



Energies fluides en contexte industriel :

L'exemple de l'éolien chez ENGIE

RESTREINT

INTERNE

SECRET

Petite présentation

Mon parcours en quelques dates

- 2010 : BAC Scientifique
- 2010 – 2012 : CPGE (filiale PCSI – PSI*)
- 2012 – 2015 : Ecole Polytechnique
- 2015 – 2017 : MSc in Innovative Sustainable Energy Engineering
 - Première année en Norvège, université NTNU à Trondheim
 - Seconde année au Danemark, université DTU à Copenhague
- 2017 : Stage de fin d'étude chez Engie Green
- Depuis octobre 2017 : poste d'ingénieur Etudes & Modélisation (≈ R&D) chez Engie Green





1- ENGIE & ENGIE Green

04

**2- L'éolien en France,
enjeux et trajectoire de
développement**

13

**3- Ingénieur dans
l'éolien : quelles activités ?**

24



**ENGIE &
ENGIE Green**

ENGIE

Historique & Activités

ENGIE est issu de Gaz de France. Autrefois entité dédiée au gaz naturel en France, c'est désormais un groupe mondial multi-énergie et tourné vers la transition énergétique dont les principales activités sont :

- Production d'électricité bas carbone (gaz naturel et énergies renouvelables)
- Infrastructures énergétiques (réseaux de gaz et d'électricité)
- Solutions clients, services à l'énergie

Quelques chiffres :



ENGIE, leader de la transition vers la neutralité carbone dans le monde

Un Groupe mondial de référence dans l'énergie bas carbone et les services. Pour répondre à l'urgence climatique, notre ambition est d'être le leader mondial de la transition vers la neutralité carbone « as a service » pour nos clients, notamment les entreprises et les collectivités territoriales. Nous nous appuyons sur nos métiers clés (énergies renouvelables, gaz, services) pour proposer des solutions plus sobres en énergie et plus respectueuses de l'environnement.



170 000

collaborateurs dans le monde
± 50 % en France
100 000 dédiés à la fourniture de solution d'efficacité énergétique à nos clients



50 %

de femmes cadres dans le Groupe à Horizon 2030



58 %

d'énergies renouvelables dans le mix électrique mondial à horizon 2030
20 % en 2016 > 28 % en 2019



-71 %

d'émissions de gaz à effet de serre provenant de la production d'électricité à horizon 2030



60,1 Mds €

chiffre d'affaires en 2019
dont 21,4 Mds € en France



10 Mds €

investissements de croissance sur 2020-2022



2,5 GW

de Coporate PPA (Power Purchase Agreement) émis en 2019
Soit 5 fois plus qu'en 2018



