



L'éolien ? C'est du Vent ! Pas seulement...

François Thoumsin, AGIF, 28 Avril 2015

Electrabel
GDF SUEZ

Table des matières

- **Energies renouvelables**
 - Définitions
 - Energie éolienne
- **Quelques chiffres**
- **Développement d'un parc éolien**
 - Sélection des sites
 - Choix techniques
 - Etude économique
- **Construction**
- **Exploitation**
- **Questions**

Petit rappel....(échauffement) ☺

Unités utilisées pour mesurer la **puissance**

→ **Watt (W)**; kW, MW, GW, Chevaux (1 cheval = 735 W)

- Ampoule : 60W,
- Un cycliste en forme : 150W
- Four : 2 kW,
- Voiture 100kW (130cv),
- Un réacteur de Tihange : 1000 MW ou 1GW
- Toutes les centrales belges : 14 GW ou 14.000 MW
- Monde : 5600GW soit 5600 fois un réacteur de Tihange

Unités utilisées pour mesurer l'**énergie**

→ Joules, GJ, Calorie, kCalorie, kWh, MWh, GWh, TWh, Toe (Tonne oil equivalent = 41.84 GJ),...

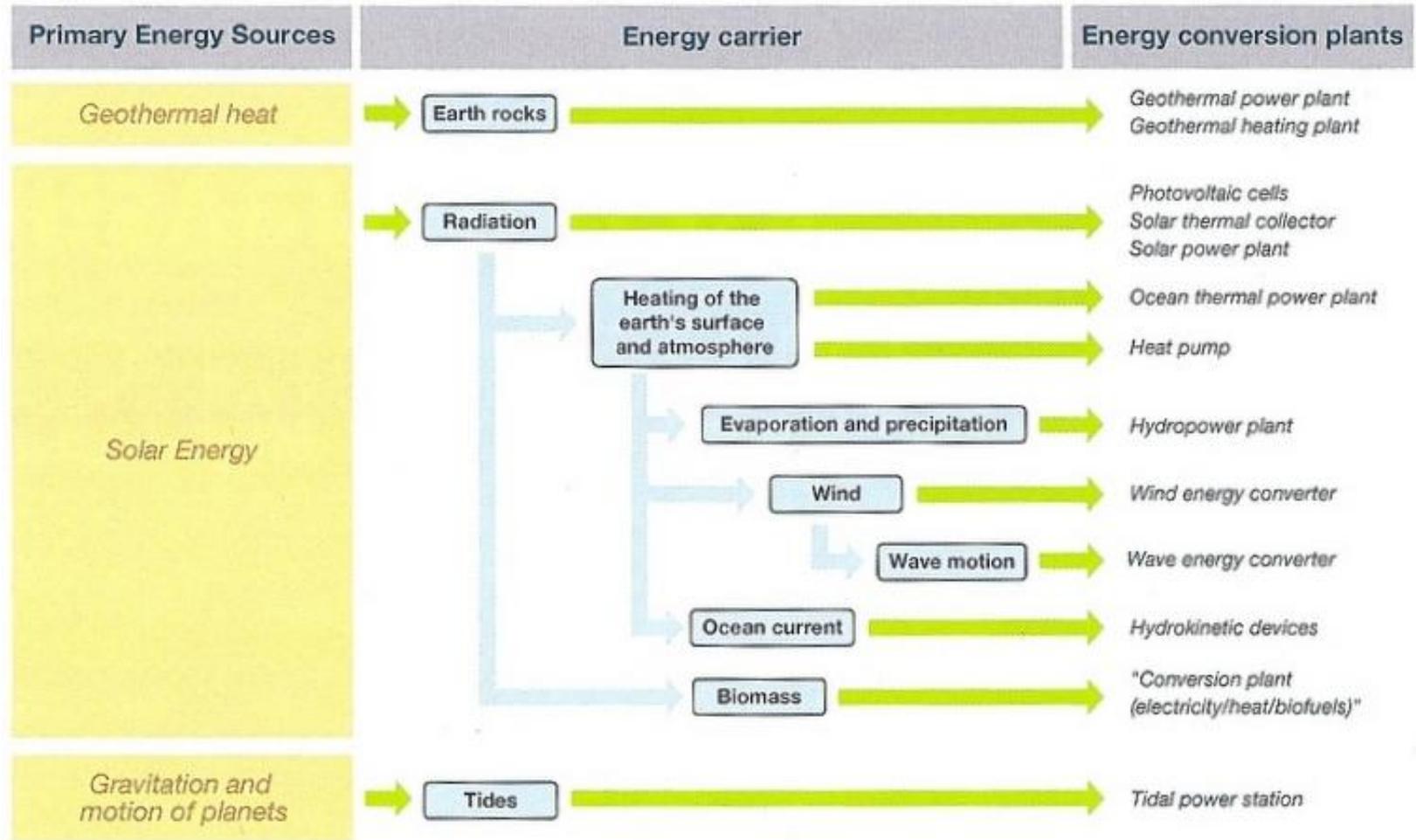
- Ampoule de 60W qui brûle en permanence = 525 kWh par an,
- Consommation moyenne d'un ménage par an : 4000 kWh
- Production d'un réacteur de Tihange : 8.000.000 MWh par an ou 8 TWh
- Production électrique belge : 82 TWh ou 80 milliards de kWh
- Production électrique mondiale : 23.100 TWh

Energies renouvelables : définition

Les énergies renouvelables sont généralement définies comme des énergies provenant de sources qui sont **naturellement renouvelées** – à l'échelle humaine – comme :

- le solaire (photovoltaïque et thermique),
- le vent,
- la pluie (hydro-électricité),
- les marées,
- la géothermie,
- la biomasse,
- les vagues et les courants marins

Energies renouvelables : définition



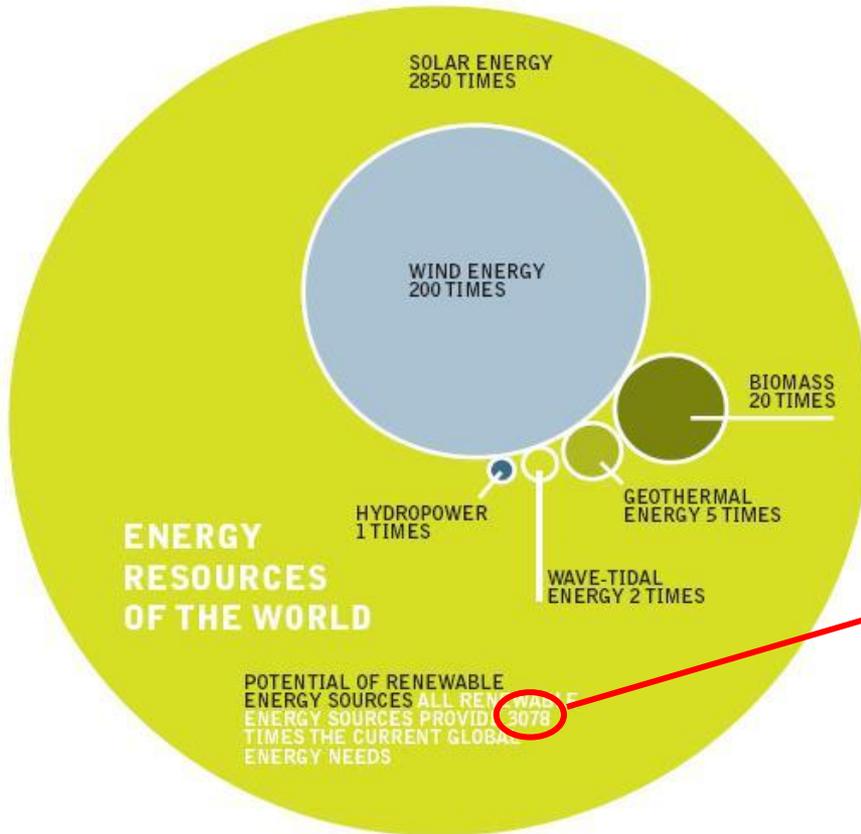
Energies renouvelables : potentiel

THE AMOUNT OF POWER THAT CAN BE ACCESSED WITH CURRENT TECHNOLOGIES SUPPLIES A TOTAL OF **5.9** TIMES THE GLOBAL DEMAND FOR POWER

