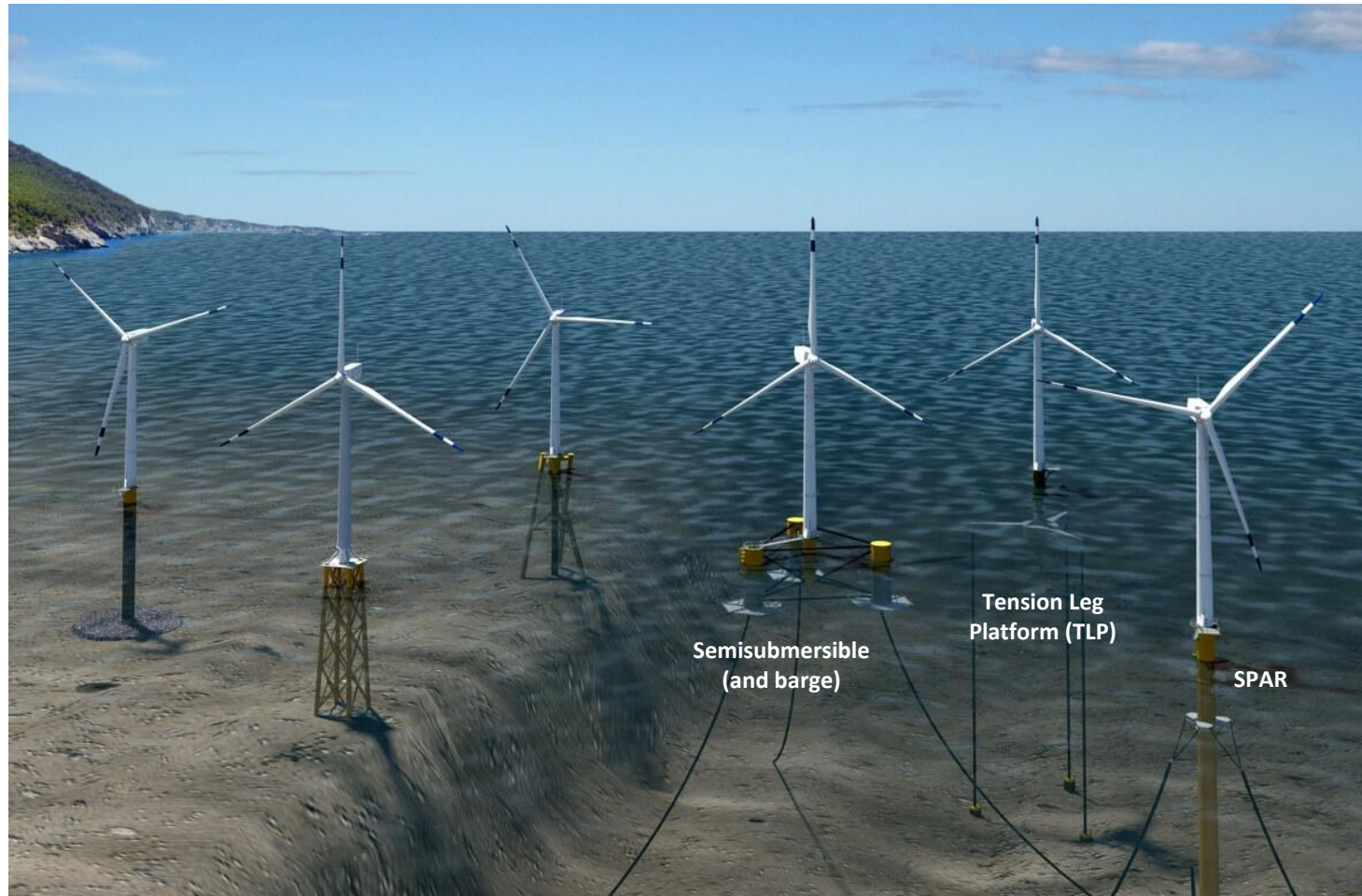
Profondeur d'eau <60 m

Potentiel éolien en mer flottant : 182 000 TWh/an

En littoral proche, i.e <200 km du rivage

Enjeu : fournir la stabilité nécessaire à l'éolienne

Flotteur + ancrages



Historique de l'éolien flottant

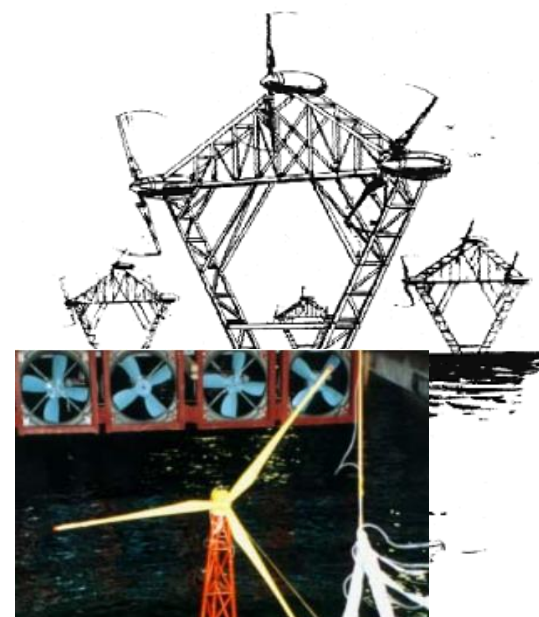
1970: Concept
(Prof. E. Heronemus)

1990: Essais en bassin

2009: 1^{er} prototype en mer
(Hywind Demo, Norvège)
2MW; 100 m x Ø8.3 m; 5 300 t

2017: Première ferme éolienne
flottante (Hywind Scotland, Ecosse)
5x6 MW; 91 m x Ø14.5m ; 2 300 t
acier + ~9 000 t ballast

2018: Première éolienne en
mer de France (FLOATGEN)
2 MW; 36 m x 36 m x 7.5 m;
5 000 t béton + ferrailage



Assemblage et installation Hywind Demo (2009)



Source : K.E. Steen: Hywind Scotland – status and plan. In: Proc. Of the EERA DeepWind'2016 conference, Trondheim, Norway

Fermes éoliennes flottantes en Europe (hors France)