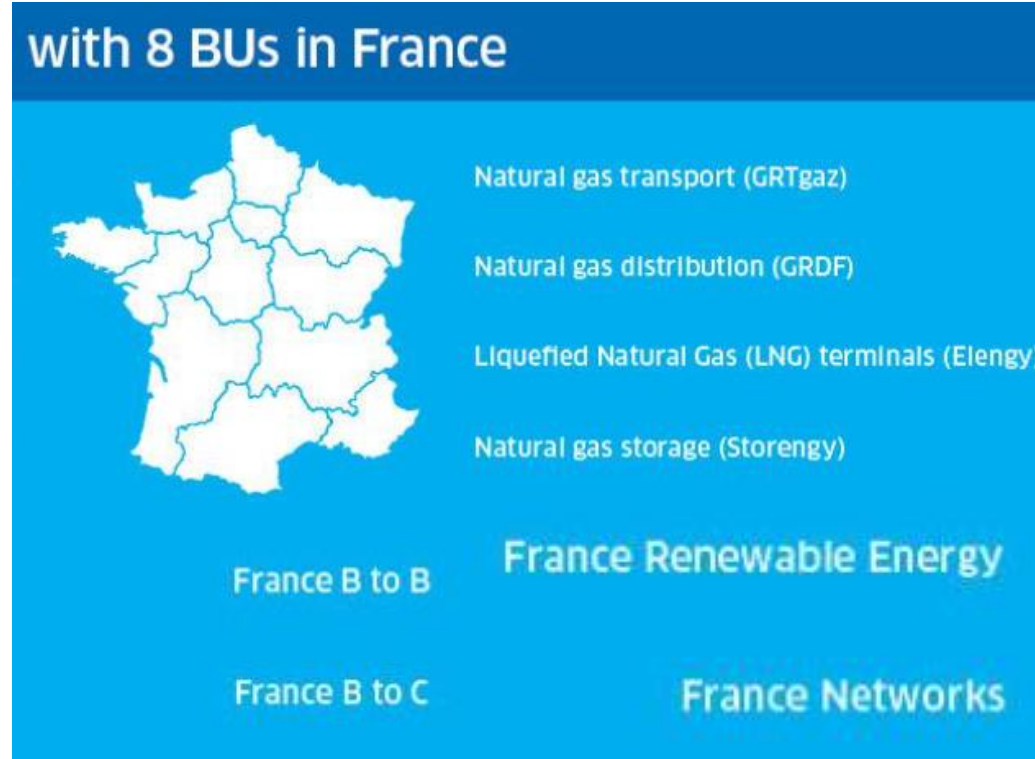
+9 GW

capacités renouvelables supplémentaires intégralement sécurisée en 2019 et 2021
4 fois plus de nouvelles capacités renouvelables en 2019 par rapport à 2018

Chiffres à décembre 2019

Organisation du groupe

23 « Business Units » géographiques



Une restructuration du groupe est en cours, cette organisation devrait changer en janvier prochain

ENGIE Green

Un leader des énergies renouvelables en France

Acteur engagé durablement en faveur des énergies renouvelables, ENGIE Green est une filiale détenue à 100% par le Groupe ENGIE.

- ENGIE Green est né en 2016 de la fusion de **Futures Energies** et de **MAIA Eolis**. La société a ensuite fusionné en 2017 avec **La Compagnie du Vent**, et a intégré les activités de développement, d'exploitation et de maintenance de **Solairedirect** en France. ENGIE Green poursuit sa croissance avec l'intégration des filiales **Langa** et **Saméole** au 1er janvier 2020, puis **RENVICO** en juillet 2020.
- 1er acteur de l'éolien terrestre et du solaire du Groupe ENGIE en France.
- Regroupe une expertise complète pour le développement, la conception, la construction, l'exploitation et la maintenance des sites éoliens et photovoltaïques.
- Engagé dans les énergies marines renouvelables et le biogaz.