Sun	3.8 times
Geothermal heat	1 time
Wind	0.5 times
Biomass	0.4 times
Hydrodynamic power	0.15 times
Ocean power	0.05 times

source DR. JOACHIM NITSCH

5.9 fois



3078 fois

0.12 fois

source WBGU

Consommation mondiale d'énergie primaire : 171.000TWh

Consommation d'énergie renouvelable : **21.000TWh**

Production renouvelable d'électricité en 2013 : 5100TWh

(22% de la production électrique mondiale)

Energie Eolienne

Transformation de l'énergie cinétique en électricité

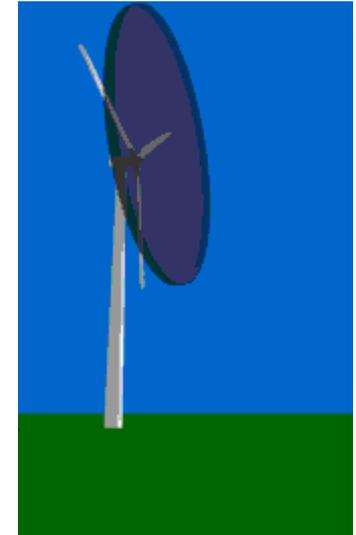
$$P = \frac{1}{2} \rho v^3 S \quad S = \pi \frac{d^2}{4}$$

P: Puissance du vent

ρ : **Densité** de l'air → niveau de la mer vs. montagnes

v: **Vitesse** du vent

S: **Surface** du rotor



© 1998 www.WINDPOWER.org

En pratique, une éolienne ne peut jamais capturer la totalité de la puissance, la limite théorique (théorème de Betz) se situe à :

$$P = 0.37 v^3 S$$

Plus le rotor est grand, plus on peut capturer de la puissance

Plus la vitesse du vent est élevée, plus la puissance disponible

sera importante (puissance 3!)

Exemple de courbe de puissance d'une éolienne de 2MW

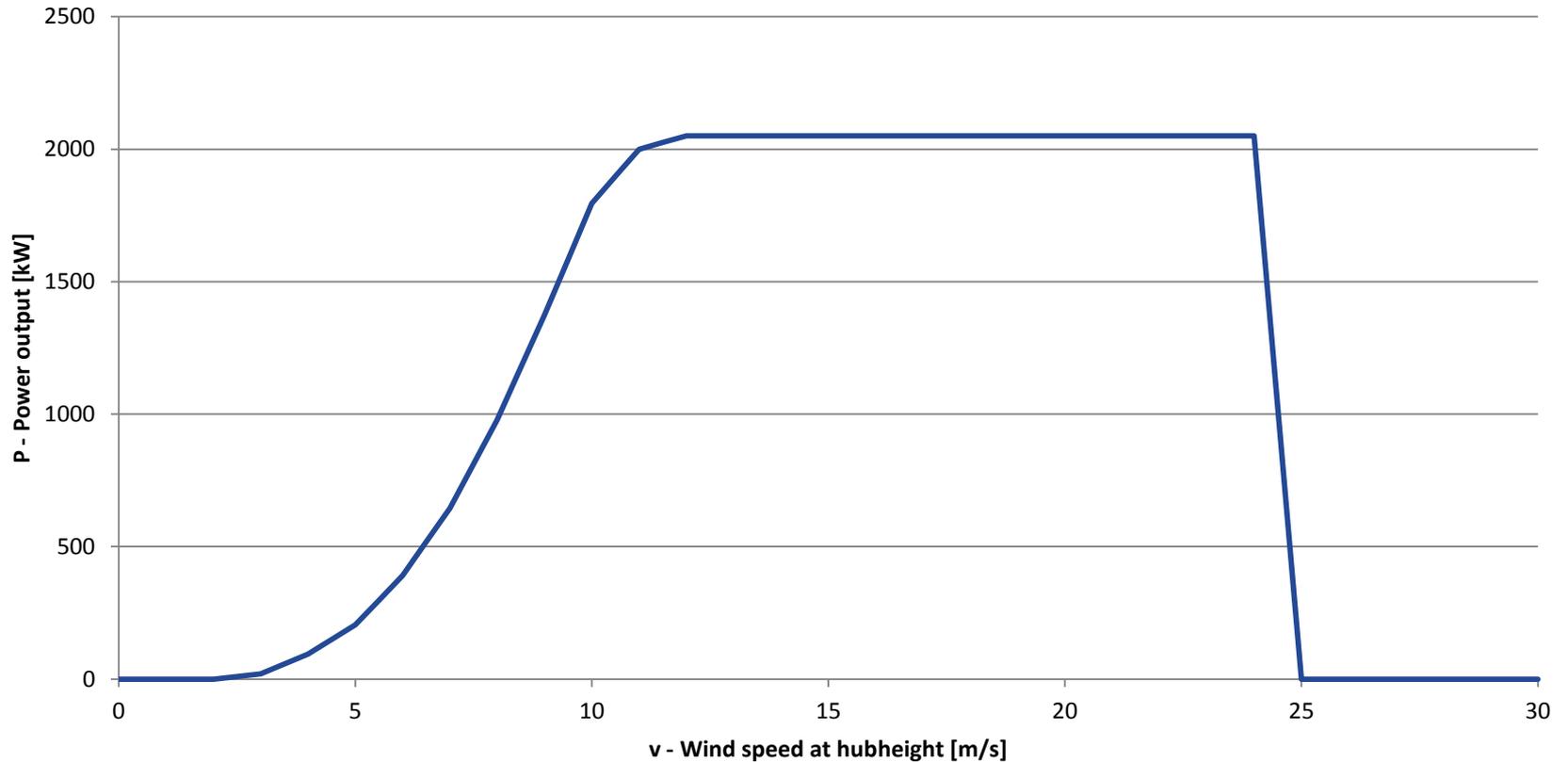


Table des matières

- **Energies renouvelables**
 - Définitions
 - Energie éolienne
- **Quelques chiffres**
- **Développement d'un parc éolien**
 - Sélection des sites
 - Choix techniques
 - Etude économique
- **Construction**
- **Exploitation**
- **Questions**



Puissances installées dans le monde

(production d'électricité, fin 2013)

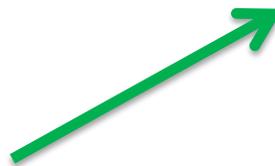
- Hydro 1091 GW (EU-28 : 156 GW)
- **Eolien 302 GW (EU-28 : 117 GW)**
- Biomasse 76 GW (EU-28 : 32 GW)
- Géothermie 11 GW (EU-28 : 1 GW)
- Photovoltaïque 128 GW (EU-28 : 79 GW)