WindFloat Kincardine (2021)
5x 9.5MW



Hywind Tampen (2022)
11x 8.6MW



Hywind Scotland (2017)
5x 6MW



WindFloat Atlantic (2020)
3x 8.4MW

En France métropolitaine



**Groix Belle-île
(2031)**
13x 19MW

Etapes du projet

En exploitation

En construction

En développement

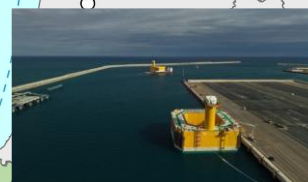
Mise en concurrence

Zone prioritaire pour développer l'éolien
en mer à horizon 10 ans

Zone prioritaire à horizon 2050

Etudes complémentaires et/ou échanges
avec les îles anglo-normandes nécessaires

Poursuite de la concertation,
pouvant intégrer des zones limitrophes



EolMed (2025)
3x 9MW



EFGL (2025)
3x 10MW



Provence Grand Large (2024)
3x 8.4MW

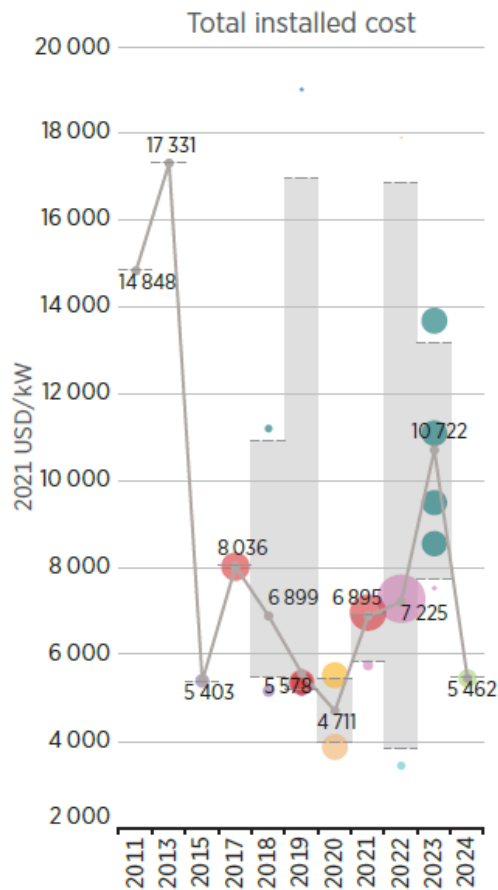


Golfe de Fos 1 (2031)
12x 22.6MW



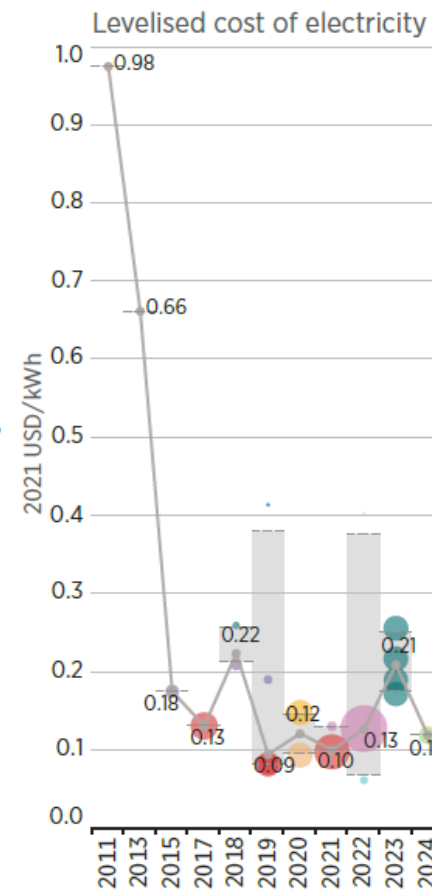
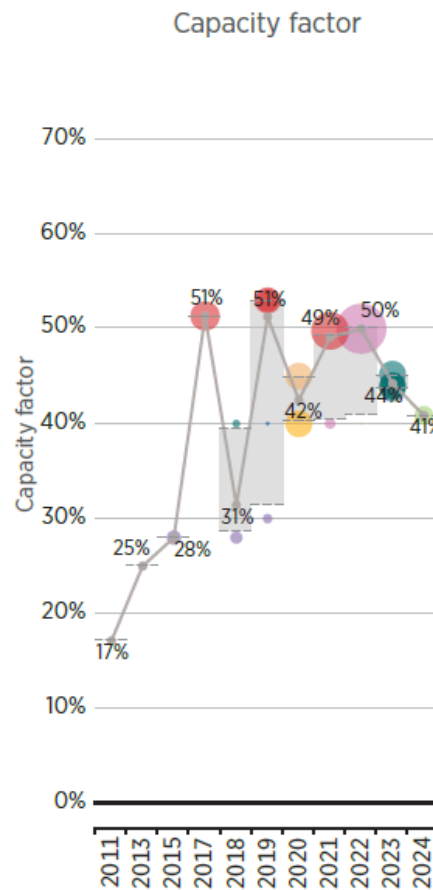
Narbonnaise 1 (2031)
12x 21.5MW

Coût de l'énergie



Country

DEU ESP FRA GBR JPN KOR NOR PRT USA



Capacity (MW)

1 100 200 300

- Groix – Belle Ile
- Golfe de Fos 1
- Narbonnaise 1

0.09 €/kWh ?

2031 ?

Synthèse & défis de l'éolien en mer

- Potentiel énergétique > consommation mondiale
- L'éolien en mer posé est une réalité industrielle
 - 80+ GW installés en 2025 dans le monde, principalement en Europe et en Chine
 - Coûts qui se rapprochent de l'éolien terrestre pour l'éolien posé
- Des prototypes d'éoliennes flottantes existent et de premières fermes sont entrées en opération
 - Leadership européen
- Défis :
 - Logistique (notamment navires d'installation)
 - Vents contraires ...