**Chiffres au 1^{er} janvier 2021*

ENGIE Green

L'énergie des territoires

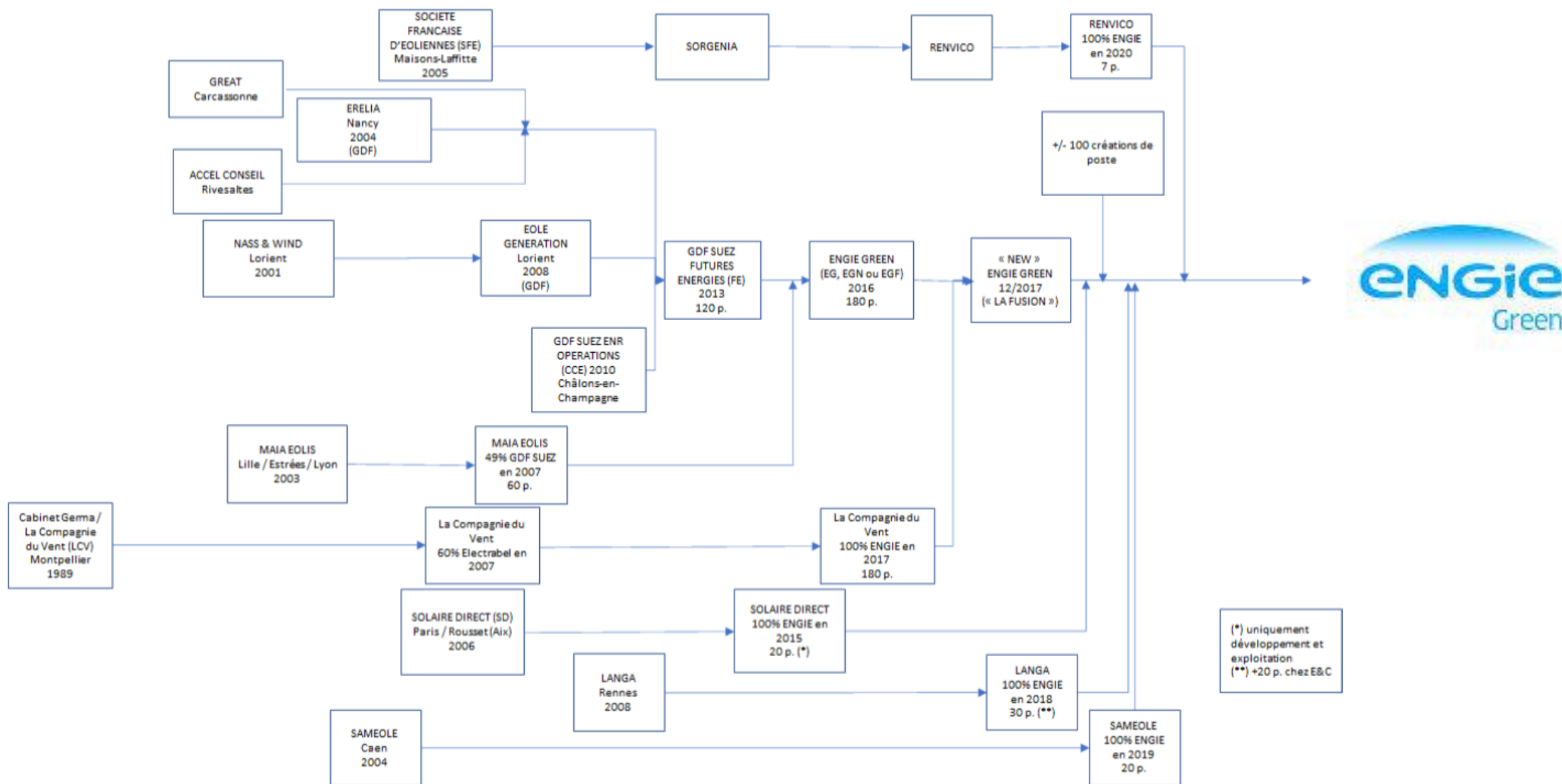
- 20 agences implantées au cœur des territoires
- Une équipe multidisciplinaire de plus de 600 collaborateurs basés en régions
- Des interlocuteurs de terrain aux côtés des acteurs locaux, de la prospection de projets à l'exploitation-maintenance des sites
- Une approche sur-mesure, durable et responsable associant développement économique, valorisation des territoires et préservation de la biodiversité
- Une expertise complète au service de solutions innovantes

Nos 3 priorités d'énergéticien responsable sont :