→ 29% de la capacité installée (EU-28 : 39%)

Energie éolienne dans le monde : évolution

2008

	MW	%
USA	25,170	20.8
Germany	23,903	19.8
Spain	16,754	13.9
China	12,210	10.1
India	9,645	8.0
Italy	3,736	3.1
France	3,404	2.8
UK	3,241	2.7
Denmark	3,180	2.6
Portugal	2,862	2.4
Rest of world	16,693	13.8
Total top 10	104,104	86.2
World total	120,798	100.0



2013	GW	
China	75.5	25,0%
US	61.1	20,2%
Germany	34.3	11,4%
Spain	23	7,6%
India	20.2	6,7%
UK	10.5	3,5%
Italy	8.6	2,8%
France	8.3	2,7%
Canada	7.8	2,6%
Denmark	4.8	1,6%
Rest of World	48	15,9%
TOTAL	302.1	

Eoliennes "on shore"

Capacité installée en Belgique (MW)

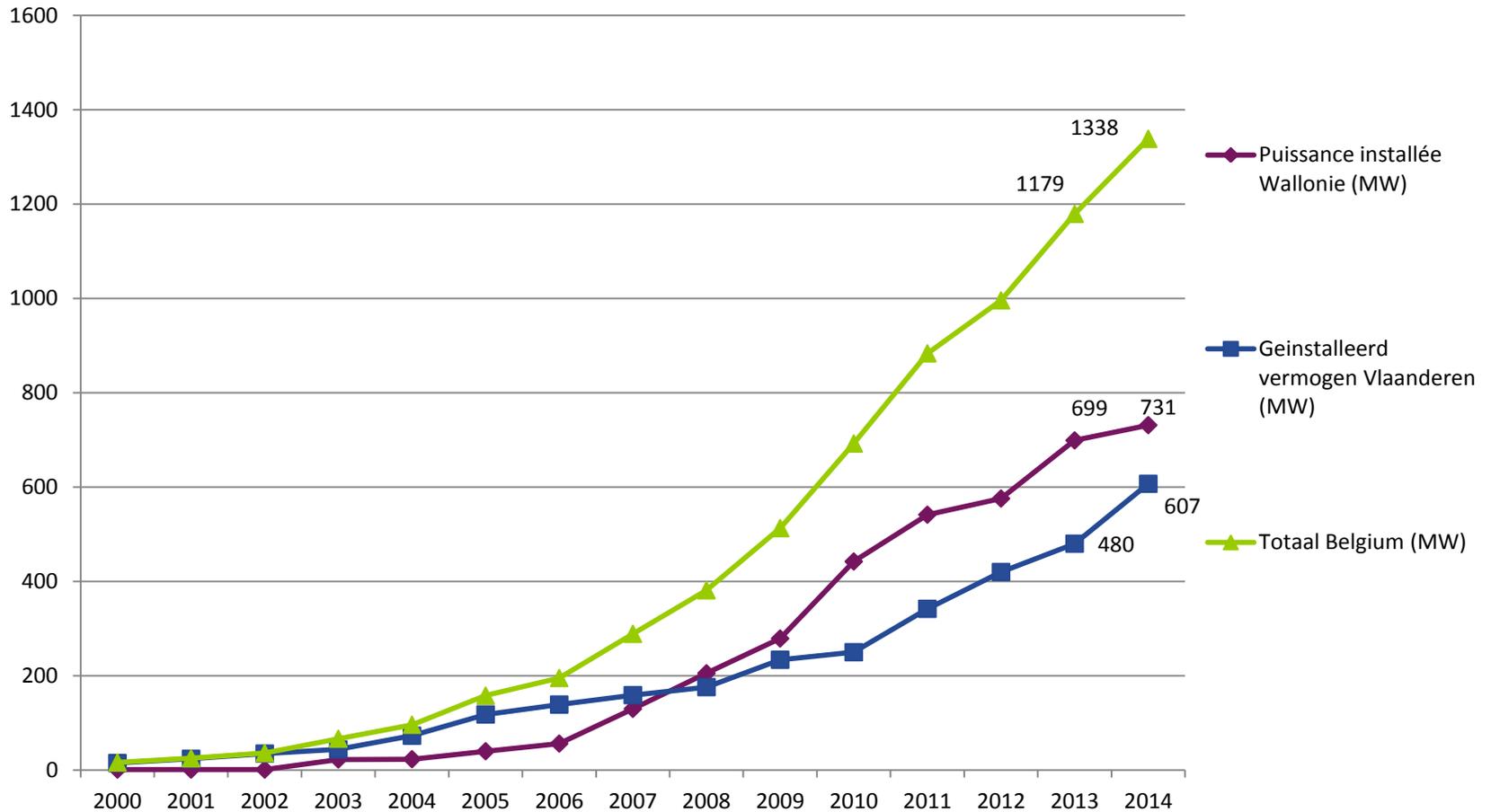


Table des matières

- Energies renouvelables
 - Définitions
 - Energie éolienne
- Quelques chiffres
- Développement d'un parc éolien
 - Sélection des sites
 - Choix techniques
 - Etude économique
- Construction
- Exploitation
- Questions

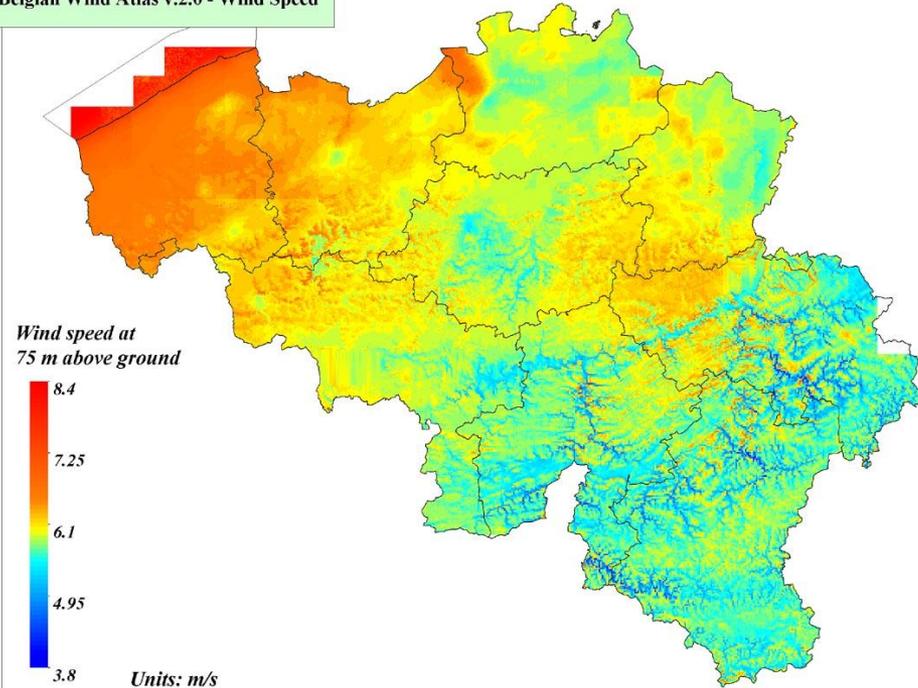
Wind Atlas

Développement

Construction

Exploitation

Belgian Wind Atlas v.2.0 - Wind Speed



- Période de référence 10 à 12 ans
- Adaptation en fonctions de la production réelle des parcs
- Hauteur de machine est déterminante

