

Chronique de l'éolien moderne



Marc Rapin

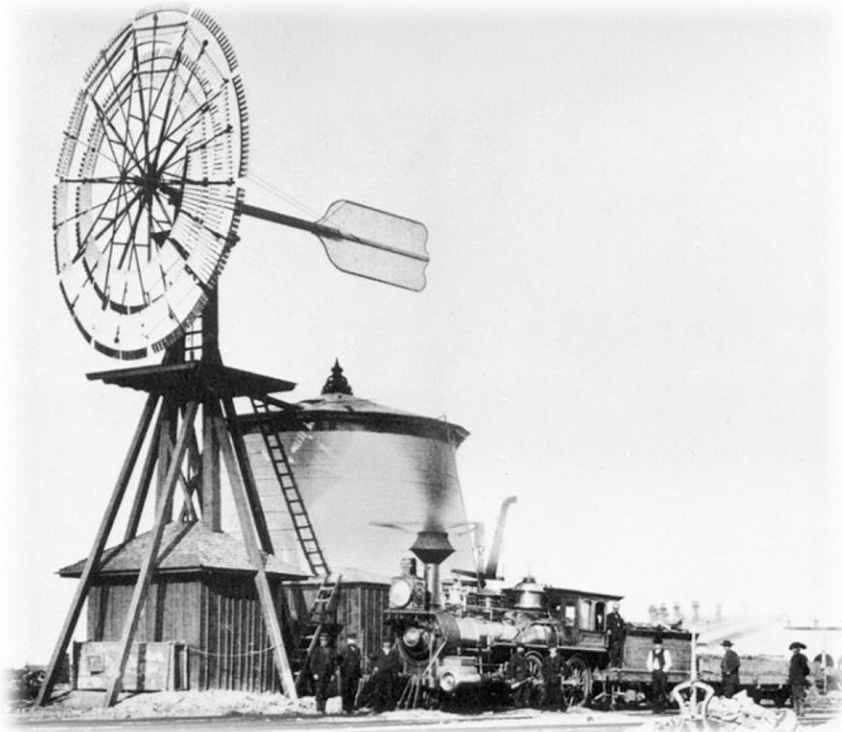
Cherbourg, le 16 novembre



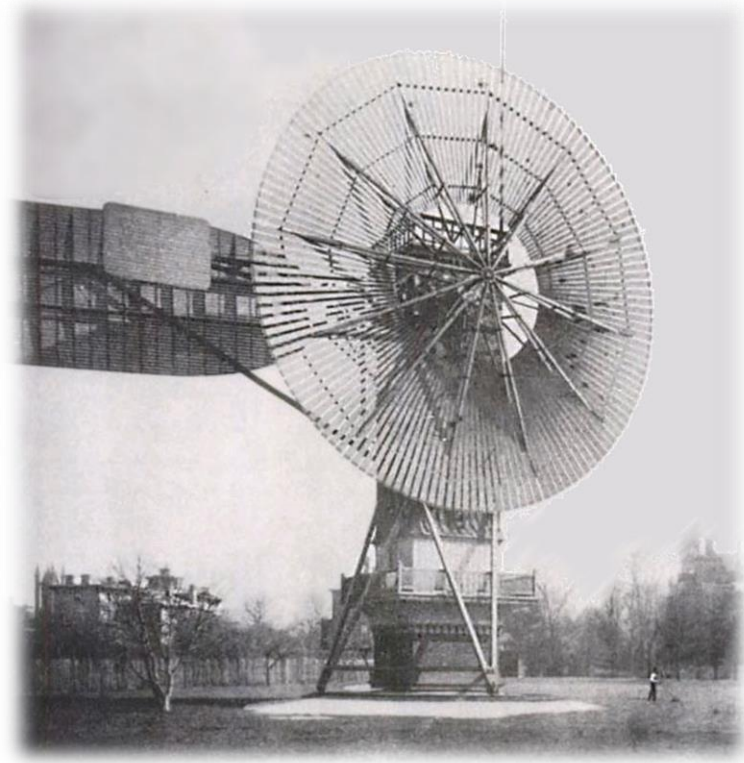
Clitourps (50)



Fin du 19^{ème} siècle: **multipale!**



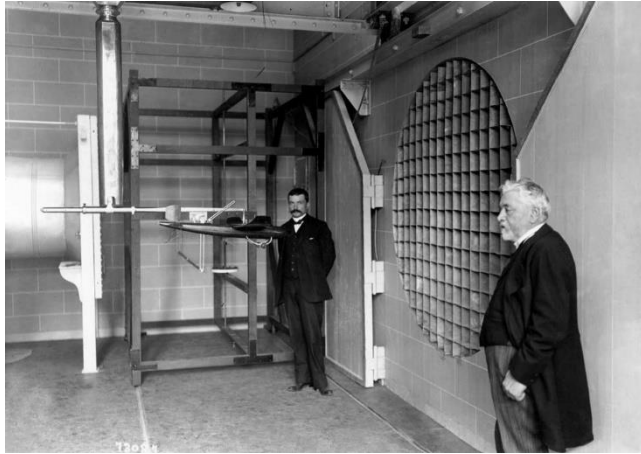
Pompage de l'eau
moulins américains



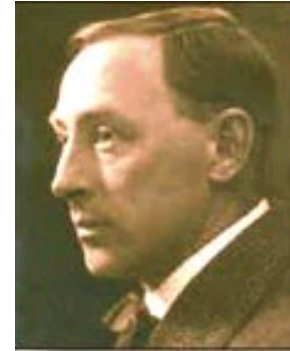
Electricité!
C. Brush, 17m diam., 12kW, Cleveland 1888

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

Début du 20^{ème} siècle: **aéronautique!**



Laboratoire Eiffel
Ailes, Hélices, pales...