***Puissance installée ENGIE Green en France par technologie et localisation des agences**

Arbre généalogique d'ENGIE Green

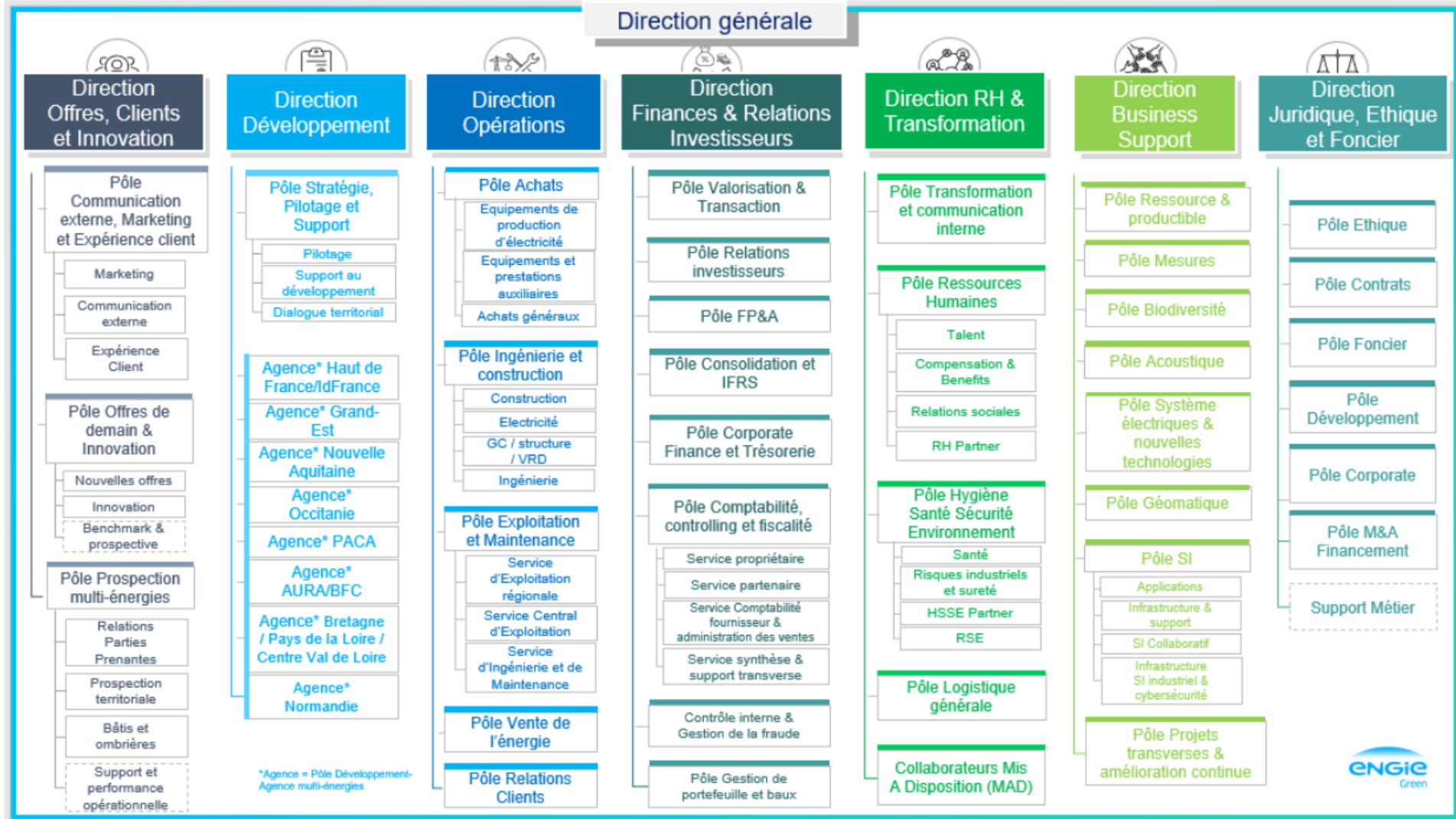


Vie d'un projet éolien

Eventuels recours administratifs : 2 à 4 ans



Organisation ENGIE Green



Les métiers de l'éolien

Eventail de postes et compétences liées à l'éolien

Développement de projet

- Chef de projet prospection
- Chef de projet développement
- Chargé d'affaire foncier
- Relations territoriales

Financement & Construction

- Chef de projet transaction & valorisation des projets
- Chef de projet construction
- Ingénieur/technicien raccordement
- Chargé d'études et travaux

Exploitation / Maintenance

- Chargé d'exploitation
- Superviseur de parcs
- Ingénieur/technicien maintenance
- Asset manager

Support transverse et expertise technique

- Ingénieur SIG
- Dessinateur-projeteur
- Ingénieur/technicien mesures
- Expertise technique : Vent, Acoustique, Biodiversité, Mécanique, Electrique, Statistique/Datacience
- Achats métiers
- Ressource Humaines
- Service SI
- Services comptabilité, logistique, communication, achats



2

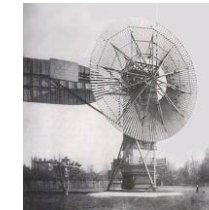
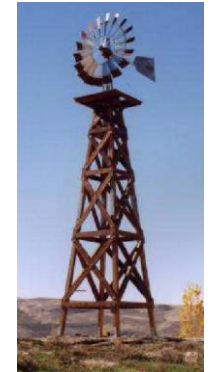
L'éolien en France : enjeux et trajectoire de développement