Autres facteurs

Développement

Construction

Exploitation

- Zones habitées
- Zones d'exculsion (proches des habitations)
- Restrictions à la demande du Ministère de la Défense
- Restrictions pour les aéroports / aérodromes
- Zones forestières / impact sur la faune (chauves-souris)
- Interactions avec d'autres parcs
- Disponibilité des terrains
-

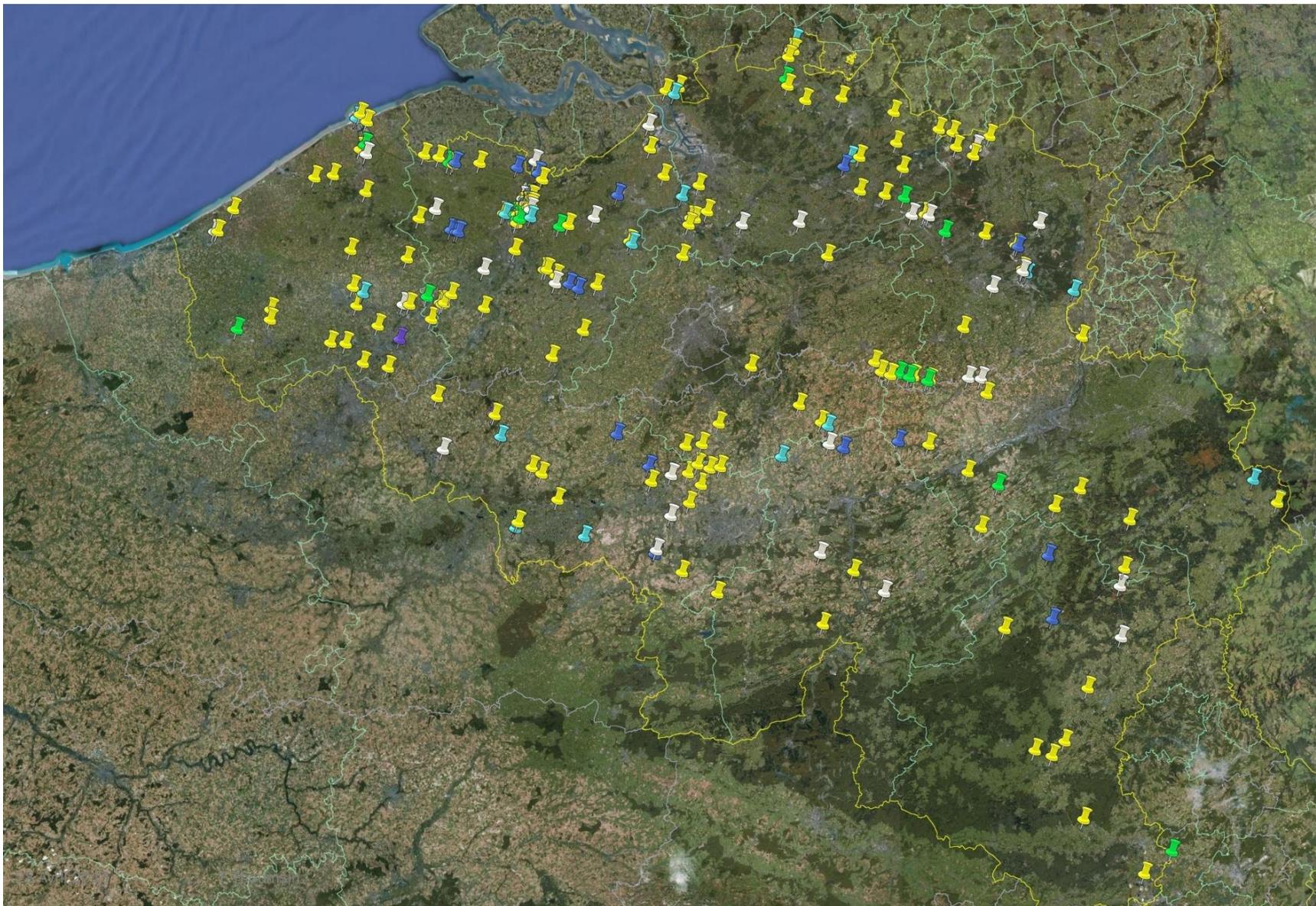


Sélection de sites

Développement

Construction

Exploitation

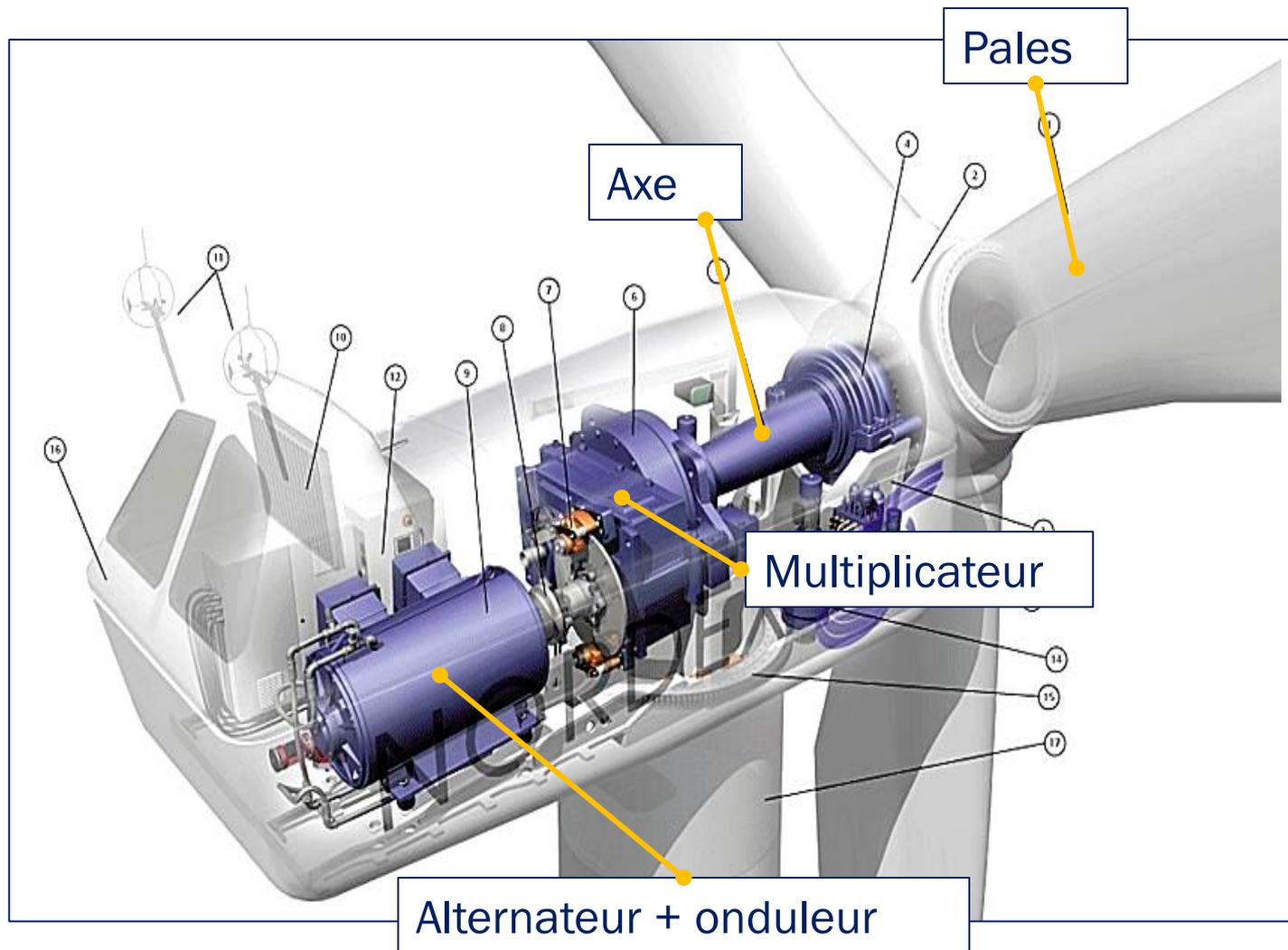


Choix techniques : éléments de base

Développement

Construction