Sommaire

1. Qui vous parle?
2. Contexte climatique et énergétique
3. Energies marines renouvelables

Eolien en mer posé

Eolien en mer flottant

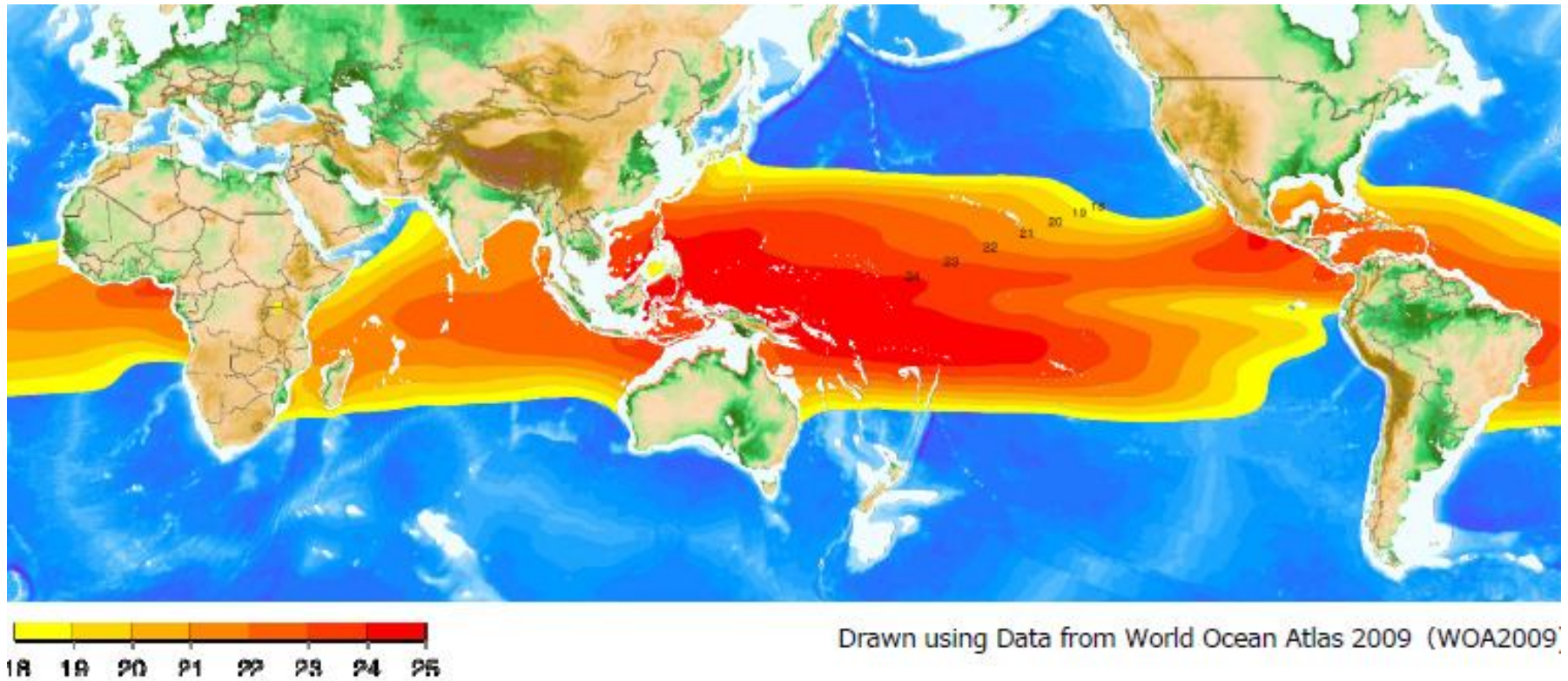
Energie thermique des mers

Energie des vagues

Energie des courants/marée

(Energie des gradients de salinité)

Gisement



Carte des différences de température entre la surface et une profondeur de 1km

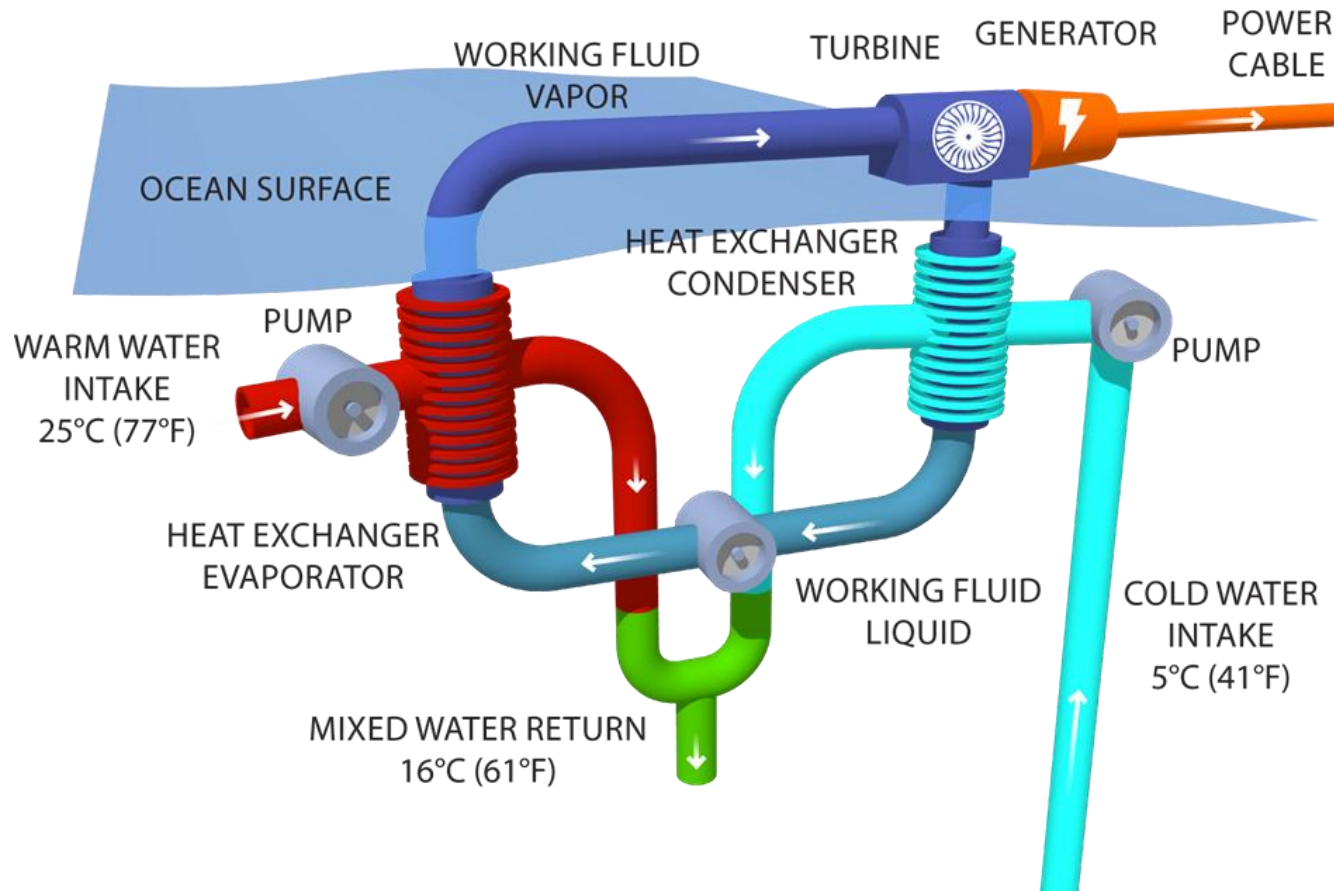
Ressource : ~ 61 000 TWh/an [Rajagopalan and Nihous, 2013]

Voire 120 000 TWh/an, mais **alors avec impact significatif sur la circulation thermo haline**

Avantage: disponible 24h/24 – 7j/7

Profils :
Profondeur (m.) / Température (°C)

Principe



Historique

« ... J'aurais pu, en effet, en établissant un circuit entre des fils plongés à différentes profondeurs, obtenir de l'électricité par la diversité des températures qu'ils éprouvaient »
Jules Verne, *Vingt milles lieues sous les mers*



Expériences et prototypes de Georges Claude

- 22kW à Cuba en 1930
- Un autre démonstateur au Brésil en 1935



OTEC 1, Hawaii, 1MW



OTEC NELHA, Hawaii, 210 kW



Makai, Hawaii, 100 kW

1869

1928-1935

1980

1993

2015

1881

1973

1982

2000

2013

20??