Historique du développement de l'éolien

Un principe vieux de plusieurs siècles, mais une énergie récente

Quelques dates majeures

- Moyen-Âge : développement des moulins à vent en Europe
- XIXème siècle : déploiement massif des pompes à vent aux Etats-Unis
- Premières éoliennes électriques : fin du XIXème / début du XXème siècle
- Fin des années 1970 : essor de l'éolien au Danemark et aux Etats-Unis
- 1991 : première éolienne en France. Première éolienne offshore au Danemark.
- Années 2000 : début des tarifs réglementés en France
- 2012 : Premier appel d'offre pour la construction d'un parc offshore
- 2023 : premier parc offshore en France ?

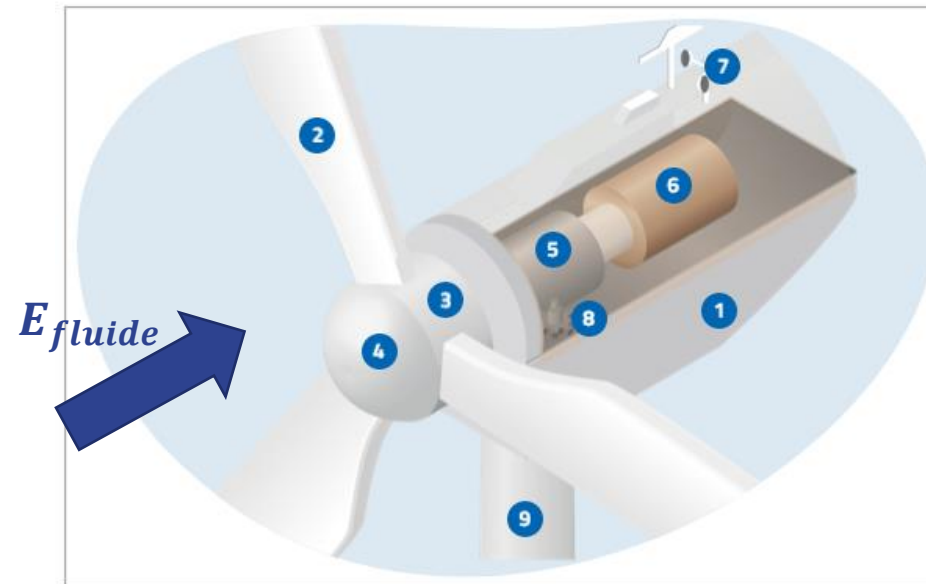


Principe de fonctionnement d'une éolienne

Etapas de conversion de l'énergie

Une éolienne permet de convertir l'énergie cinétique d'un fluide (le vent) en énergie électrique

- Etape 1 : capture de l'énergie cinétique du fluide par les pales
- Etape 2 : conversion en énergie mécanique de rotation
- Etape 3 : accélération de la vitesse de rotation
- Etape 4 : conversion de l'énergie mécanique de rotation en énergie électrique par la génératrice
- Etape 5 : augmentation de la tension du courant dans un transformateur avant d'envoyer l'électricité sur le réseau



- 1 NACELLE
- 2 PALES
- 3 MOYEU
- 4 ROTOR
- 5 BOÎTE DE VITESSES
- 6 GÉNÉRATEUR
- 7 ANÉMOMÈTRE ET GIROUETTE
- 8 DISPOSITIF D'ORIENTATION
- 9 MÂT