Exploitation



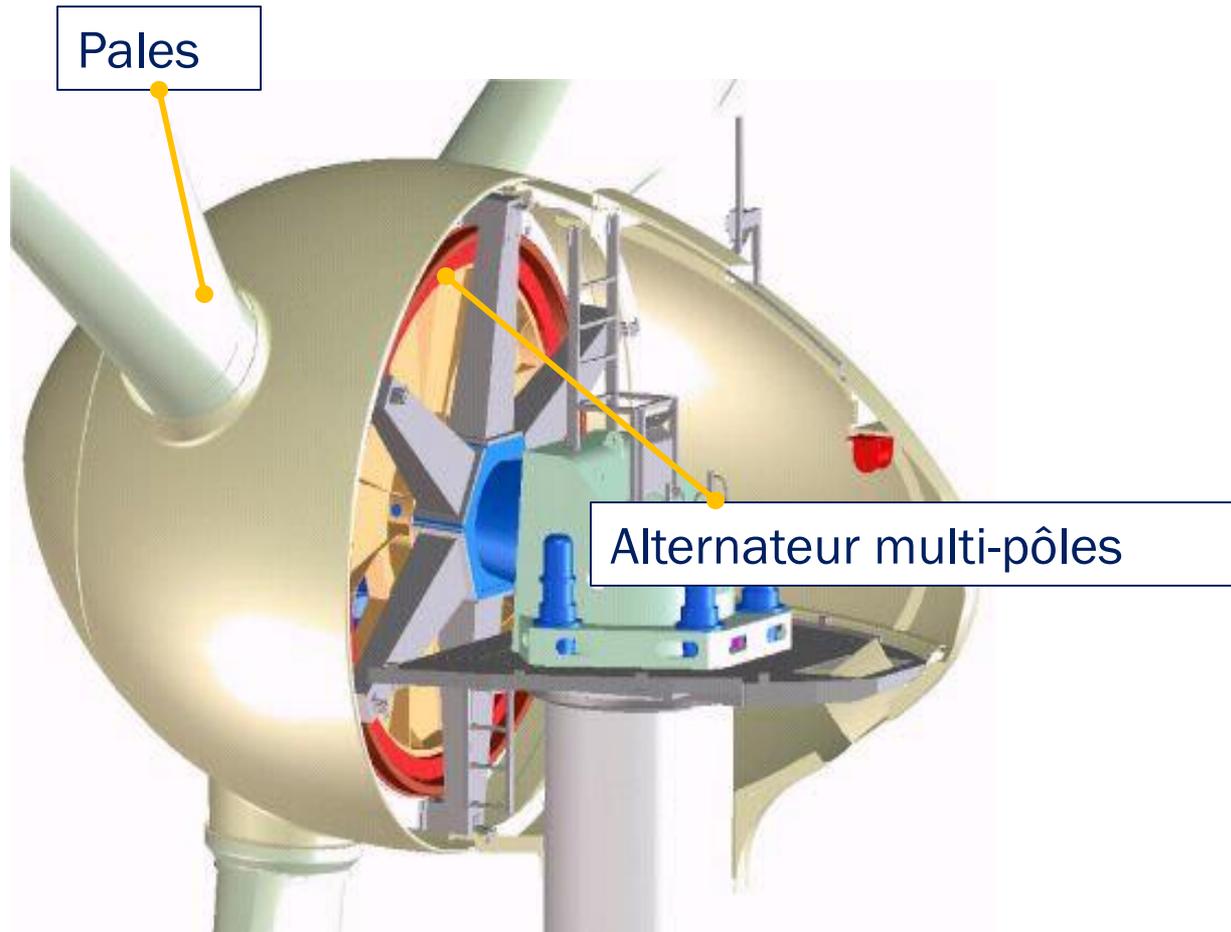
Choix techniques

Éléments de base (variante)

Développement

Construction

Exploitation



Choix techniques

Données complémentaires

Développement

Construction

Exploitation

Design :

- Trois pales : optimum coût / puissance / bruit
- Pales orientables
- Vitesse variable (10-22 rpm)

Tendances :

- Plus de multiplicateur
- Refroidissement accru (eau/huile – nacelle alu)
- Profil aérodynamique des pales (puissance et bruit)
- Pales en deux parties (transport)
- Nacelle plus haute et rotor plus grand



