

# Chronique de l'éolien moderne



**Marc Rapin**

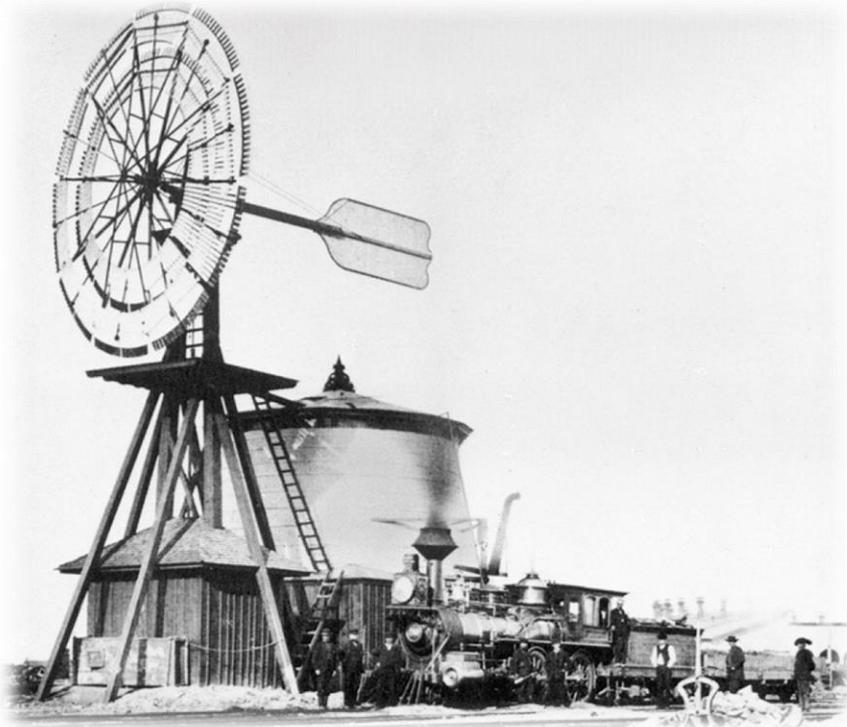
***Cherbourg, le 16 novembre***



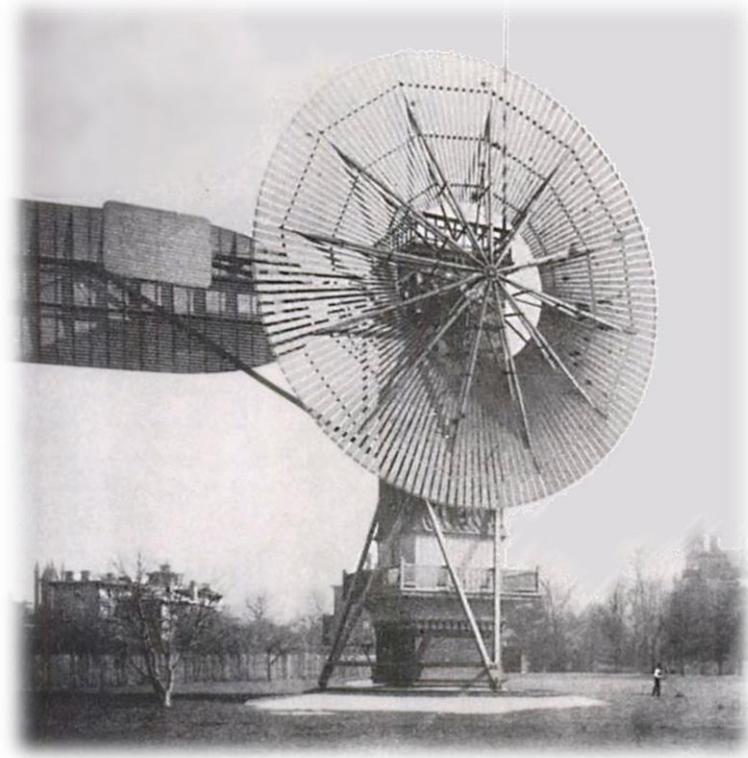
*Clitourps (50)*



Fin du 19<sup>ème</sup> siècle: **multipale!**



**Pompage de l'eau**  
**moulins américains**



**Electricité!**  
**C. Brush, 17m diam., 12kW, Cleveland 1888**

☞ **1893: Normandie! Duc de Feltre, Phare de la Hève**

## Début du 20<sup>ème</sup> siècle: **aéronautique!**



**Laboratoire Eiffel**  
**Ailes, Hélices, pales...**



**1922**  
**Sigurd Savonius**



**Laboratoire Göttingen**  
**Albert Betz - Théorie**



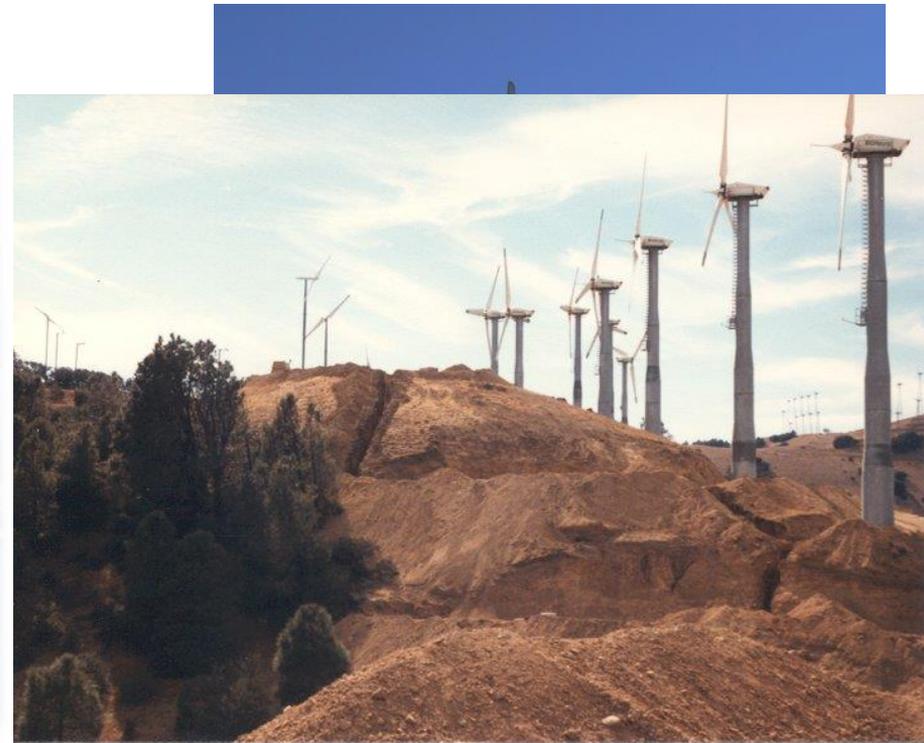
**G. Darrieus**  
**1925 Brevet Axe vertical**