1922
Sigurd Savonius



Laboratoire Göttingen
Albert Betz - Théorie



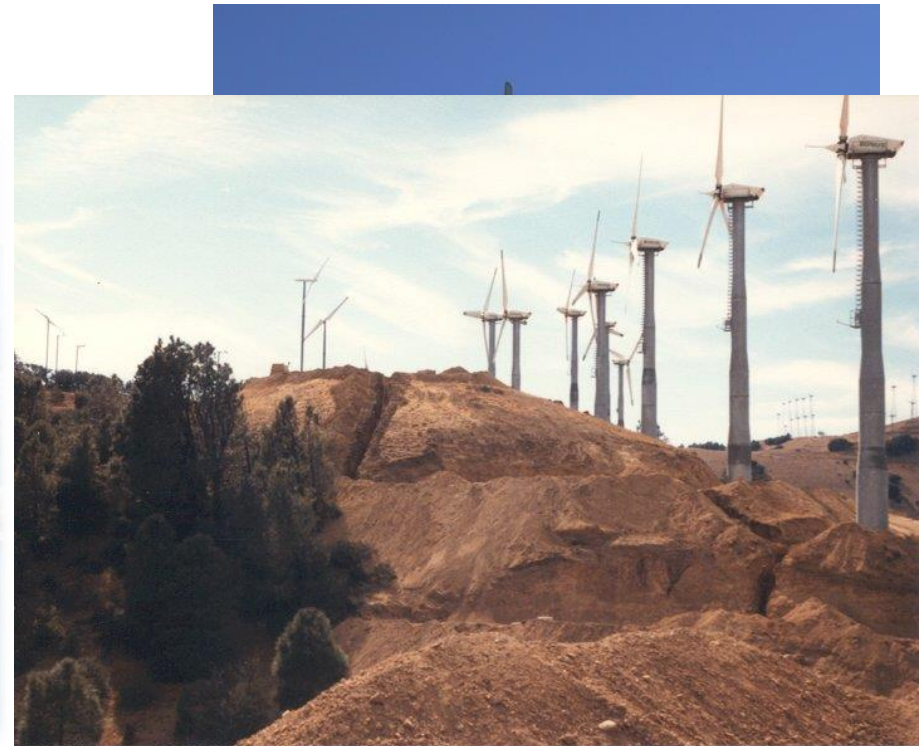
G. Darrieus
1925 Brevet Axe vertical

1973: 1^{er} Choc Pétrolier

1981: Energy Act américain



Micon 55 kW



Début

Fin



Bonus 30kW

Vestas V25 : 200 kW

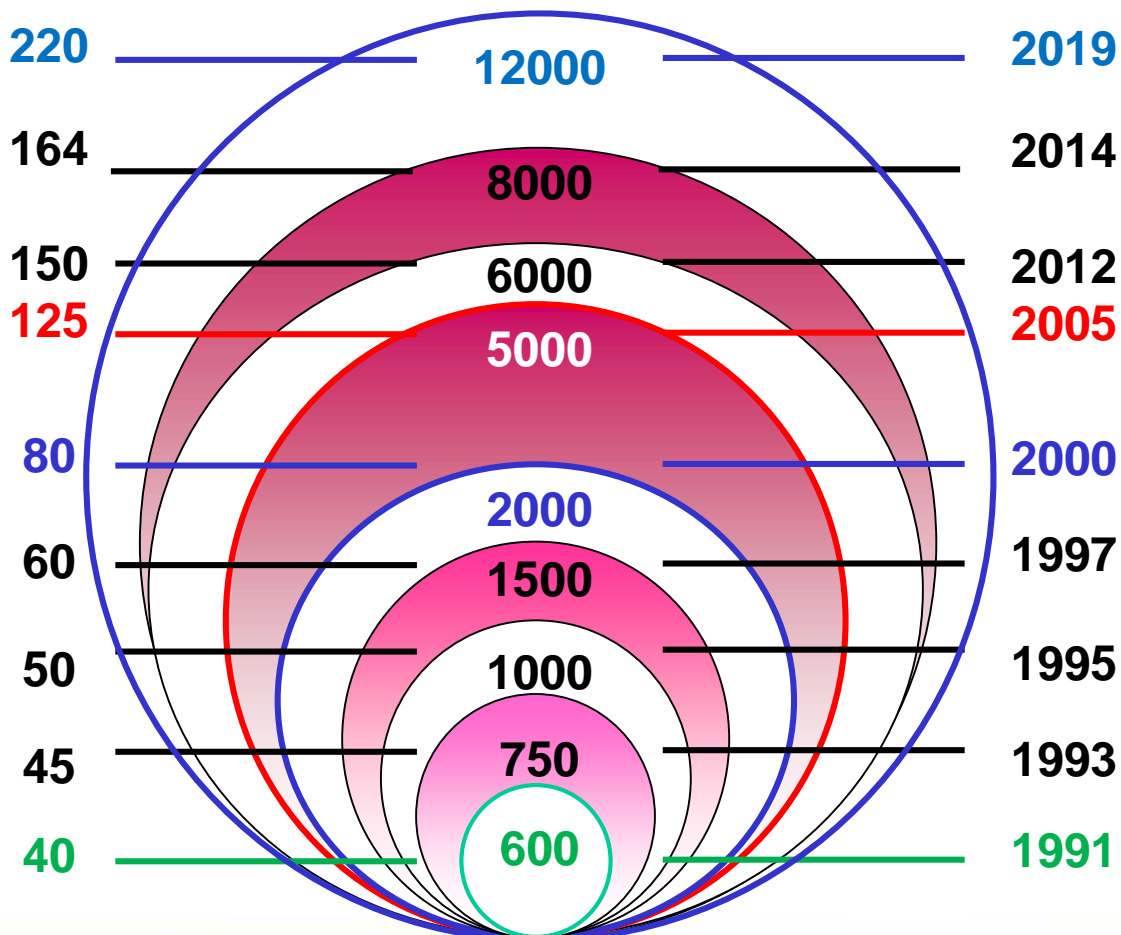
☞ “California Rush” : 15 000 Eoliennes = 1,7 GW

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

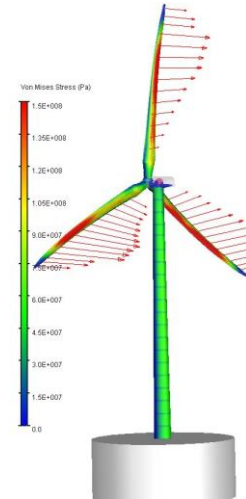
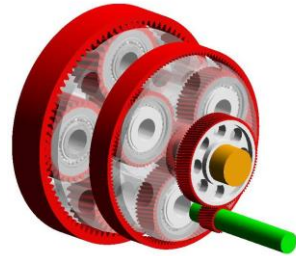