D'Arsonval propose le cycle fermé fondé sur l'ammoniac



Mini-OTEC, Hawaii, 50 kW



Sagar Shakti, Inde, 1 MW



Tahiti, 5 MW



100 kW



NEMO, Martinique, 16 MW

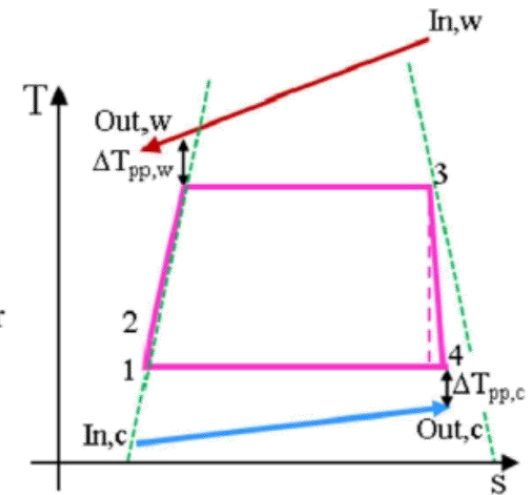
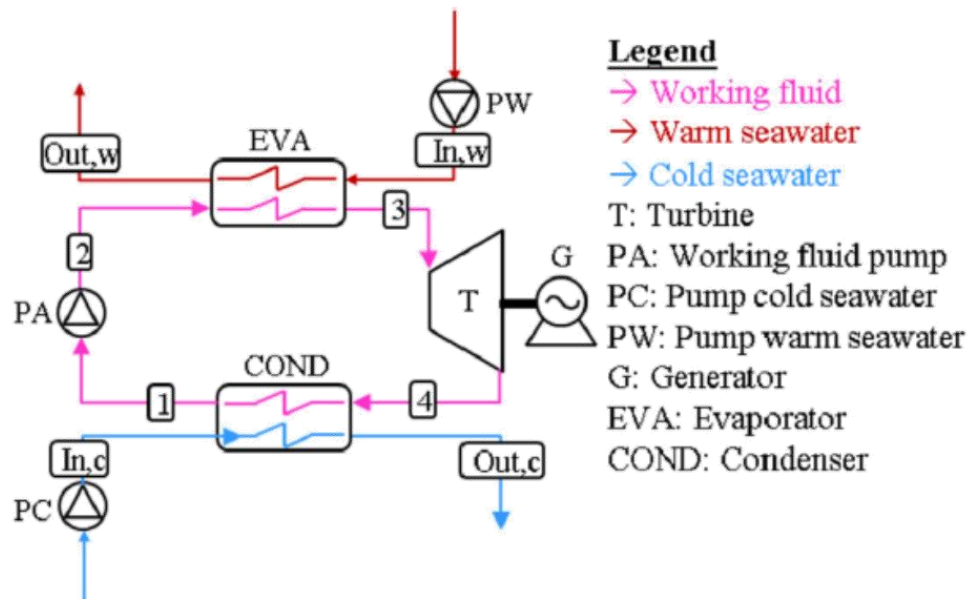


Verrou technologique: conduite d'eau froide (Longueur ~ km; Diamètre plusieurs mètres)

Principe

Cycle de Rankine fermé

Fluide de travail : ammoniac



$$\text{Rendement ? } \eta < 1 - \frac{T_c}{T_w} \approx 1 - \frac{273 + 5}{273 + 25} \approx 6.8\%$$

Exemple d'un dimensionnement

Longueur conduite eau froide : 3000 m (installation terrestre)

Diamètre conduite eau froide : 2.5 m

Table 3

CC-OTEC configuration maximizing γ parameter.

CC-OTEC performance			
$\dot{m}_{w,sw}$	8798 kg/s	$\dot{m}_{c,sw}$	8500 kg/s
$\Delta T_{w,sw}$	3.26 °C	$\Delta T_{c,sw}$	3.26 °C
$\Delta T_{pp,evap}$	2.84 °C	$\Delta T_{pp,cond}$	2.84 °C
$W_{el,turbine}$	3.936 MW	$W_{el,NH3,pump}$	58.9 kW
$\Delta P_{w,sw}$	0.458 bar	$\Delta P_{c,sw}$	1.004 bar
$W_{el,w,sw,pump}$	493.3 kW	$W_{el,c,sw,pump}$	1038.7 kW
$W_{el,net}$	2.345 MW	$\eta_{1st\ law}$	2.204%
$A_{hx,tot}$	14118 m ²	γ	0.167 kW/m ²