**1973: 1<sup>er</sup> Choc Pétrolier**

**1981: Energy Act américain**



*Micon 55 kW*



*Début*

*Fin*



*Bonus 30kW*

*Vestas V25 : 200 kW*

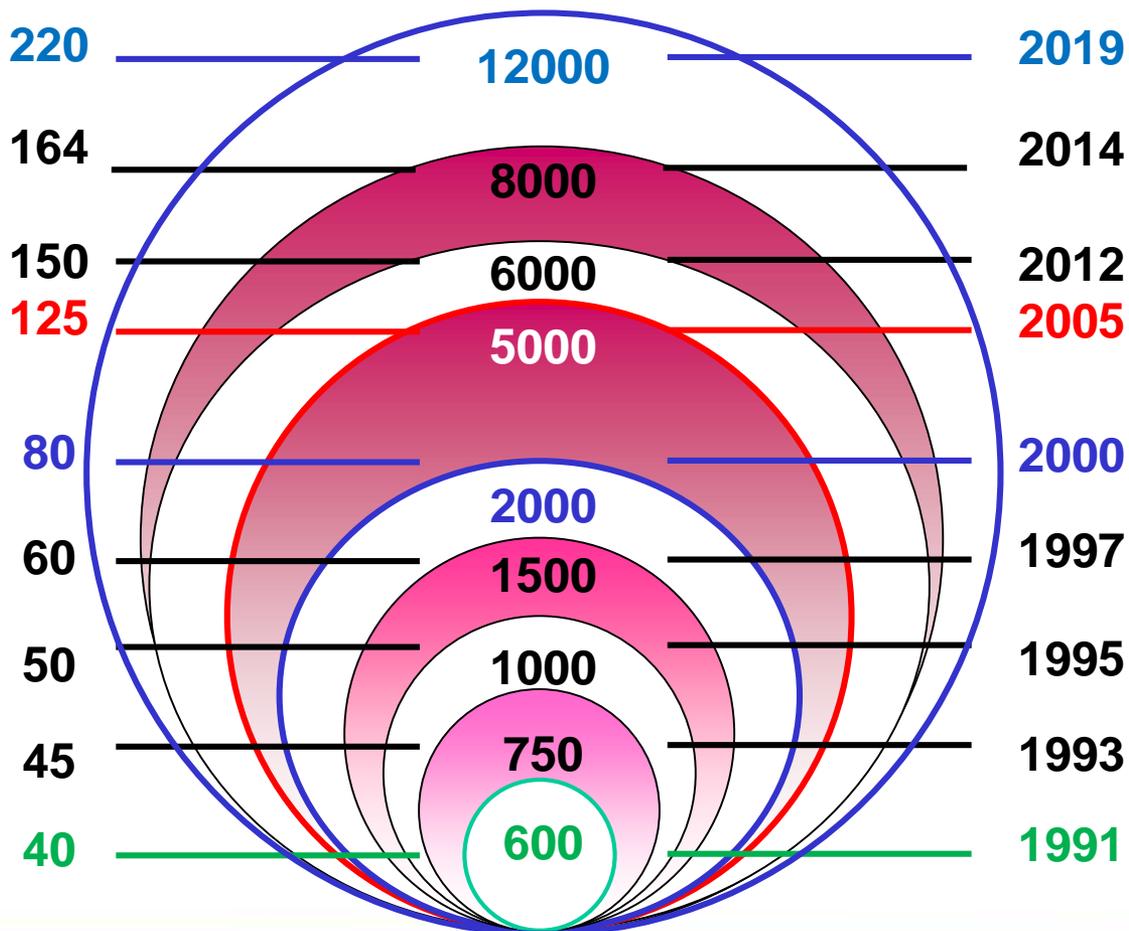
**☞ “California Rush” : 15 000 Eoliennes = 1,7 GW**

# Chronique de l'éolien moderne

Diamètre  
(m)

Puissance  
(kW)

Prototype



**Industrie Jeune!**

*offshore*

☞ *Standard 2022*

☞ *Standard actuel*

☞ *Standard AAP 2011 Fr*

☞ *1er gros proto*

☞ *Standard onshore*



Airbus A380  
80 mètres

# Chronique de l'éolien moderne



Éolienne 5 mégawatts :  
170 mètres



☞ *Standard onshore*



Statue de la liberté :  
93 mètres

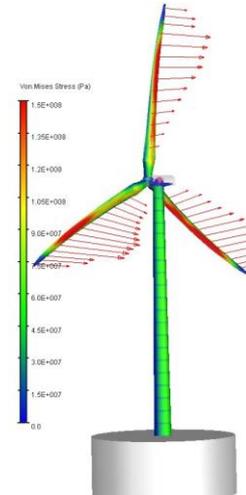
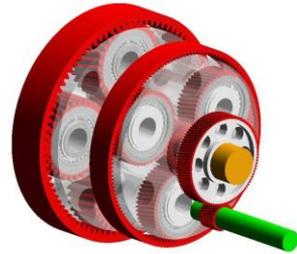


Airbus A380  
80 mètres

# Conception des éoliennes: **ENJEUX**

## Challenge multi-disciplinaire

- Mécanique: transmission de puissance, vibrations...
- Matériaux : acier, composites, béton...
- Génie civil : fondations, géotechnique, sols...
- Electrotechnique: génératrice, électronique de puissance, raccordement réseau...
- Aérodynamique / Aéro-élasticité / Acoustique
- Automatique et contrôle
- ICT : **c**  nications, transmission de données
- etc



**Approche SYSTEME**  
avec plus de 8000 éléments...

**Fiabilité**

**Efficacité**

**Coûts**



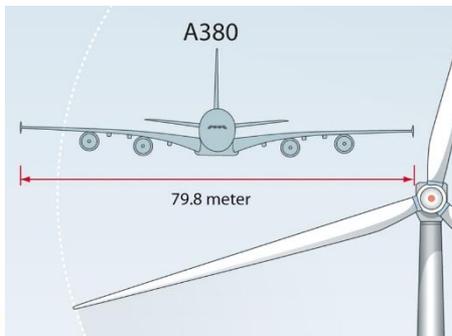
**Siemens SWT 6 MW - 120 m  
- 154 m (juin 2012)**