Airbus A380
80 mètres

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



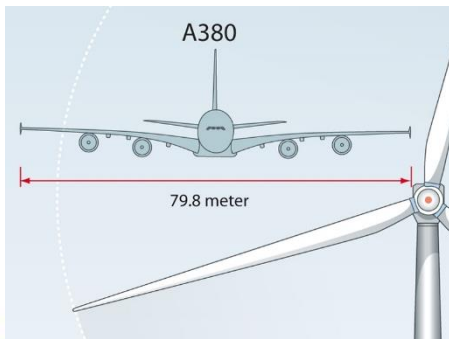
**Siemens SWT 6 MW - 120 m
- 154 m (juin 2012)**



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)

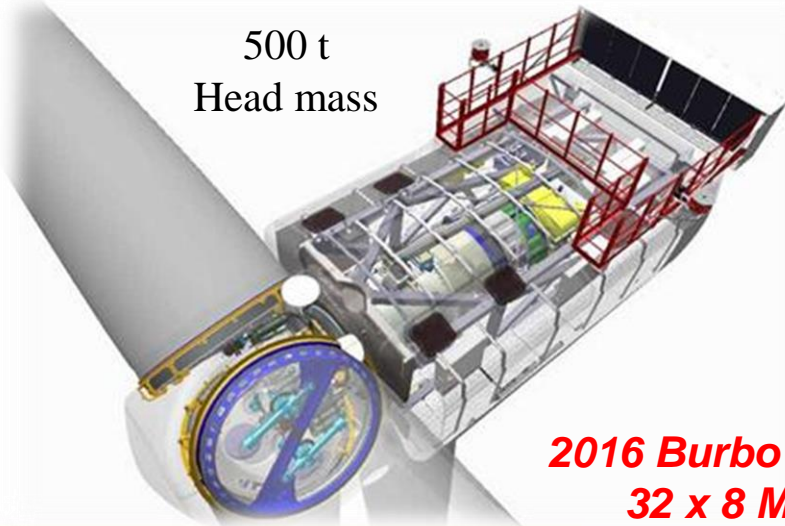


Multiplicateur

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

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*