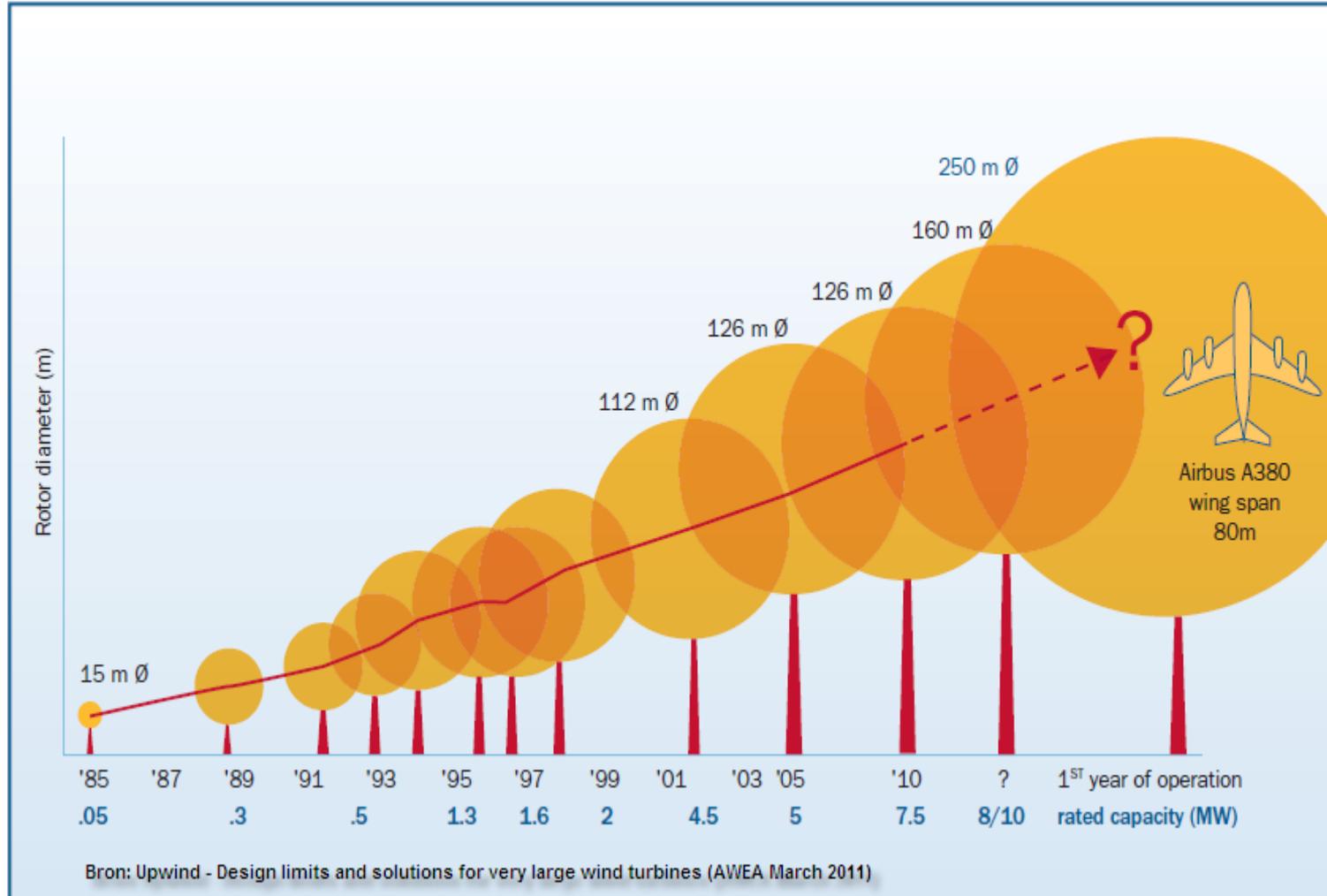
Choix techniques

Tailles

Développement

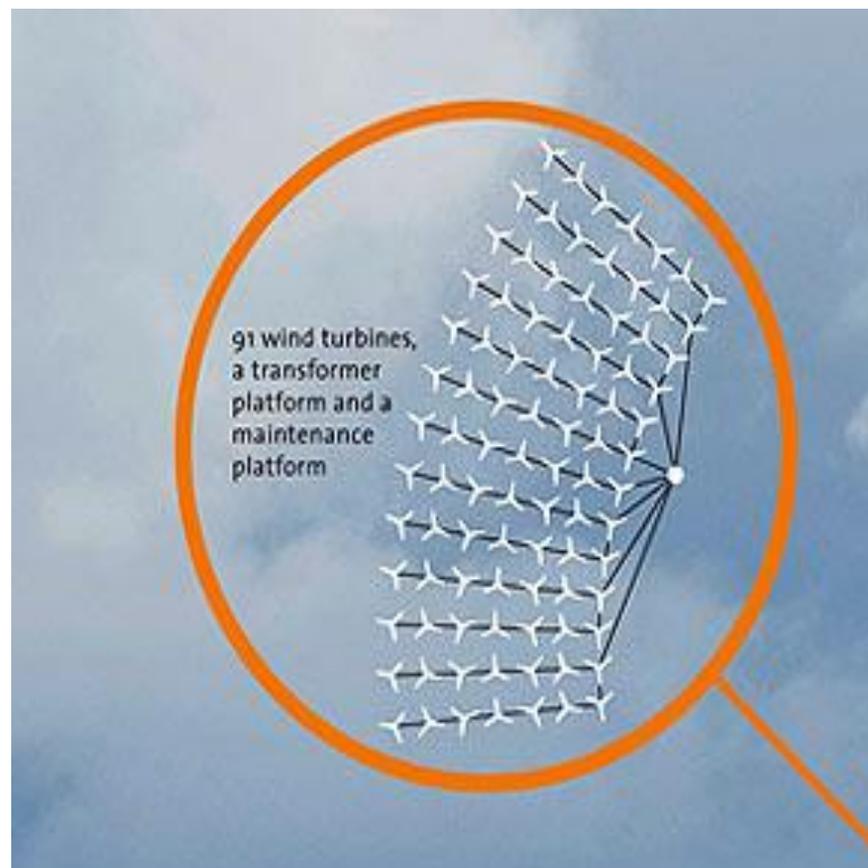
Construction

Exploitation



Eoliennes offshore

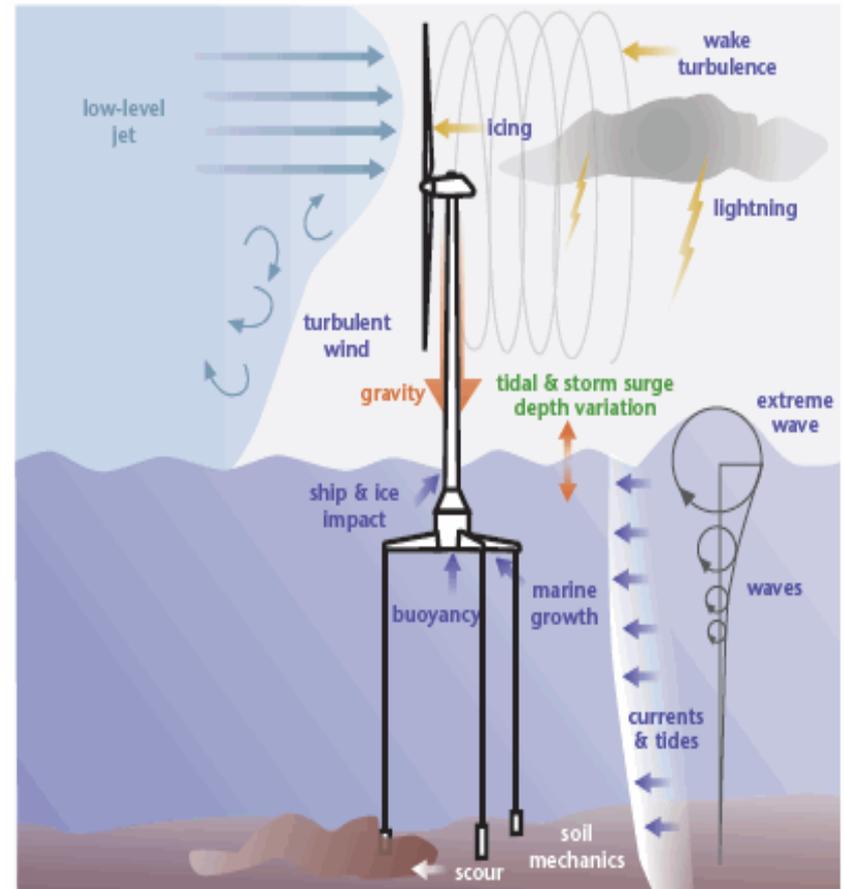
Exemples d'implantations



Eoliennes offshore

Fondations = problème principal

- Taille de la machine
- Charge sur le rotor
- Profondeur à l'endroit du parc (!)
- Qualité du fond
- Force des vagues
- Erosion du fond
-



Eoliennes offshore : exemples de fondations

Tripod



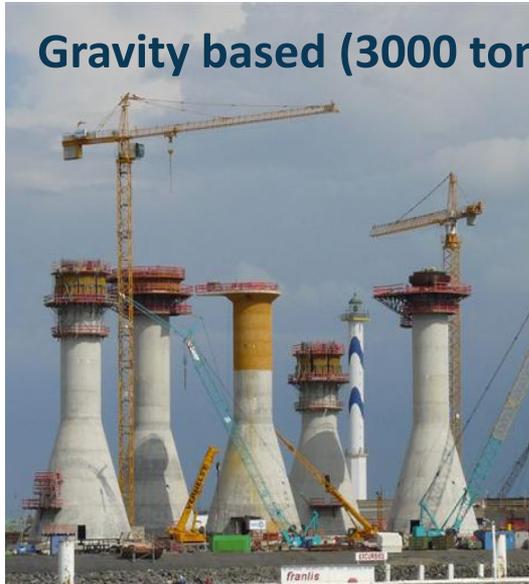
Tripile



Monopile (320 ton)



Gravity based (3000 ton)



Jacket (700 ton)



Petites éoliennes

- ❑ 100W à 30 KW
- ❑ Designs et coûts très variés
- ❑ Rentabilité économique dépendante de facteurs locaux (réseaux, consommation locale,...)