**Attaque directe**

**GE-Alstom Haliade 150 – 6 MW**

**Proto: St Nazaire (mars 2012) - Belwind (2013)**



**2016  
Block Island  
5x6 MW**

PMG 150 t  
Ø 7.6 m



# Evolution des éoliennes Offshore

*MHI Vestas V164 8MW (2014)*

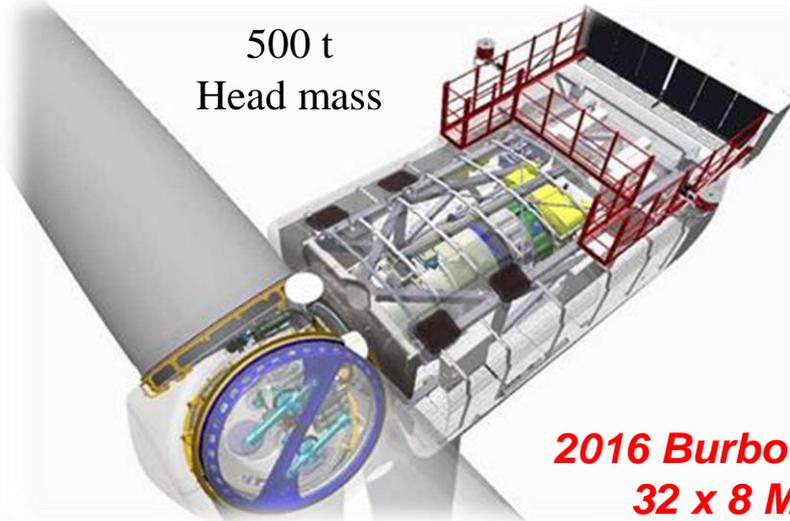


*Multiplicateur*

*Adwen AD8-180 (2016)*



500 t  
Head mass

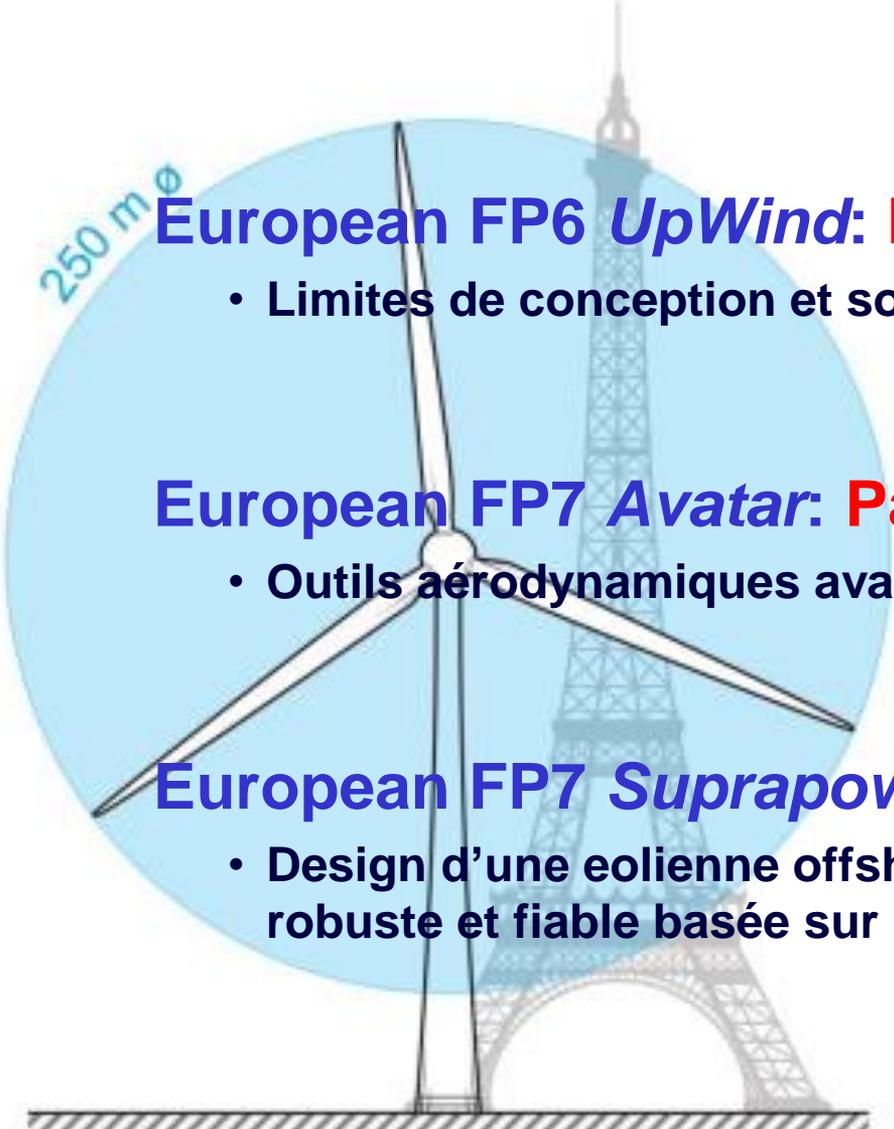


*2016 Burbo Bank  
32 x 8 MW*



Winergy 8MW - 86t - C = 10 000 kNm

# Evolution des éoliennes offshore: **puissance**



**European FP6 *UpWind*: Machine 20 MW**

- Limites de conception et solutions pour très grandes éoliennes

[www.upwind.eu](http://www.upwind.eu)

**European FP7 *Avatar*: Pale 10-20 MW**

- Outils aérodynamiques avancés pour très grands rotors

**European FP7 *Suprapower* : Génératrice 10 MW**

- Design d'une éolienne offshore innovante classe 10 MW, légère, robuste et fiable basée sur une génératrice supraconductrice

# Enjeux des éoliennes offshore: **coûts**

## CAPEX

*Coûts de développement,  
construction et installation:  
Offshore: 2000 - 5000 €/kW*

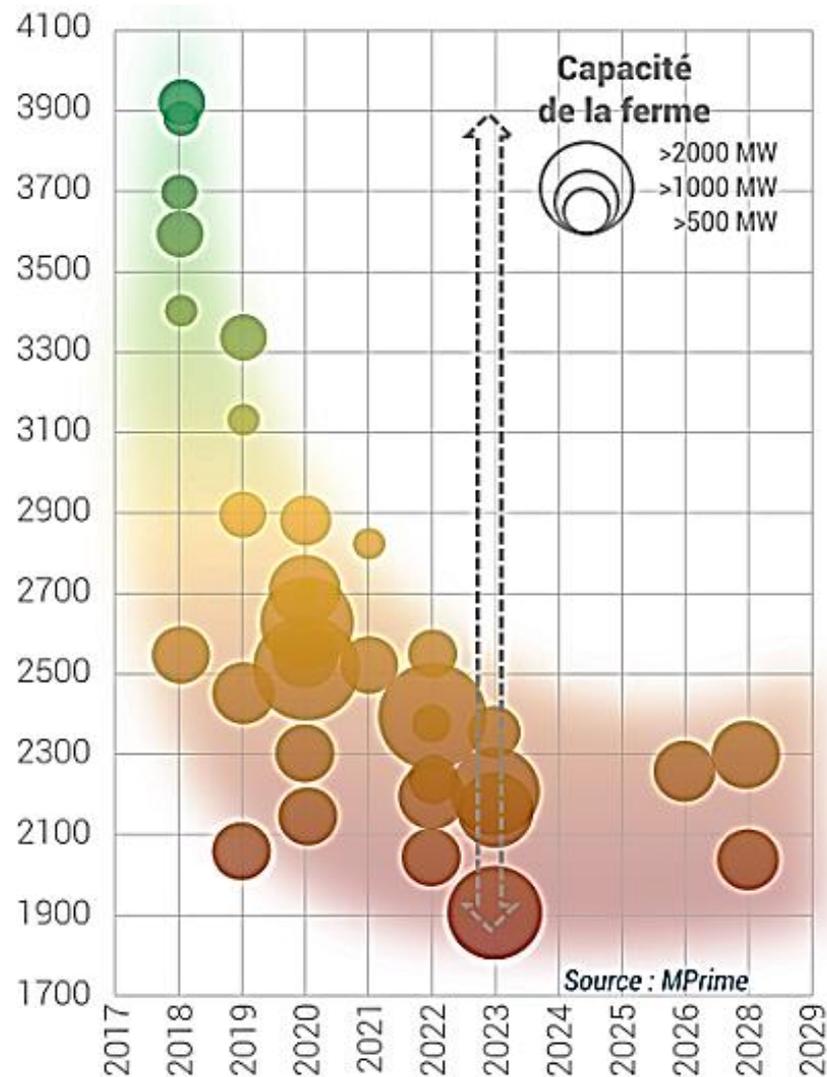
Turbine = 40% CAPEX en offshore

Augmentation des coûts:

- Eolienne
- Raccordement
- Installation / fondation

👉 **Intérêt de :**

- **Machines plus puissantes**
- **Très grand parc**



# Enjeux des éoliennes offshore: **coûts**

## **CAPEX**

*Coûts de développement,  
construction et installation:  
Offshore: 2000 - 5000 €/kW*



## **OPEX = coûts O&M**

€ 100 à 300000 /année/turbine  
????



## **LCOE**

*Levelized Cost Of Energy*  
coût total par MWh produit

EU 2010: 156 €/MWh  
EU 2018: 134 €/MWh

**👉 LCOE < 50€/MWh en 2025  
Offshore en Europe  
Avec machines de 12-15 MW**



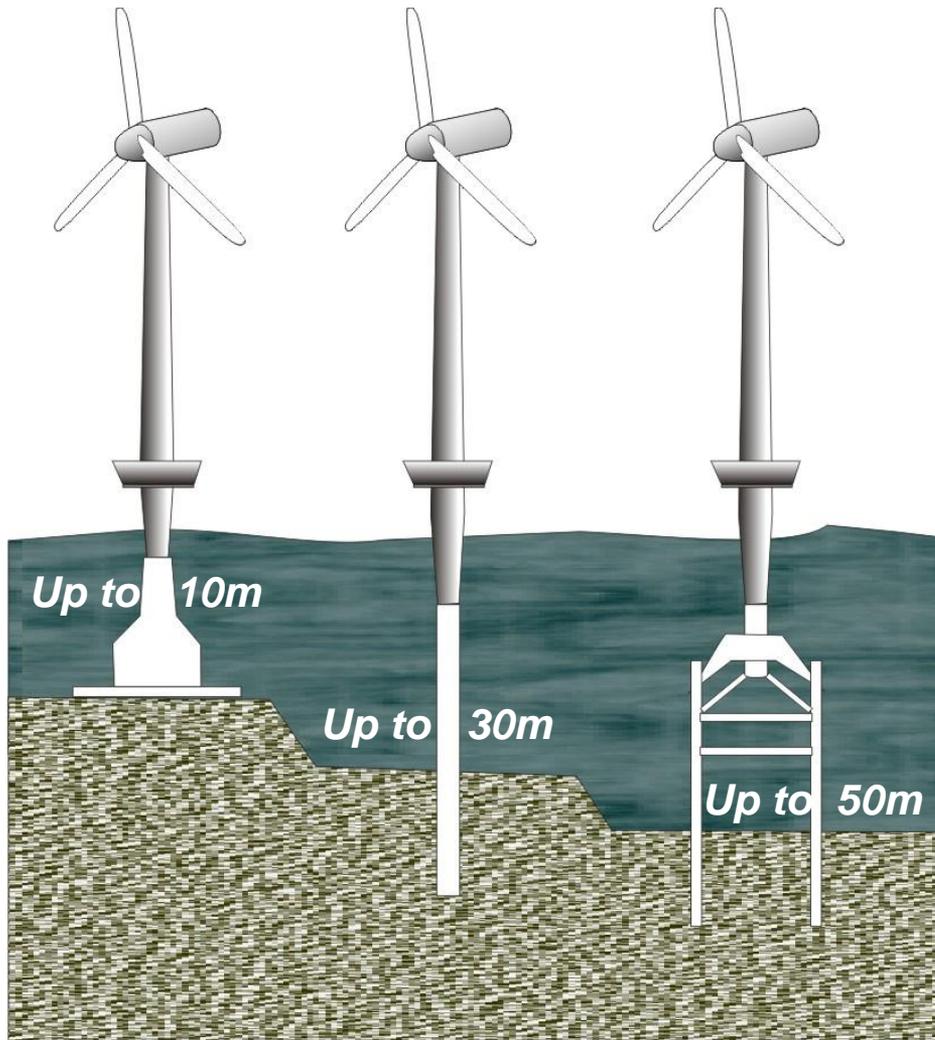
*GE Haliade X 12 MW (2021)  
Nacelle à Montoir : 21 x 10 m 700t*

# Merci de votre Attention



# Backup

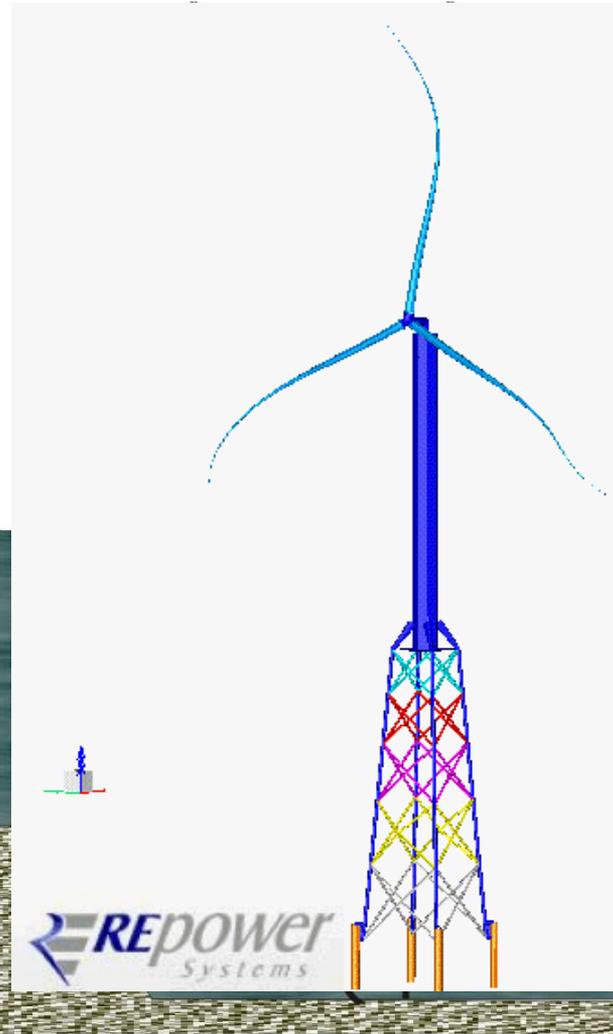
# Enjeux des éoliennes Offshore : Fondations