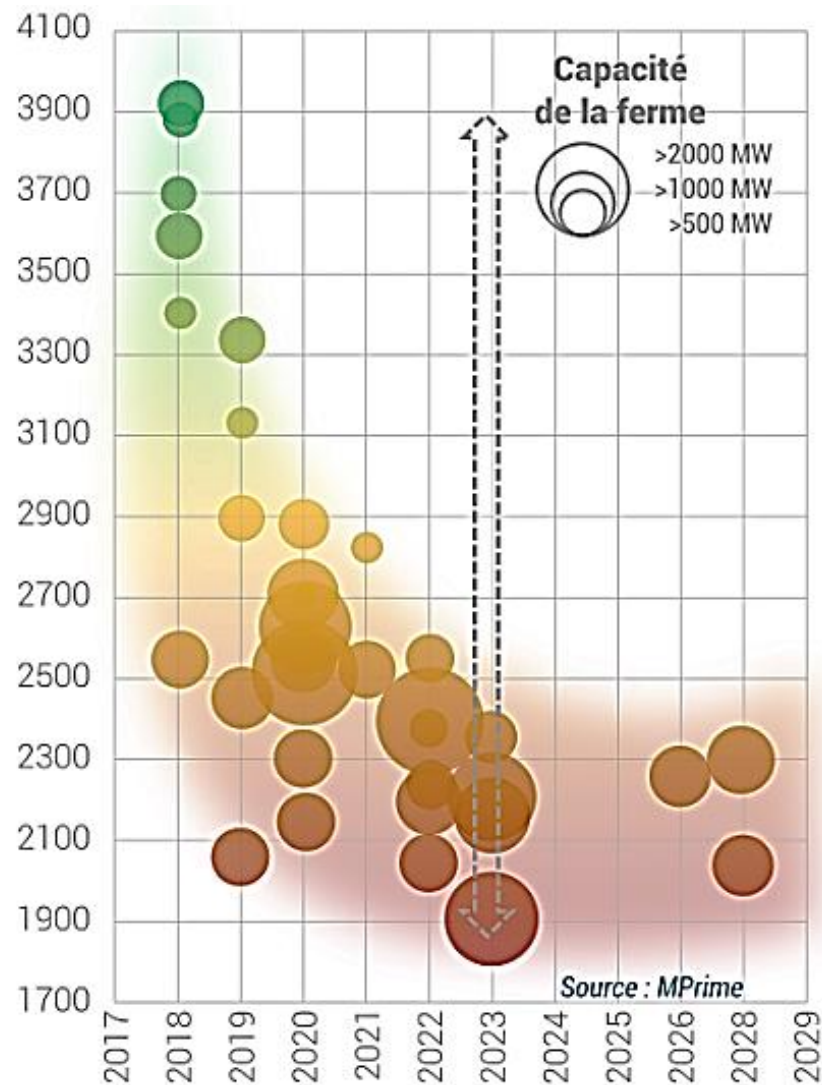
Turbine = 40% CAPEX en offshore

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**



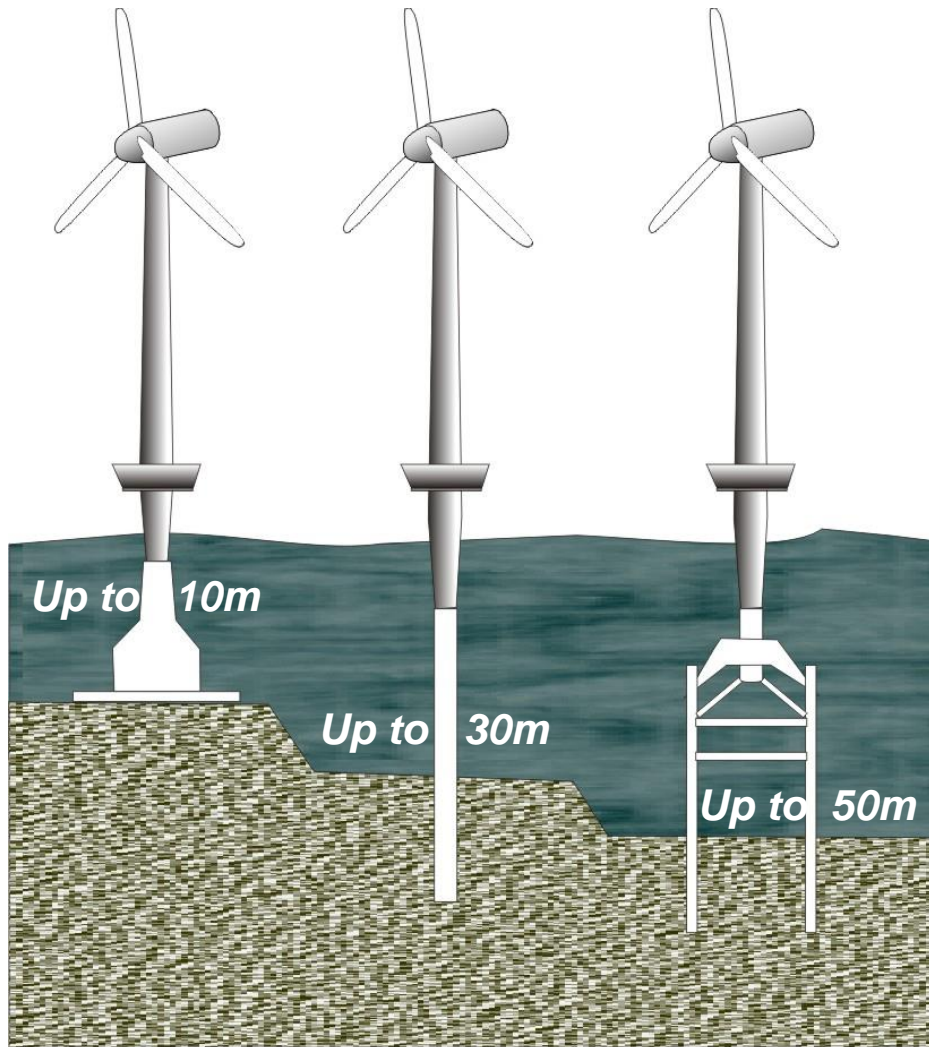
*GE Haliade X 12 MW (2021)
Nacelle à Montoir : 21 x 10 m 700t*

Merci de votre Attention



Backup

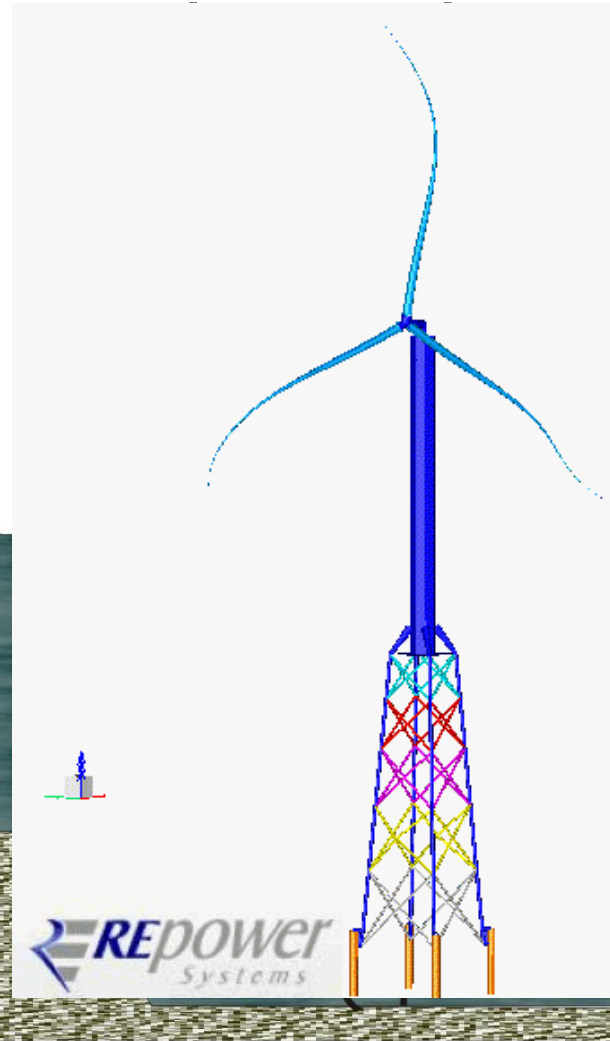
Enjeux des éoliennes Offshore : Fondations