Estimation LCOE : 269 €/MWh

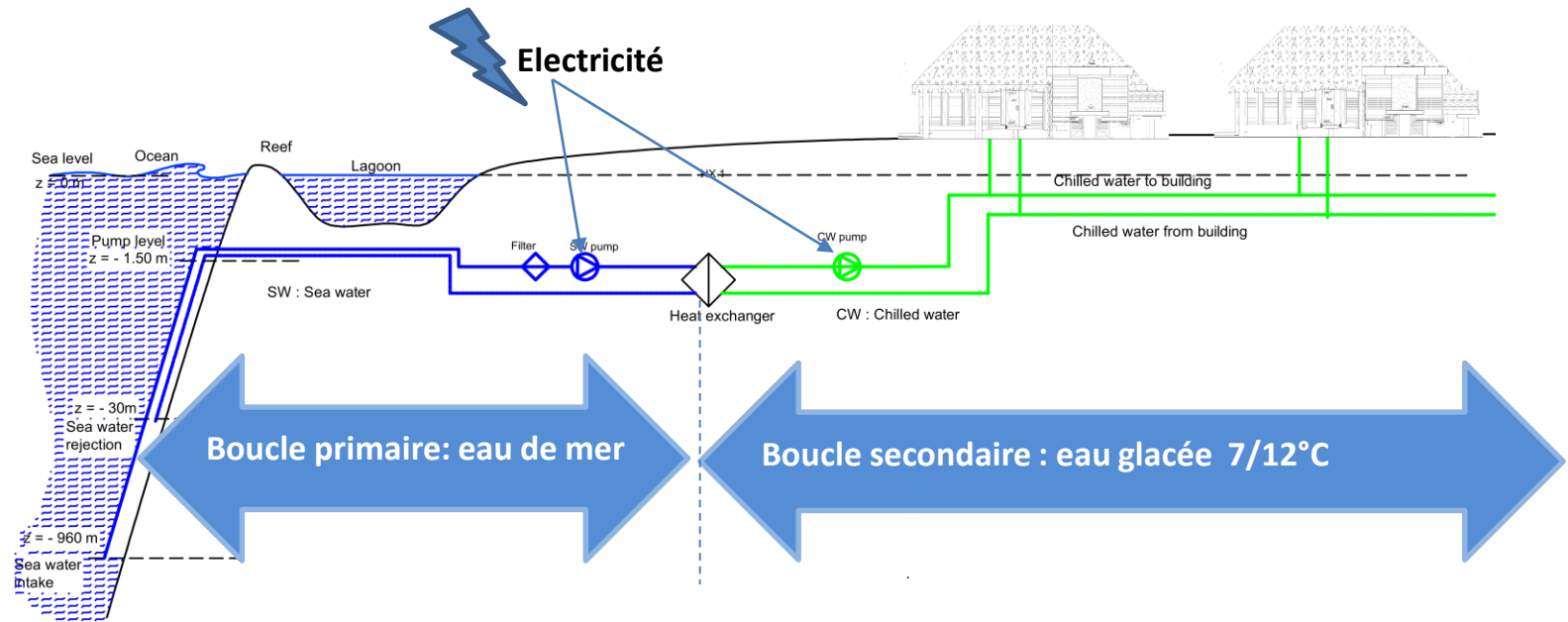
Table 9

Examples of averaged cost of electricity in islands.

Average cost of Electricity	
Location	Cost [USD/MWh _e]
Kiribati	570
Cabo Verde	410
Fiji	150
Solomon Islands	150
Nauru	>50% subsidies

Autre usage : Sea Water Air Conditioning (SWAC)

Principe



Autre usage : Sea Water Air Conditioning (SWAC)



Exemple : centre hospitalier de Papeete

Chiller → SWAC en 2022



Performances :

	Période de mesure	Température boucle de distrib.		Débit volumique distrib.	Puissance froid moyenne	Puissance élec moyenne	Puissance élec max	COP global moyen	Consommation électrique	Emissions de CO ₂
		In (°C)	Out (°C)							
		m ³ /h								
Chiller	01/01/22 au 07/07/22	10,5	7,5	863,8	2961,7	1024,9	1 367,6	2,9	8 966,0	4384,4
Swac	10/08/22 au 02/10/22	9,5	6,7	832,8	2750,2	106,0	140,0	25	911,9	445,9

/10
-2 M€+



Synthèse & défis

- Gisement significatif

Source disponible à la demande

- Plusieurs prototypes de puissance modérée ont déjà été réalisés

1 MW en 1980 à Hawaii

- Défis pour la grande puissance

Conduite eau froide de grandes dimensions (diamètre 10+ m, longueur 1 km)

~~Rendement énergétique~~ → coût

- Des marchés alternatifs à la production d'électricité

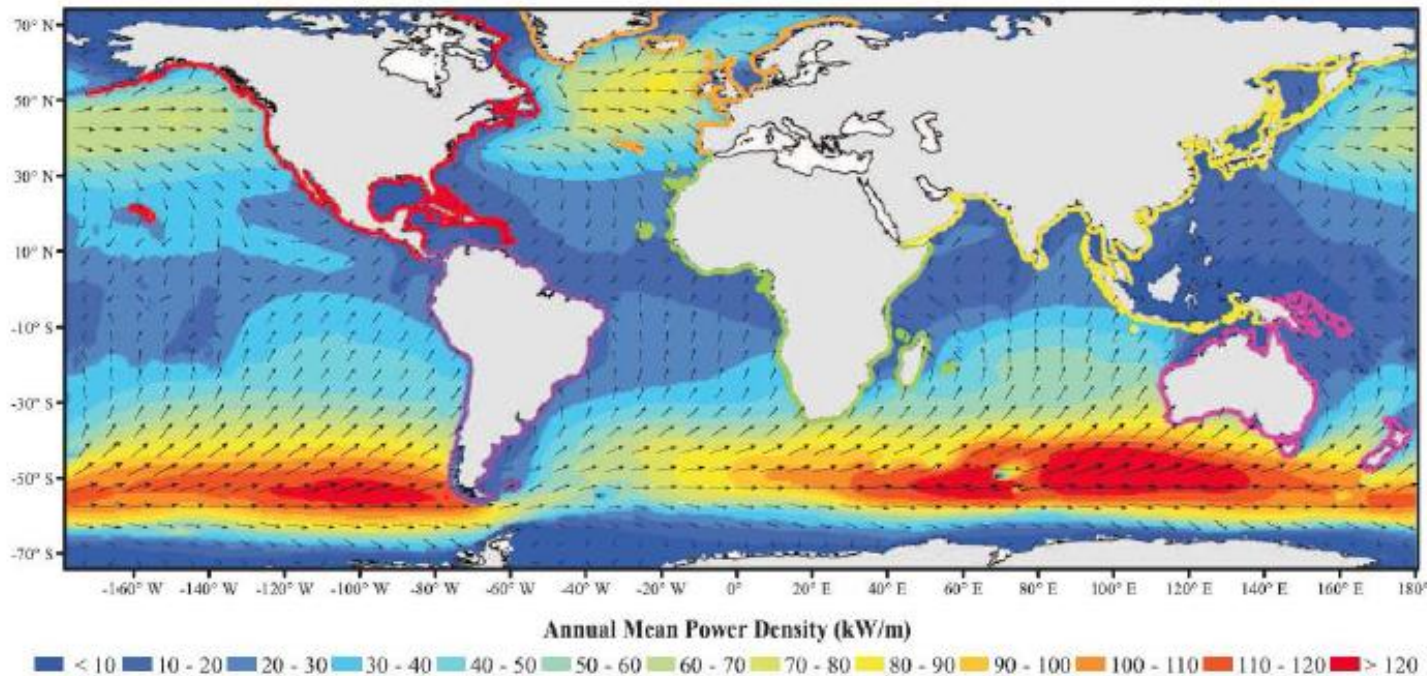
Climatisation, pisciculture, ...