Gravity

Monopile

Quadri/Tripode



## Influences

Wind

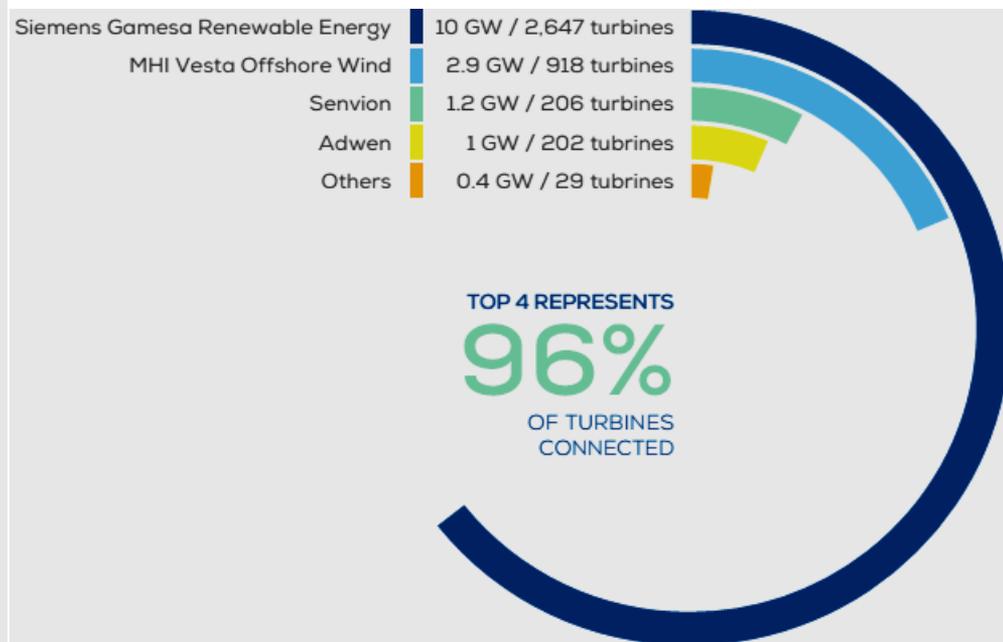
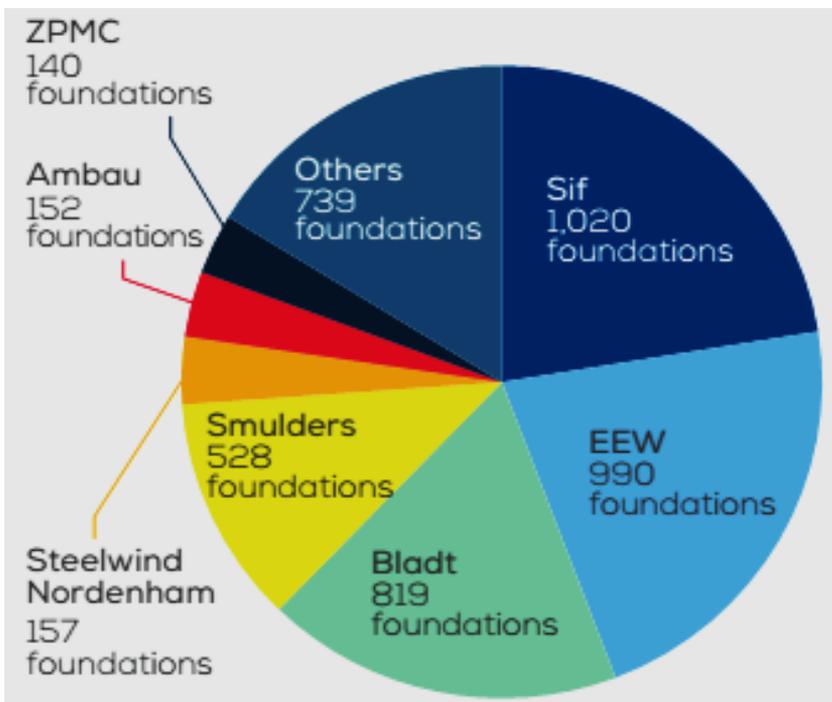
Waves