Gravity

Monopile

Quadri/Tripode



Influences

Wind

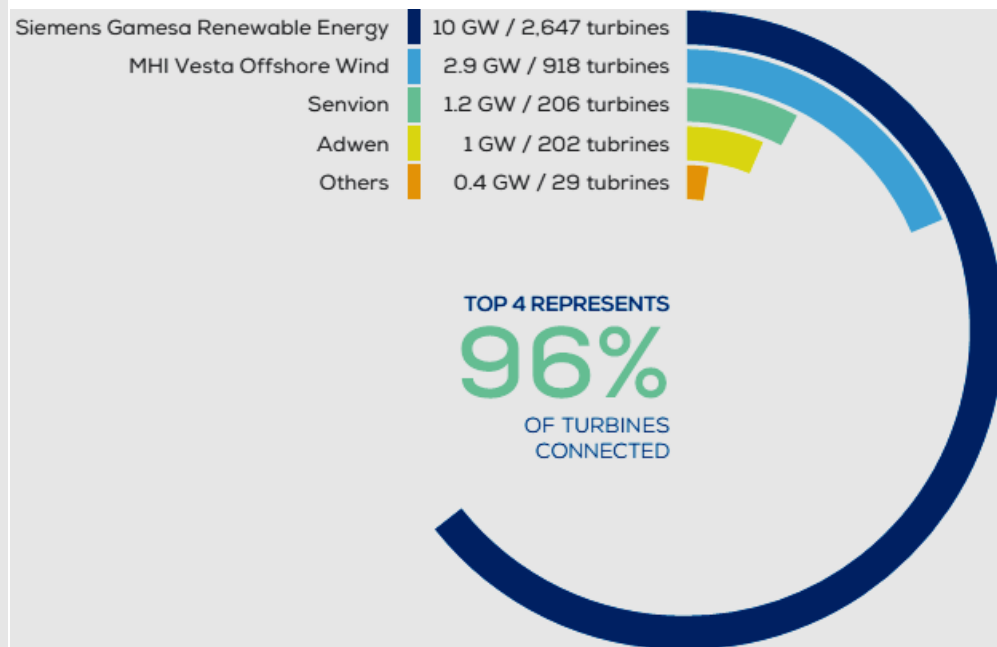
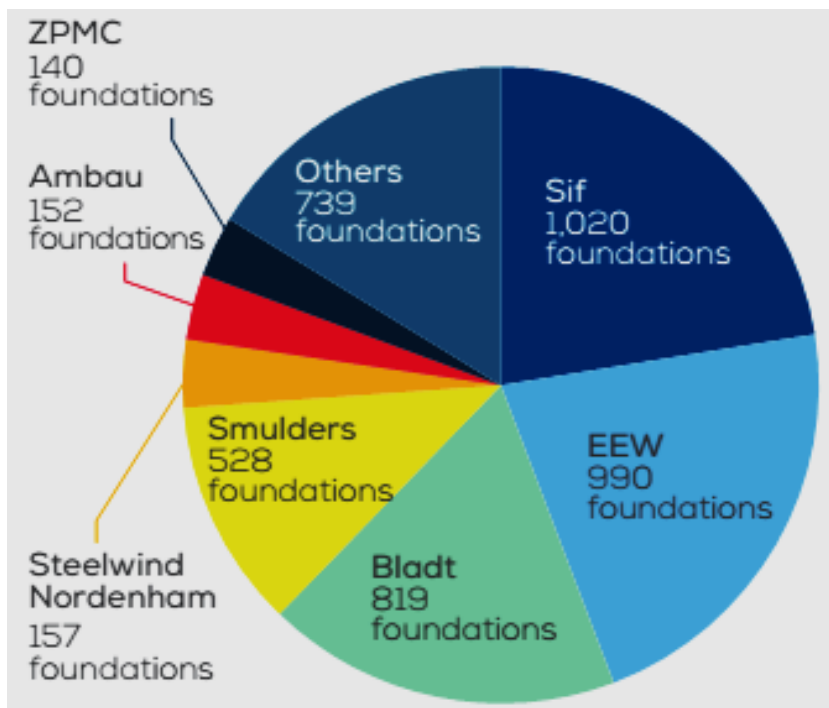
Waves