Sommaire

1. Qui vous parle?
2. Rappels sur l'énergie
3. Contexte climatique et énergétique
4. Eolien en mer posé
5. Eolien en mer flottant
6. Energie thermique des mers
7. Energie des vagues
8. Energie des courants/marée
9. (Energie des gradients de salinité)

Cartographie de la ressource houlomotrice

Gisement global: 18 500 TWh/an (10% consommation mondiale)



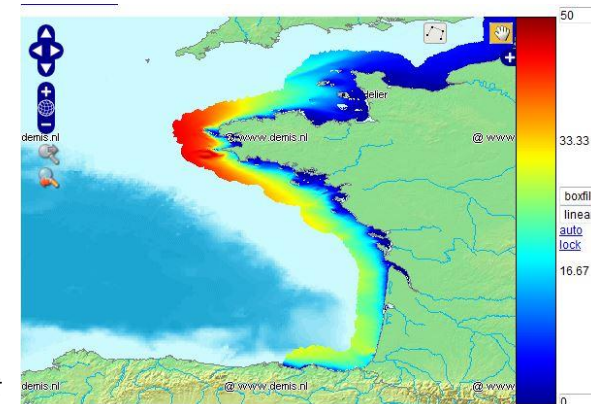
Cartographie mondiale de la ressource énergie des vagues. Source: [Gunn et al., 2012, RENE]

Gisement façade Atlantique française: ~18 GW

Consommation moyenne nationale en 2014: 50 GW

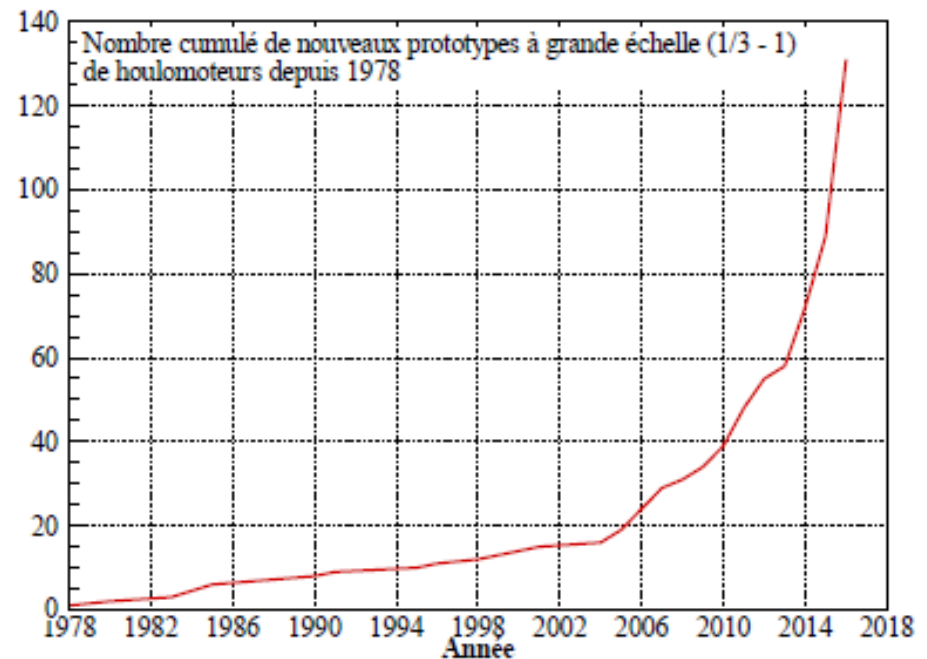
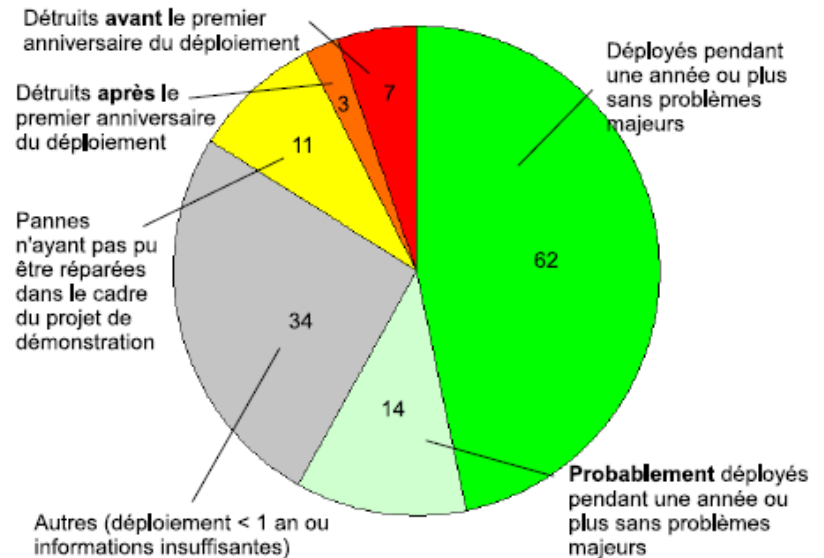
Production moyenne éolienne en 2014: 5.7GW

Cartographie de la ressource sur la côte Atlantique française. Données de la base de données HOMERE. Extraction via plateforme IREMARE par A.H. Clément



Historique

1799	Brevet Girard
1898 – 1910	Wave motor
1974	S. Salter (1974) Wave Power, Nature
1978	Cockerell's raft (UK)
1978-1979	Kaimeii (JP)
1985	Kvaerner's column & TAPCHAN (NO)
1990	Sakata (JP)
1991 – 1998	LIMPET (UK), Pico (PT), OSPREY (UK)
1998	Pelamis
2001 – 2014	La bulle de l'énergie des vagues
2017	Vers de nouveaux marchés? (sites isolés, désalinisation, hybrides)



Synthèse

- Gisement $\ll$ consommation mondiale
18 500 TWh, 10%
- Des milliers de brevets & plus de centaines de prototypes à grande échelles ont été testés de part le monde
- Un besoin de rupture car les coûts des fermes pilotes sont élevés (0.3 – 0.6 €/kWh¹)

Rupture technologique sur les procédés de conversion: plus performant – moins cher

Marchés alternatifs (hybrides, désalinisation, sites isolés)