Marine  
Currents

Seabed

# Enjeux des éoliennes Offshore

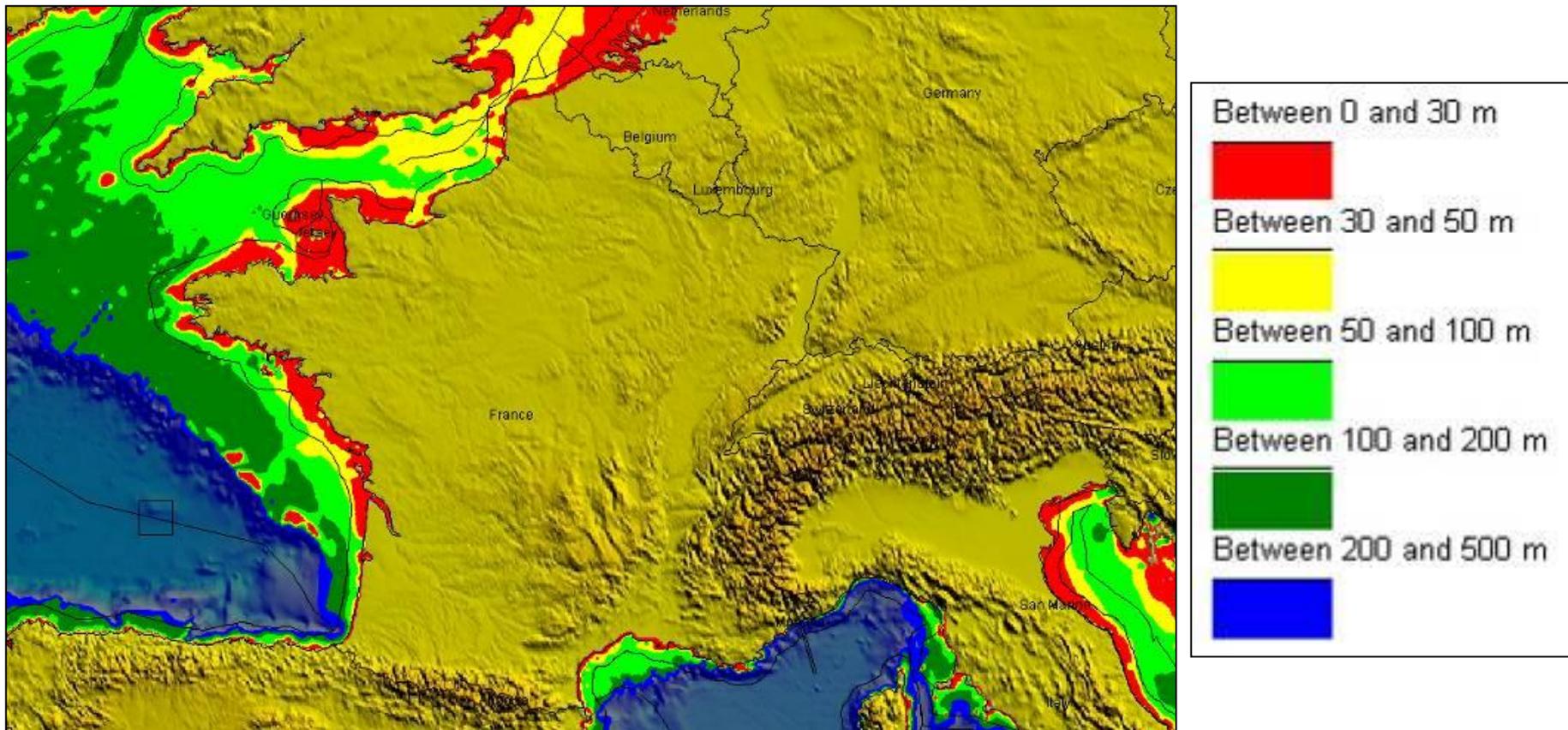
## European Leadership



Source: WindEurope

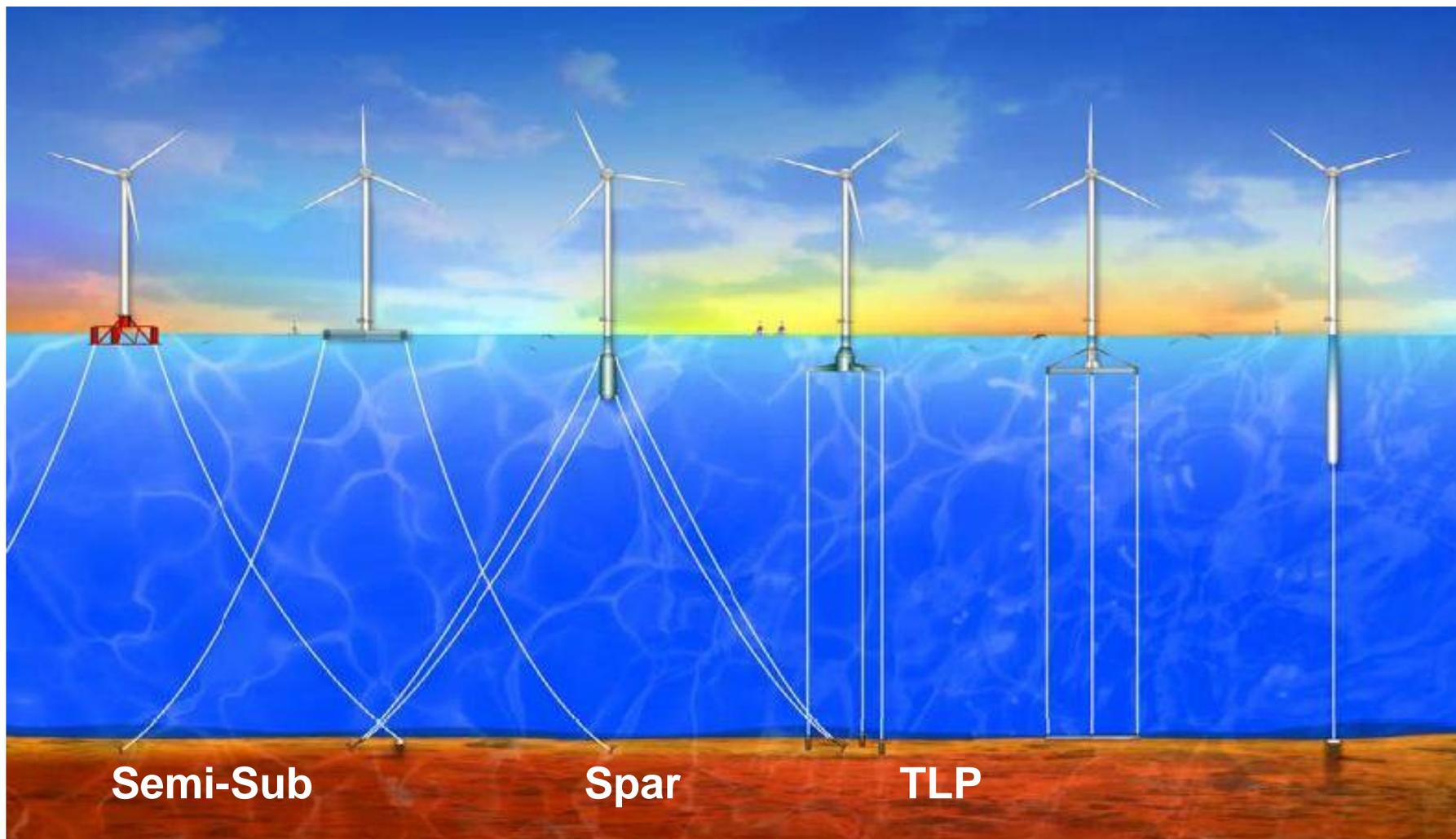
# Enjeux des éoliennes Offshore : profondeur

Objectif: utiliser de grands espaces marins à profondeurs > 50 m



# Enjeux des éoliennes Offshore : profondeur

## Concepts Flottants



# Enjeux des éoliennes Offshore flottantes: maîtrise

Plus complexe!