Etude économique



La rentabilité économique – et la décision d’investir – dépend de nombreux facteurs :

- La production attendue (exprimée en FLEOH)
- Le coût de développement
- Le coût de construction
- Le coût d’exploitation
- Le coût du financement
- La location des terrains
- La durée de vie
- Le rendement attendu sur le capital investi
-

Etude économique

LCOE

Développement

Construction

Exploitation

Le LCOE (Levelized Cost of Electricity) est une notion qui prend en compte tous ces paramètres et permet la comparaison du coût total de l'électricité produite (en €/MWh) par une technologie avec

- d'une part les **autres technologies**
- mais également et surtout les **marchés de l'électricité**

LCOE :

- Des grandes éoliennes (en Belgique) de 90 à 120€/MWh
- Du petit éolien : de 200 à 400€/MWh
- D'une centrale TGV : 60€ à 70€/MWh

Prix marché actuels : 35 à 45€/MWh

Nécessité de subsides

Table des matières

- **Energies renouvelables**
 - Définitions
 - Energie éolienne
- **Quelques chiffres**
- **Développement d'un parc éolien**
 - Sélection des sites
 - Choix techniques
 - Etude économique
- **Construction**
- **Exploitation**
- **Questions**

Construction

Développement

Construction

Exploitation

Les grandes étapes

- Routes d'accès
- Aire de travail pour forages/pieux et grues
- Tranchées câble
- Sous-fondations et fondations
- Construction des éoliennes
- Connexion au réseau (câble) et travaux électriques
- Mise en service
- Réception



Construction

Développement

Construction

Exploitation

Routes d'accès et aire de travail



Construction

Développement

Construction

Exploitation

Routes d'accès et aire de travail



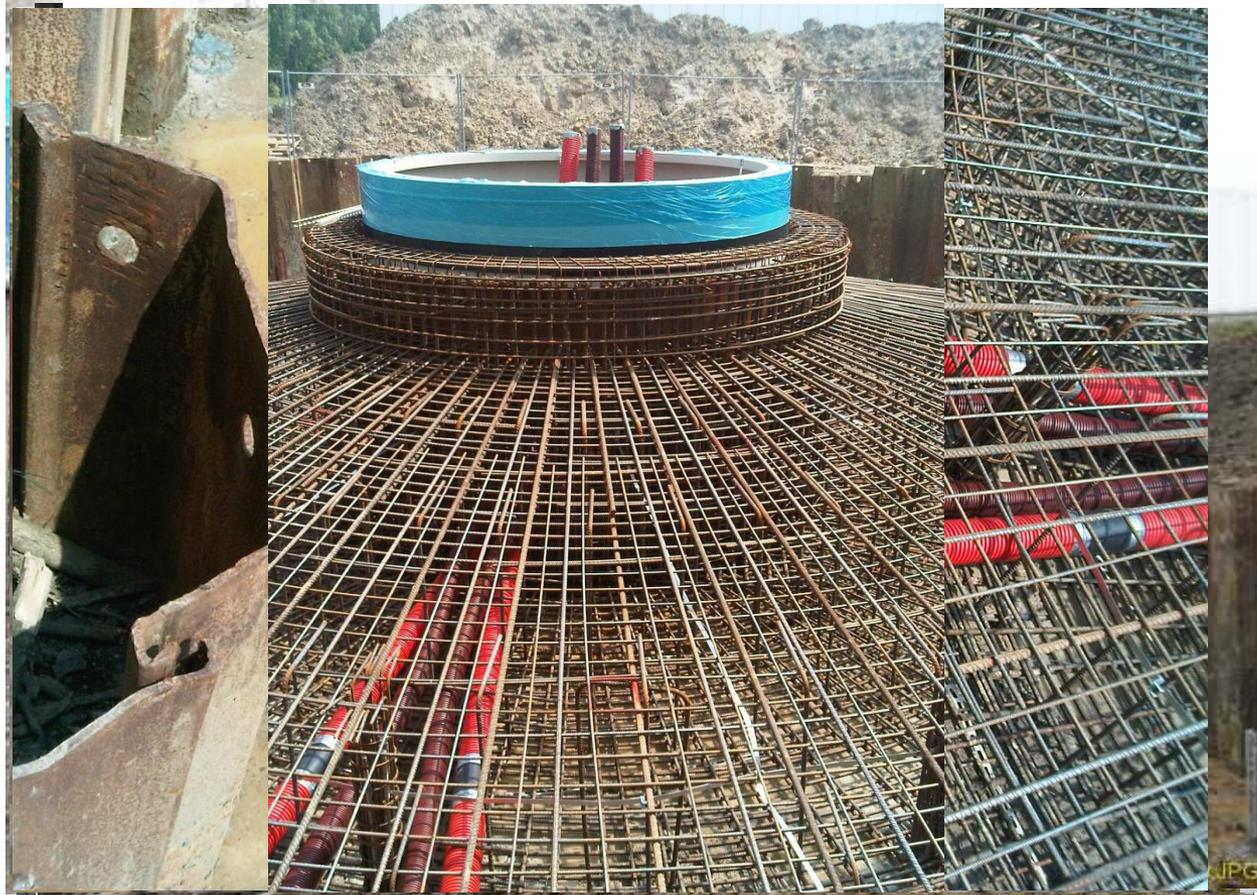
Construction

Développement

Construction

Exploitation

Fondations



Construction

Développement

Construction

Exploitation

Montage de la grue



Construction

Développement

Construction

Exploitation

Transport des éléments



Construction

Développement

Construction

Exploitation

Montage du mât



Construction

Développement

Construction

Exploitation

Montage de la nacelle



Construction

Développement

Construction

Exploitation



Assemblage du rotor au sol



Assemblage du rotor pale par pale



Table des matières

- **Energies renouvelables**
 - Définitions
 - Energie éolienne
- **Quelques chiffres**
- **Développement d'un parc éolien**
 - Sélection des sites
 - Choix techniques
 - Etude économique
- **Construction**
- **Exploitation**
- **Questions**