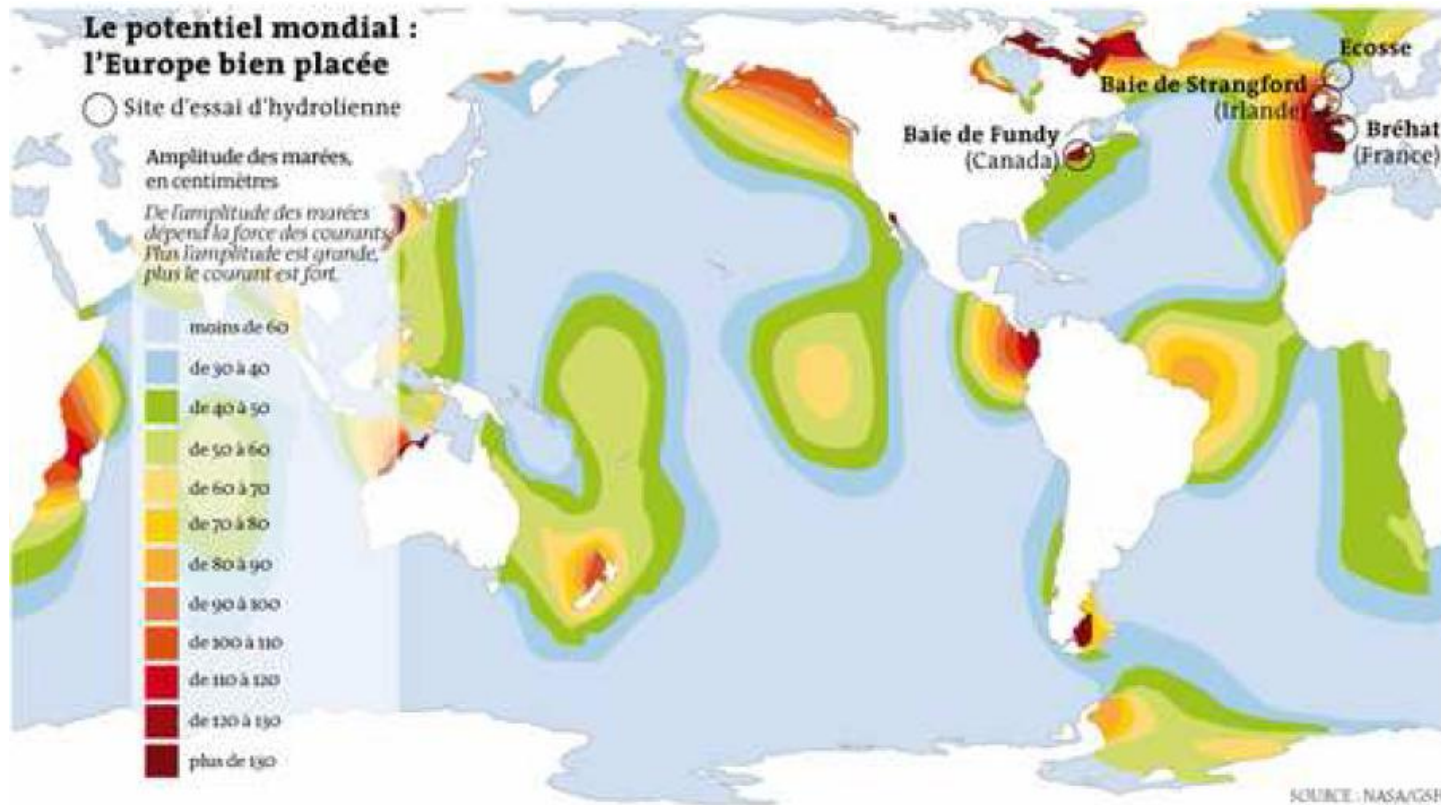
- Pour en savoir plus sur l'énergie des vagues:



Sommaire

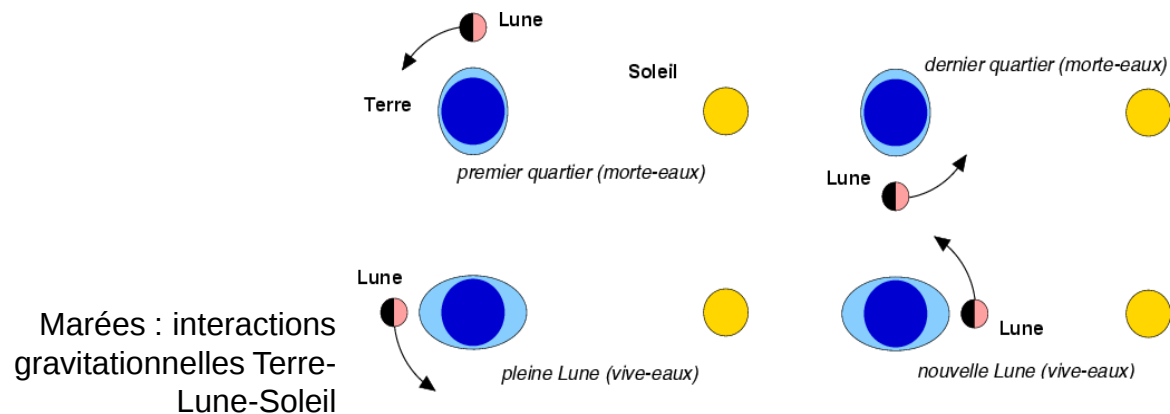
1. Qui vous parle?
2. Rappels sur l'énergie
3. Contexte climatique et énergétique
4. Eolien en mer posé
5. Eolien en mer flottant
6. Energie thermique des mers
7. Energie des vagues
8. Energie des courants/marée
9. (Energie des gradients de salinité)