Marine
Currents

Seabed

Enjeux des éoliennes Offshore

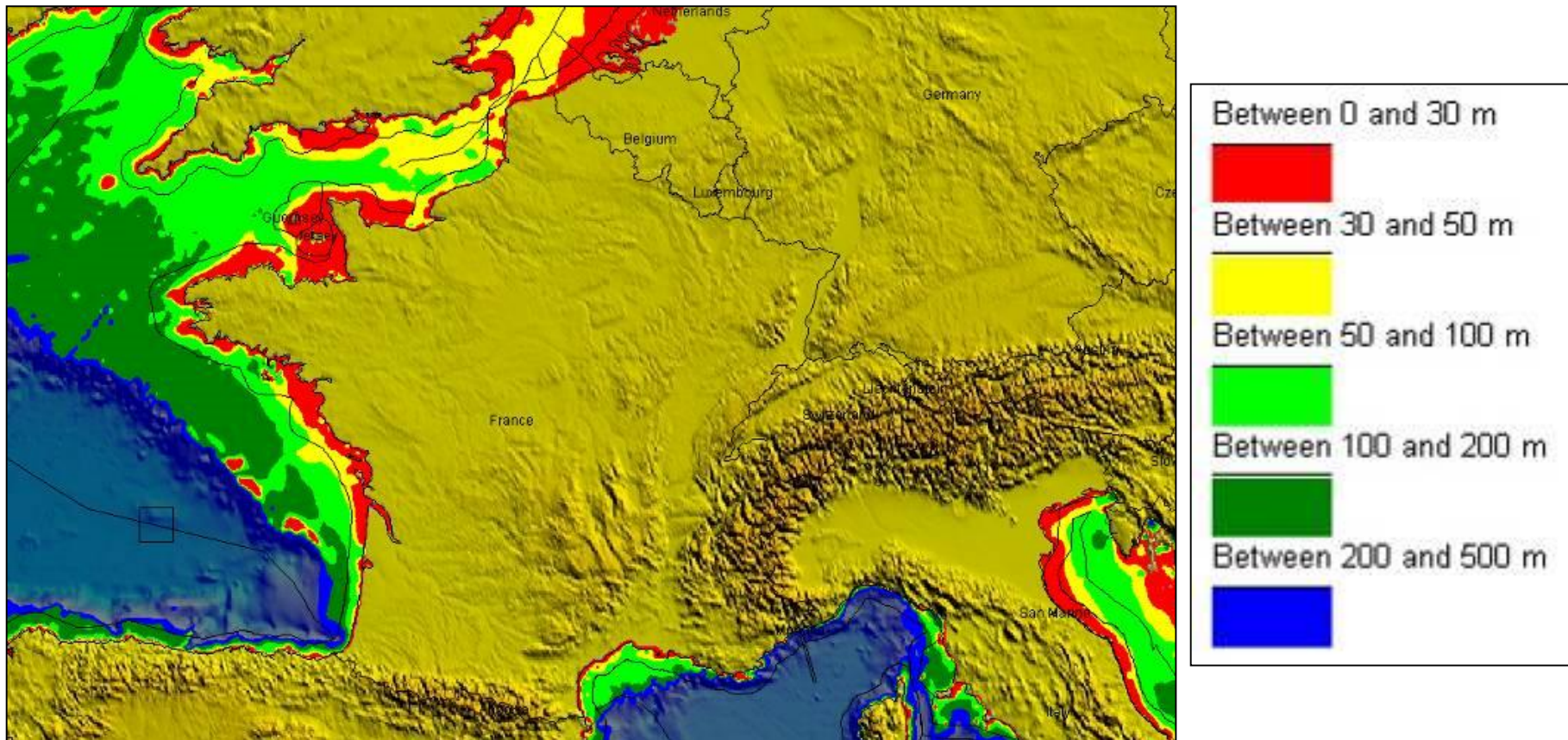
European Leadership



Source: WindEurope

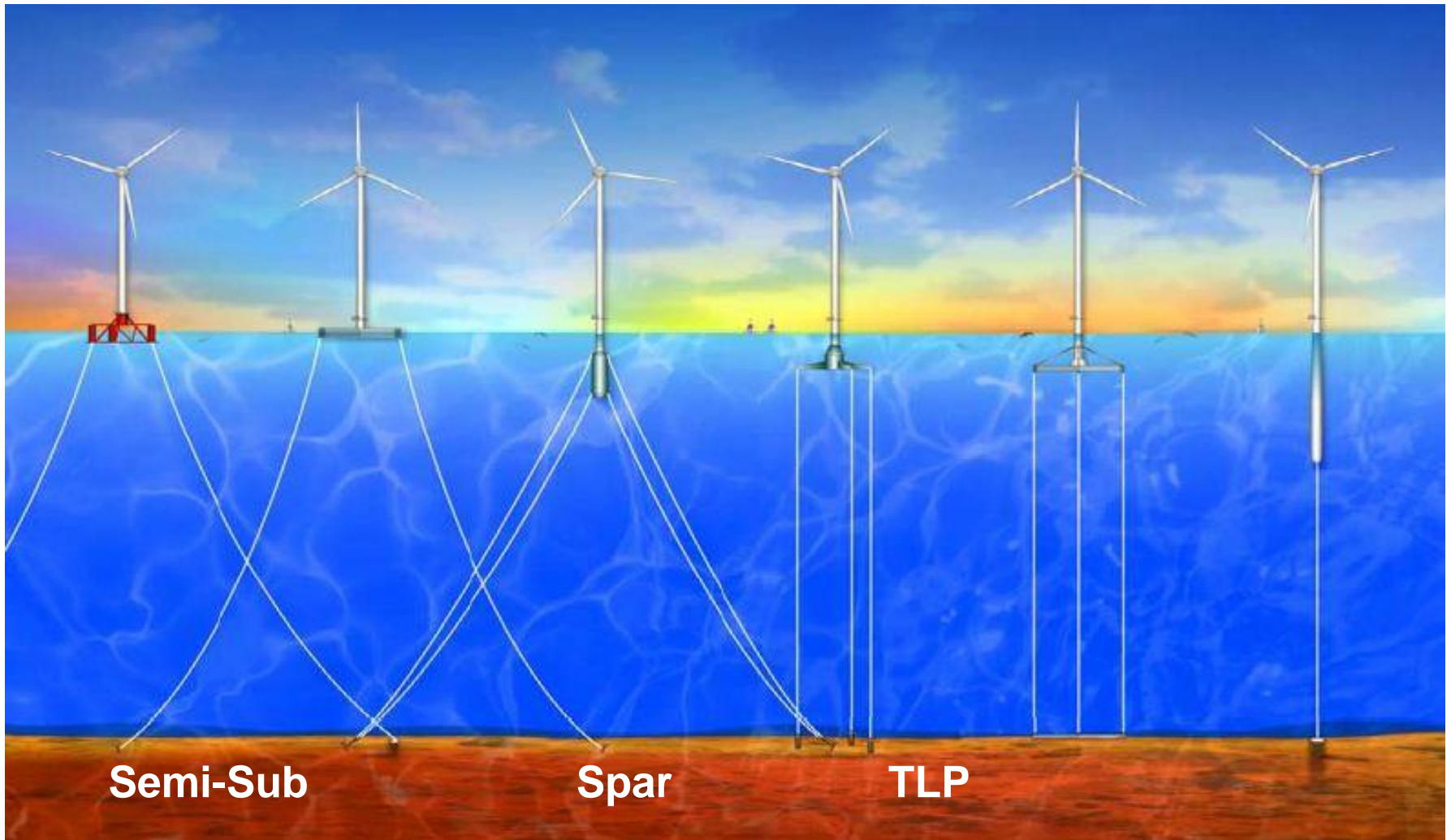
Enjeux des éoliennes Offshore : profondeur