- Connaissances Offshore

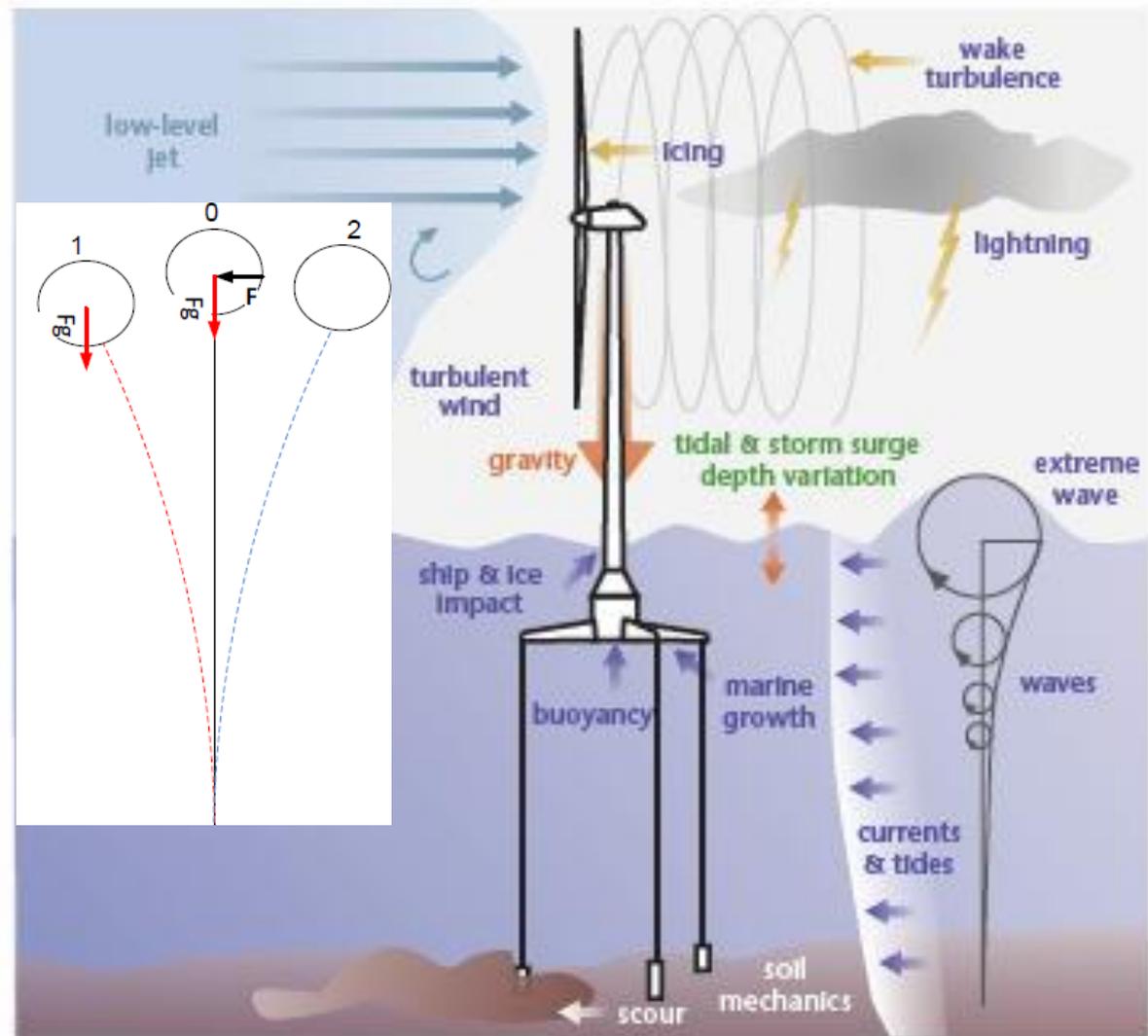
- Nouveaux Outils de Design, sites test

- **Charges et Moments !**

- **Lignes ancrages**

- **Cables flottants**

- **etc**



# Evolution des éoliennes Offshore Flottantes

**Statoil  
Sept 2009**

**Siemens  
2.3 MW**

**Technip  
Spar 100+17 m  
Ø 8.3 m  
1600 t**

**Depth = 220 m, Åmøy Fjord, Norway**



**2017 Hywind Farm: 5x6MW, Scotland, Depth 100m**

**Windfloat  
January 2012 - July 2016**

**Vestas  
V80 -2 MW**

**Semi-Submersible  
Depth = 45 m,  
Aguçadoura, Portugal**



# Evolution des éoliennes Offshore Flottantes

## *Fukushima Project*



**Mitsubishi 7MW**  
**oil pressure**  
**drive-type**  
**2015**

**Hitachi 2MW**  
**Downwind**  
**Nov 2013**

**Hitachi 5MW**  
**Downwind**  
**Sept 2016**



Substation



4 Colum Semi Sub



Advanced Spar



3 Colum Semi Sub

# Evolution des éoliennes Offshore Flottantes: France

## Investissements Avenir - AAP Fermes Pilotes flottantes - 08/2015

### **Groix**

*EOLFI, CGN,  
Naval Group,  
Vinci  
4 x 6 MW GE*



### **Faraman**

*EDF-EN, IFP-EN  
SBM  
3 x 8 MW Siemens*



### **Gruissan**

*Quadran, Ideol,  
Bouygues TP  
4 x 6.2 MW Senvion*



### **Leucate**

*Engie, EDPR  
Principle Power  
CDP, Eiffage Metal  
4 x 6 MW GE*



# Enjeux des éoliennes terrestres: **production**

## **CAPEX**

*costs for development,  
construction and installation:*  
Terrestre: 1000-1500 €/kW

## **OPEX = O&M costs**

Terrestre €45,000/année/  
turbine  
= 20%–25% of the **LCOE**

## **LCOE**

**Levelized Cost Of Energy**  
total cost per MWh produced

Turbine = 65% CAPEX en terrestre

## European Auctions €/MWh **Onshore**

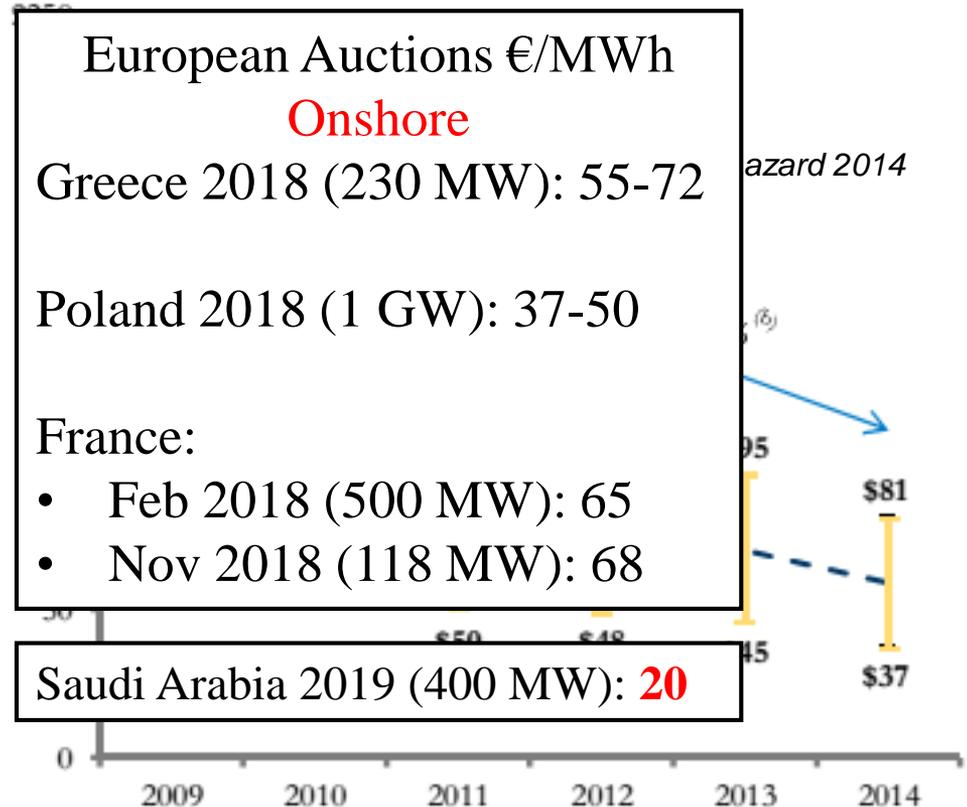
Greece 2018 (230 MW): 55-72

Poland 2018 (1 GW): 37-50

France:

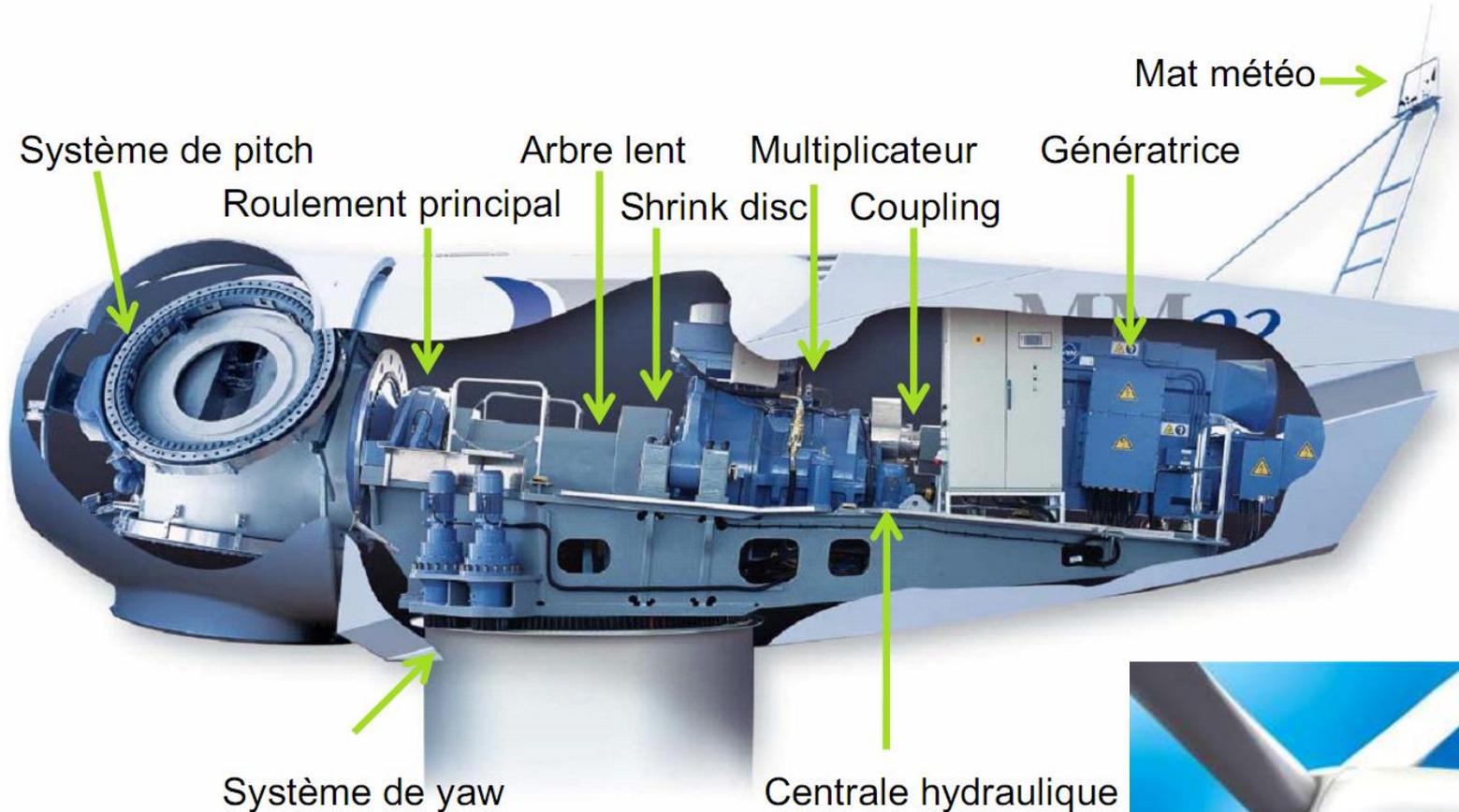
- Feb 2018 (500 MW): 65
- Nov 2018 (118 MW): 68

Saudi Arabia 2019 (400 MW): **20**



👉 **LCOE < 50€/MWh pour le Terrestre en 2020 en Europe**

# Evolution des éoliennes: **concept danois**



## **Gear Drive = boîte de vitesse 3 étages**

- Rotation du rotor: 9 - 19 Tour/mn
- **Génératrice asynchrone 1000-1500 tpm**



# Evolution des éoliennes: allemand Enercon

## Attaque Directe

- Rotation du rotor: 9 - 19 Tour/mn
- **Génératrice synchrone annulaire**



*E48 750kW - démarrage*



**1995: E40 500 kW**



**2009  
E126 6 - 7.5 MW  
Stator Ø 12 m  
Terrestre**

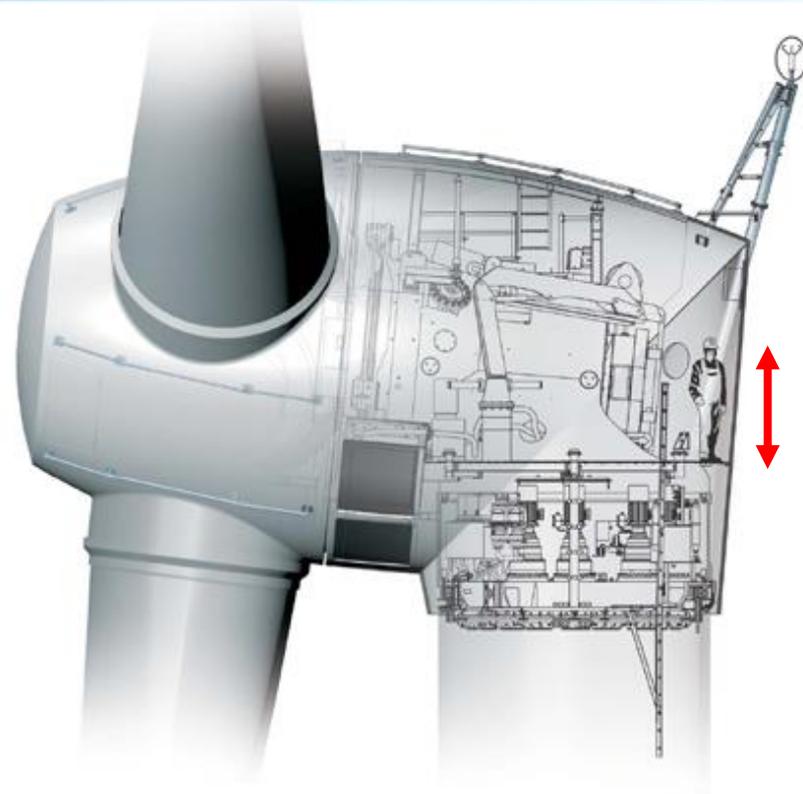
# Evolution des éoliennes

## Attaque Directe et hybride

- **Génératrice à aimants permanents**



2010 - **Siemens** SWT 3 MW - 101 m



2005 - **AREVA**  
Multibrid 5 MW