Gisement

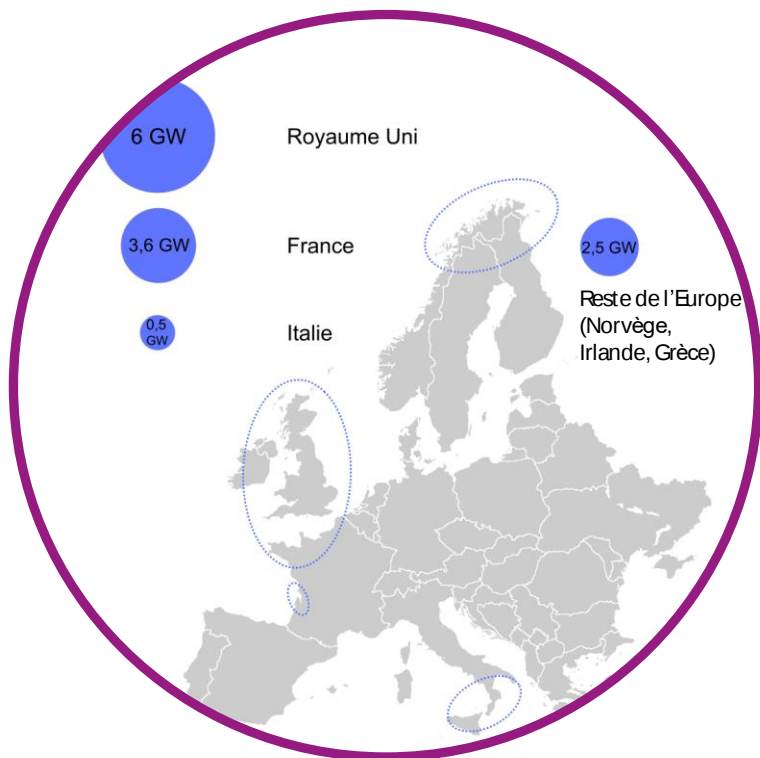


2 600 TWh/an

Variable, mais prédictible



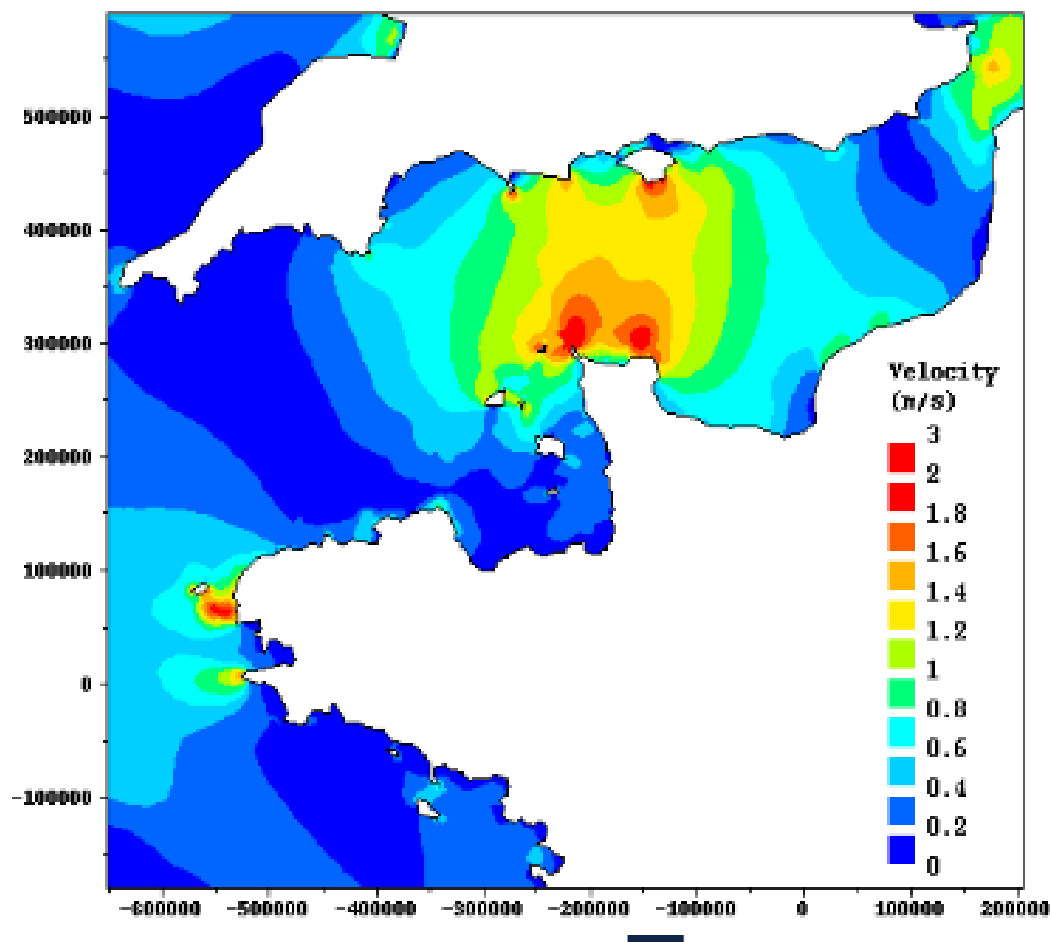
Gisement



Ressource en France: 5 GW

Raz Blanchard: 3-4 GW

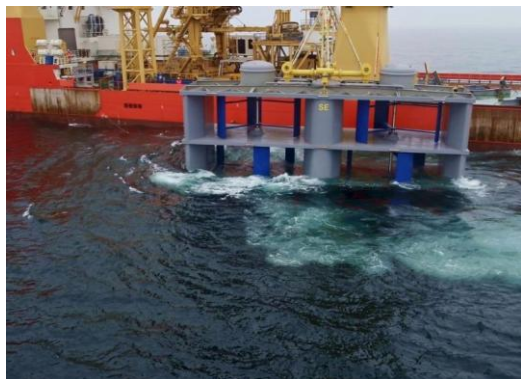
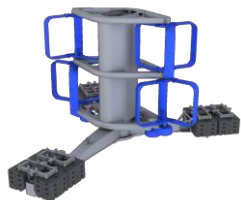
Fromveur : <1 GW



Technologies



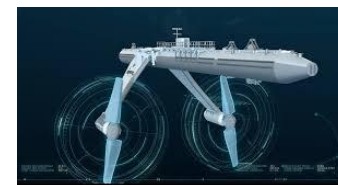
Atlantis AR1500
1.5 MW / 18m



Hydroquest
2.5 MW



Orbital O2
2x1 MW / 20m



Minesto
1.2 MW / 12m



Un peu d'histoire



Le moulin à marée du Birlot sur l'île de Bréhat, en France.

Moulins à marée dès le moyen-âge

Usine marémotrice de la Rance
inaugurée en 1966
240 MWc (254 MWc en 2013 en
Corée du Sud)



Projets en Europe



SeaGen

Irlande du Nord
16 m; 2x600 kW @ 2,3 knts



OpenHydro

Ecosse, Paimpol-Bréhat (2011-2012)
13 m; 2 MW



Sabella (2015)

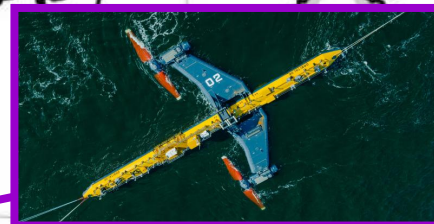
Fromveur
250 kW / 10m



MeyGen (2016)

Ecosse

1x1,5 MW Andritz-Hydro
3x1,5 MW Atlantis

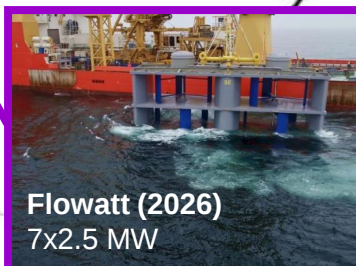


Océade

Ecosse (2013)

18 m; 1,4 MW

NEPTHYD → 4 x 1,4 MW au Raz Blanchard

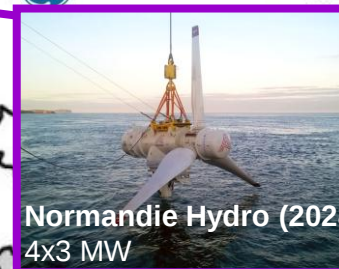


Flowatt (2026)

7x2,5 MW



GE Renewable Energy



Normandie Hydro (2028)

4x3 MW

Synthèse

- Gisement $\ll$ consommation mondiale
- Des prototypes et des fermes pré-commerciales
- Un besoin de rupture car les coûts sont très élevés (0.2 – 0.45 €/kWh)



MERCI POUR VOTRE ATTENTION