Exploitation : bruit

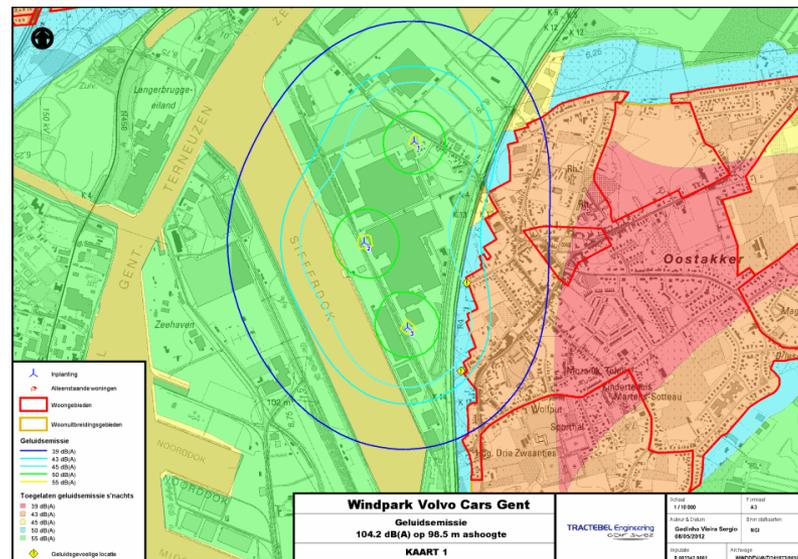
Développement

Construction

Exploitation

Mesures prises

- Calcul des zones impactées
- Distance par rapport aux habitations
- Optimisation du design des pales
- Bridage de la machine en fonction de la vitesse du vent (limitation de la vitesse de rotation et/ou de la puissance)



Exploitation : Ombre

Développement

Construction

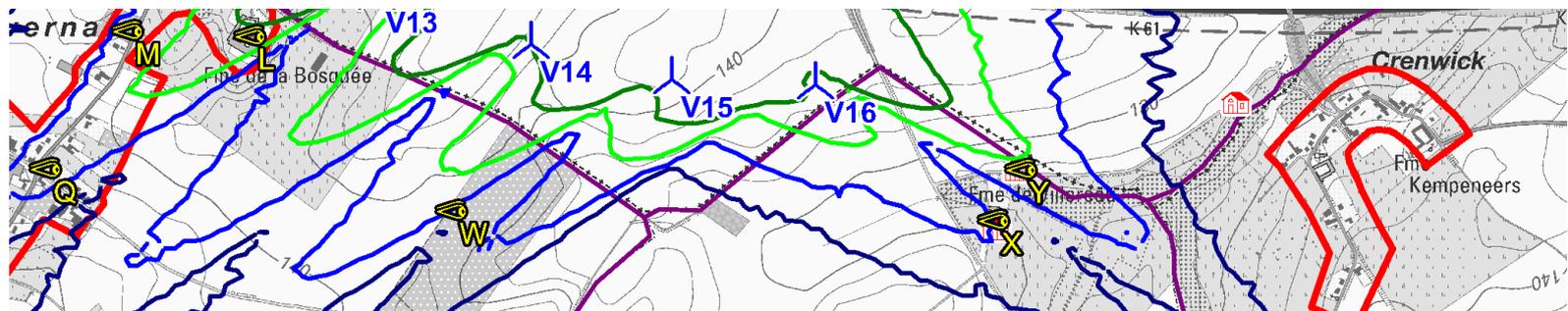
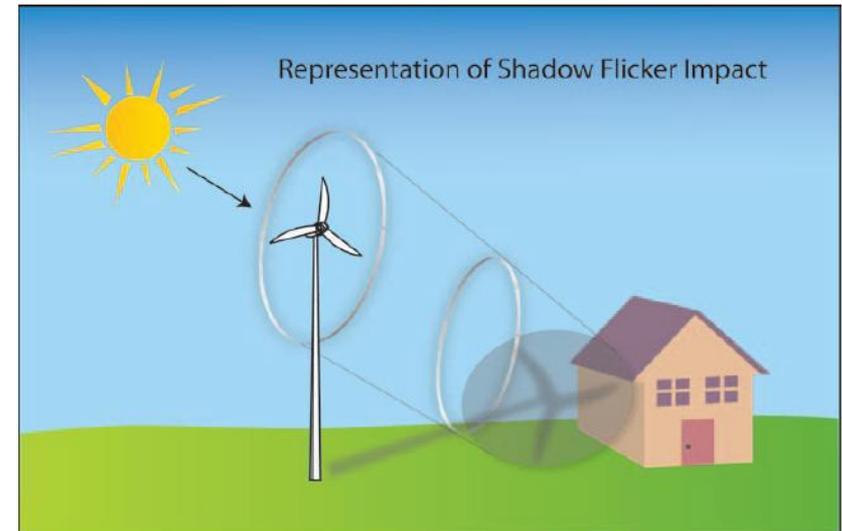
Exploitation

Ombre stroboscopique : mesures prises

- Calcul des zones impactées

→ STOP en fonction de :

- Détection luminosité (lumière directe ou diffuse (nuage))
- Position de la nacelle
- Calendrier



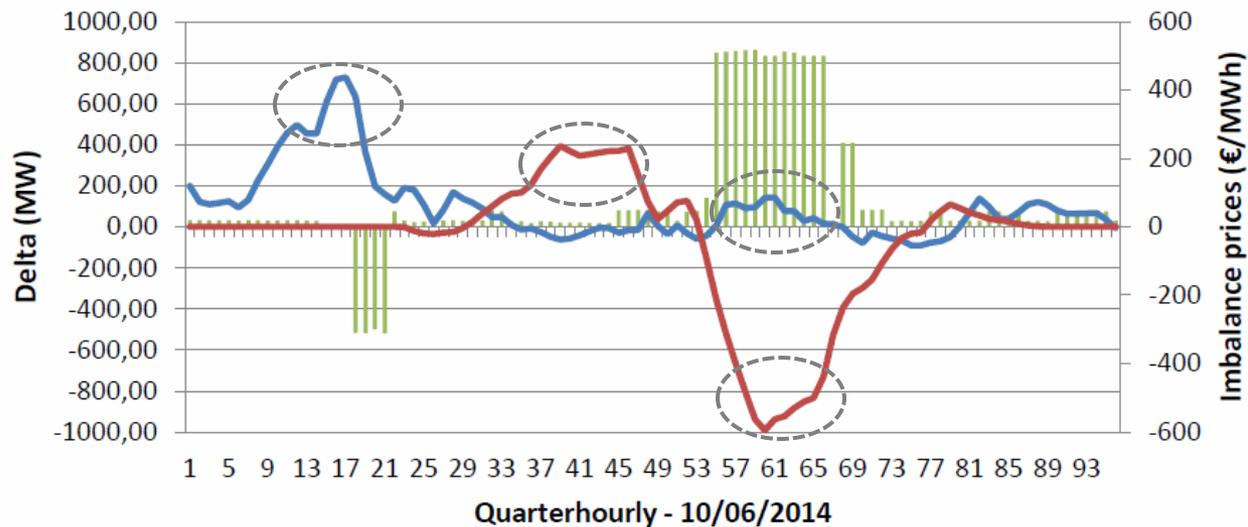
Exploitation : Intermittence

Développement

Construction

Exploitation

Sur un réseau électrique : Production = demande à tout instant



Imbalance Prices (€/MWh)

Delta Wind (MW)

Delta Solar (MW)

Electrabel
GDF SUEZ

Exploitation : Intermittence



Gestion de l'intermittence :

- Prévisions météo
- Flexibilité des moyens de production
- Flexibilité de la demande
- Puissance de réserve (démarrage rapide)
- Interconnexions avec les pays voisins
- Stockage