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

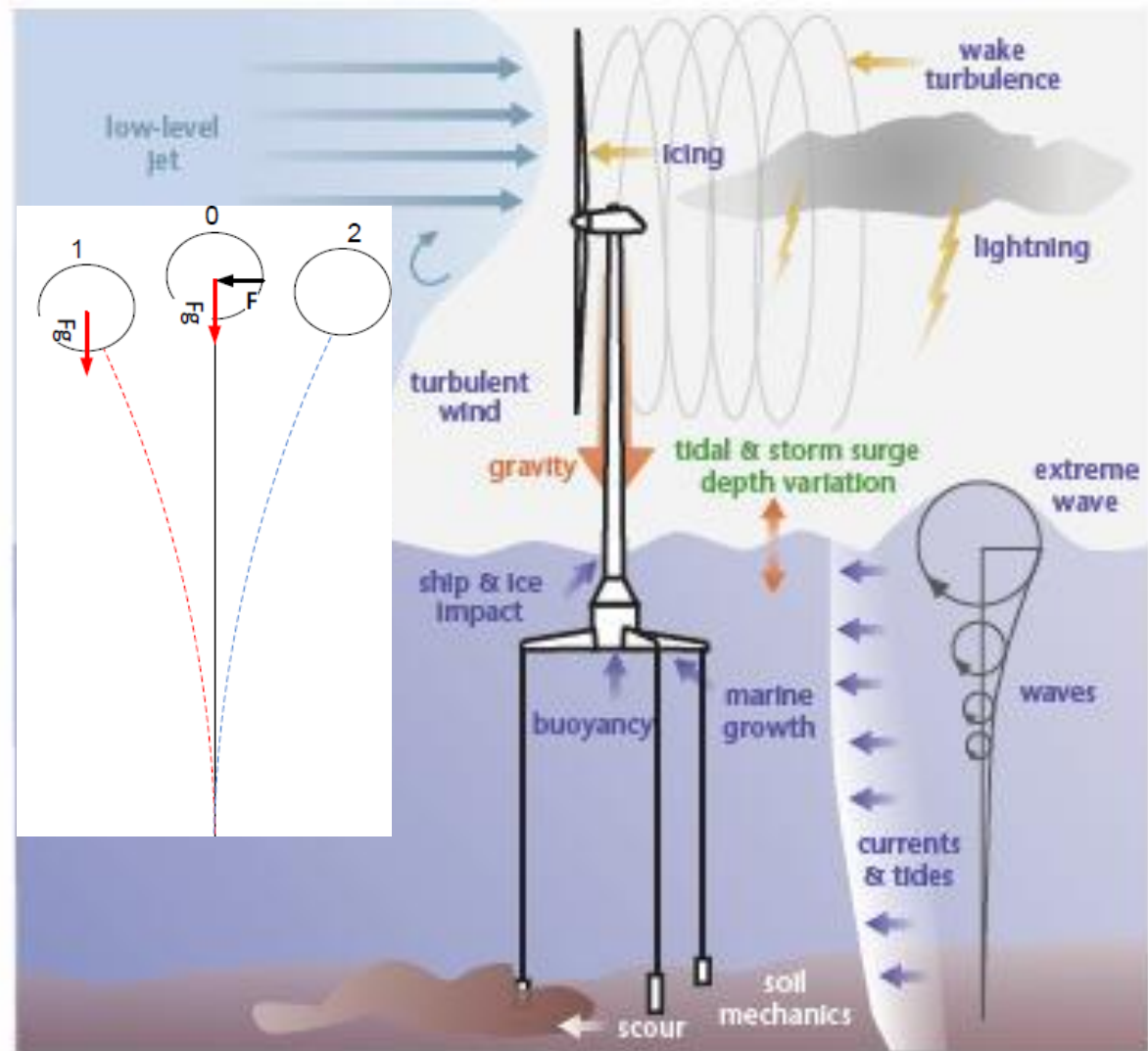
- Nouveaux Outils de Design, sites test

- ➔ **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

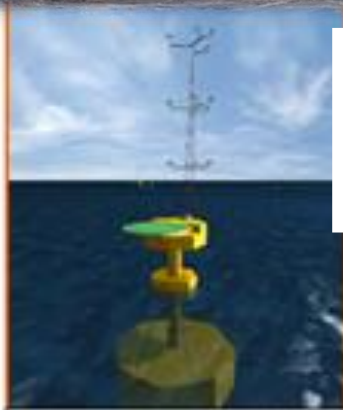
Fukushima Project



Mitsubishi 7MW
oil pressure
drive-type
2015

Hitachi 2MW
Downwind
Nov 2013

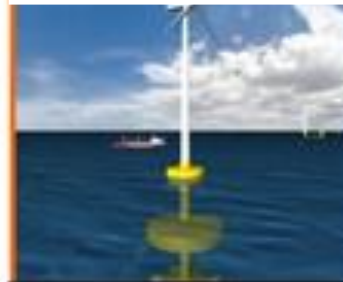
Hitachi 5MW
Downwind
Sept 2016



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*



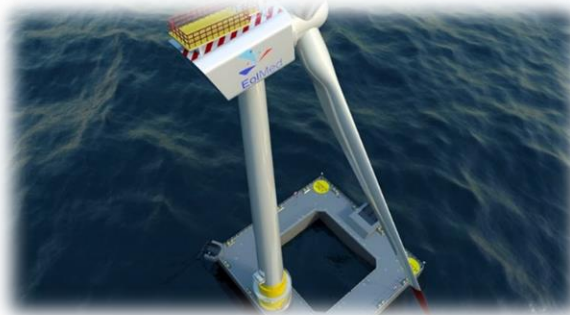
Faraman

*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

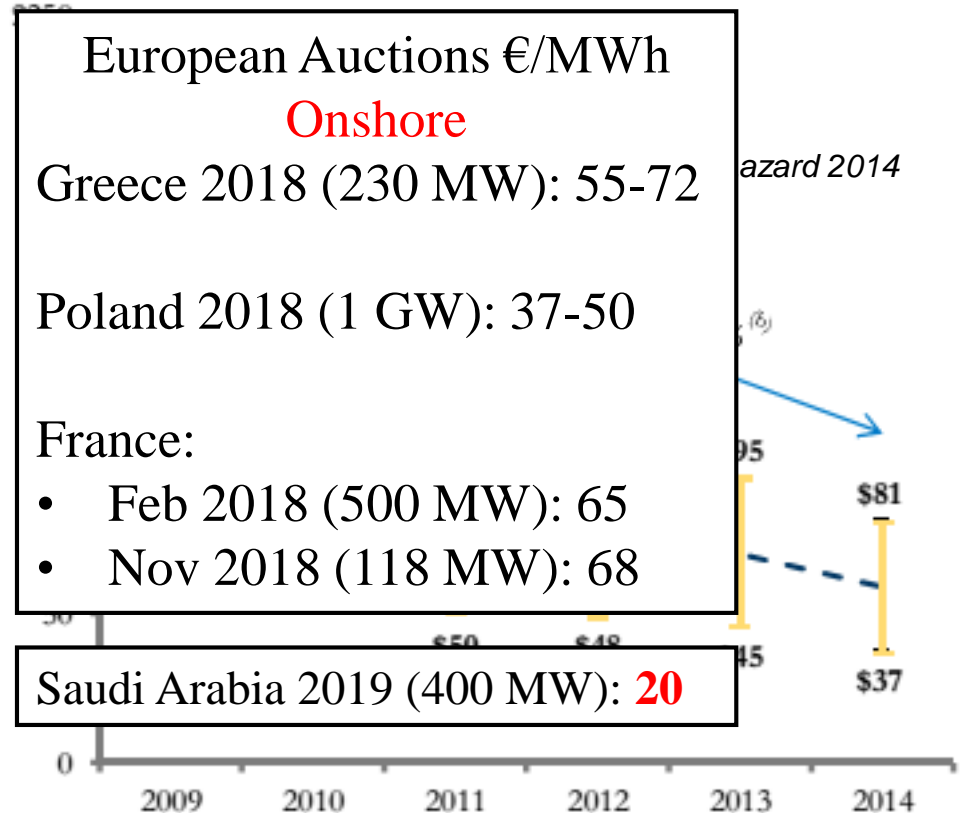
Greece 2018 (230 MW): 55-72

Poland 2018 (1 GW): 37-50

France:

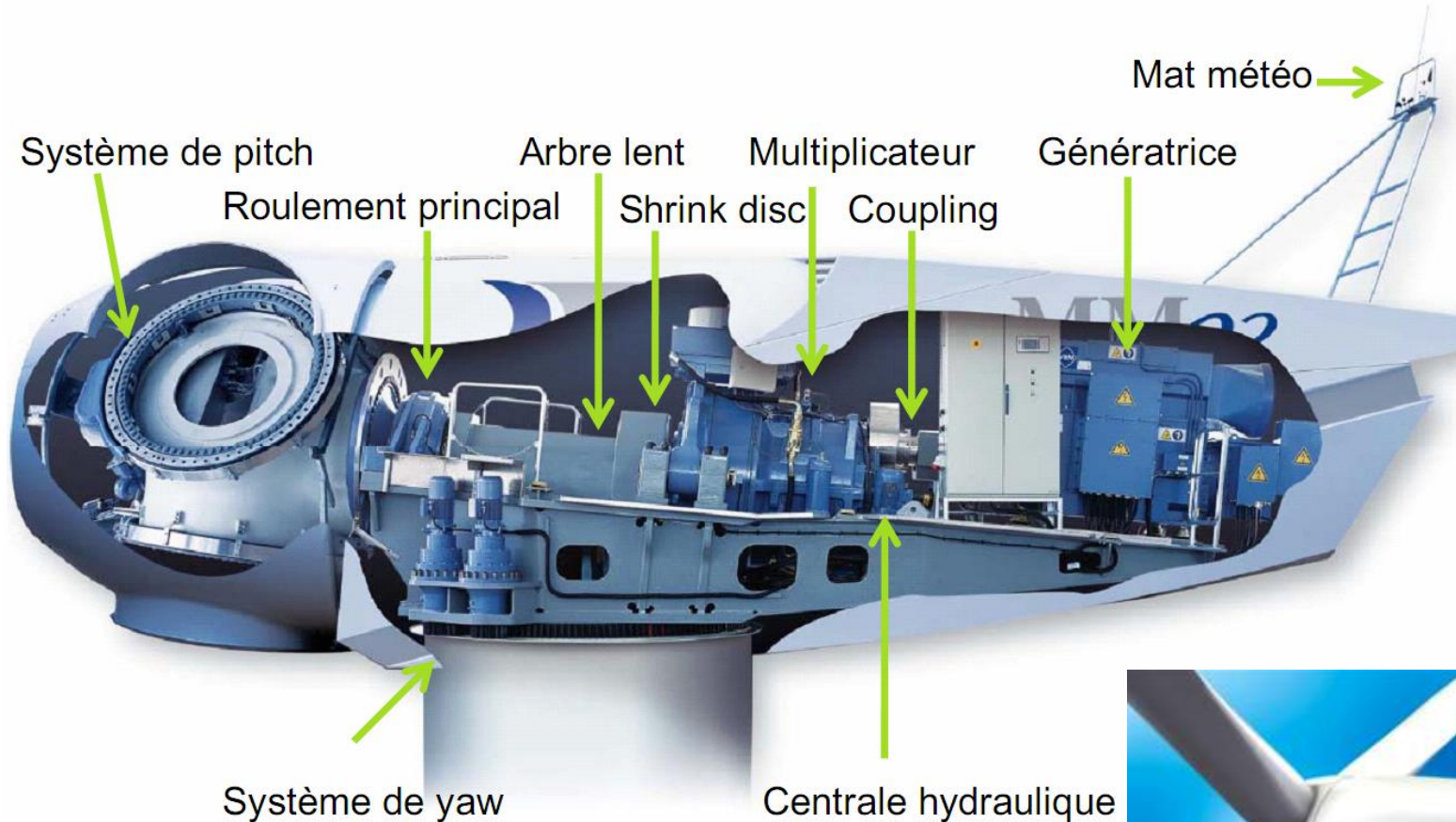
- Feb 2018 (500 MW): 65
- Nov 2018 (118 MW): 68

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**



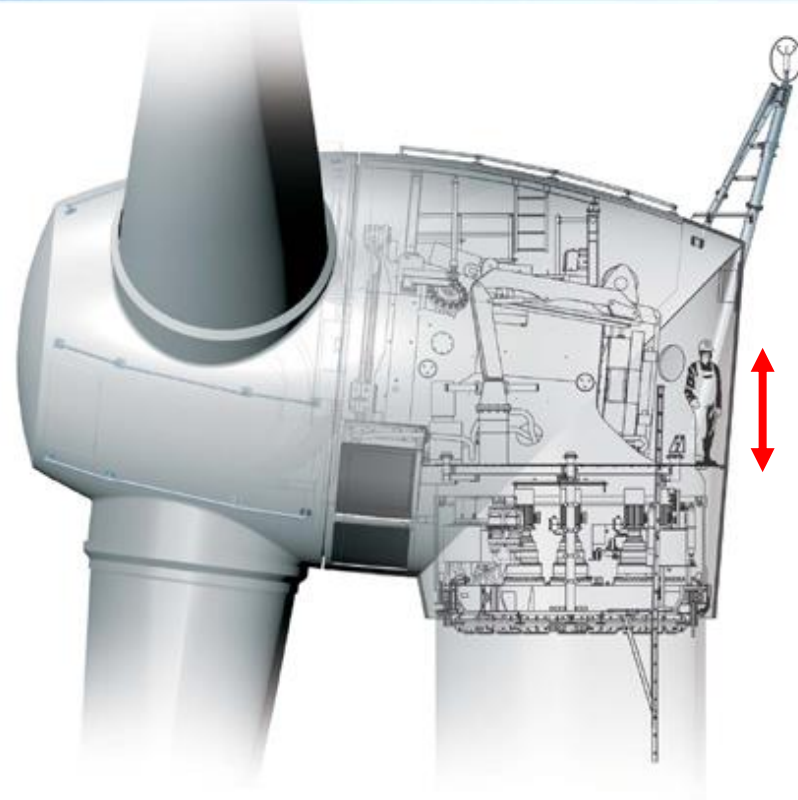
Evolution des éoliennes

Attaque Directe et hybride

- **Génératrice à aimants permanents**



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



2005 - **AREVA**
Multibrid 5 MW