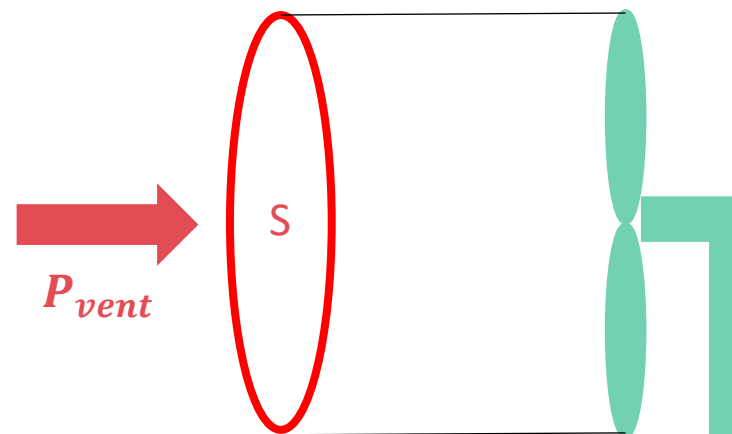
La courbe de puissance

Lien entre la puissance du vent et la puissance électrique

Puissance du vent à travers une surface S : $P_{vent} = \frac{1}{2} \rho S V^3$

Pour avoir la puissance électrique fournie par l'éolienne, on ajoute simplement un facteur de conversion C_p :

$$P_{eolienne} = \frac{1}{2} \rho S V^3 C_p$$



Quelle est approximativement l'efficacité maximale $C_{p_{max}}$ des éoliennes modernes ?

● Loi de Betz : $C_p < \frac{16}{27} \approx 59\%$

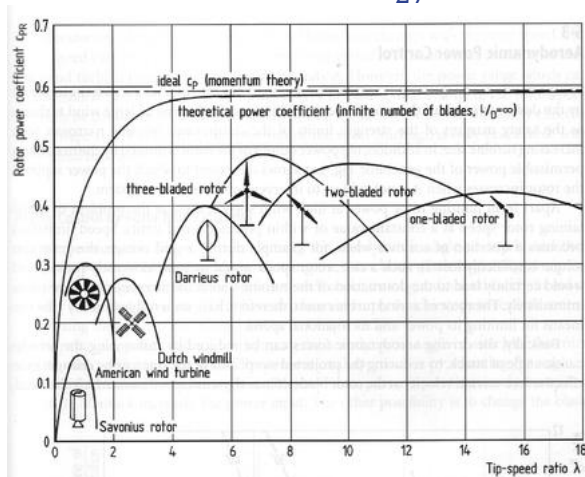
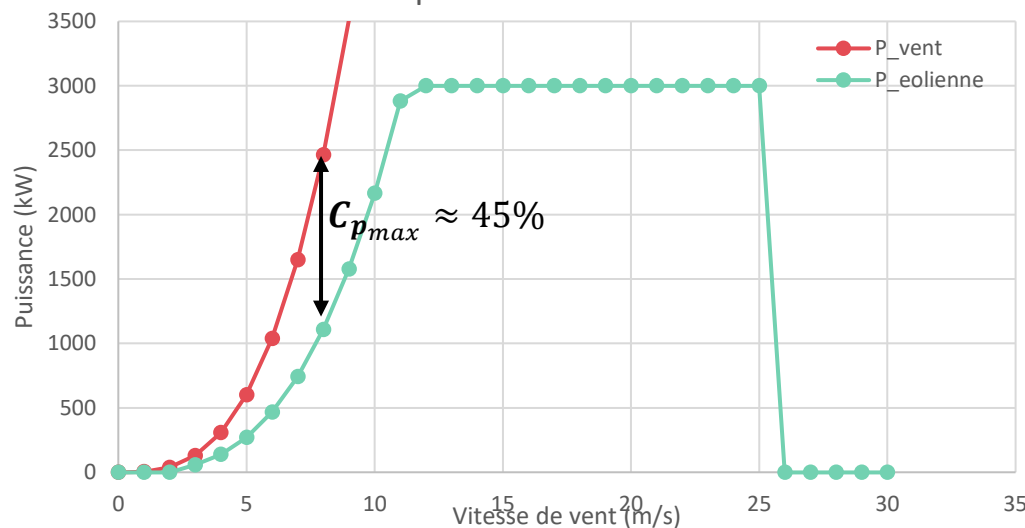


Figure 5.10. Power coefficients of wind rotors of different designs [2]

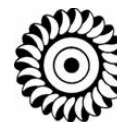
Courbe de puissance d'une éolienne



Nucléaire :
~ 33%



Solaire PV :
~ 20%



Hydraulique :
~ 90%

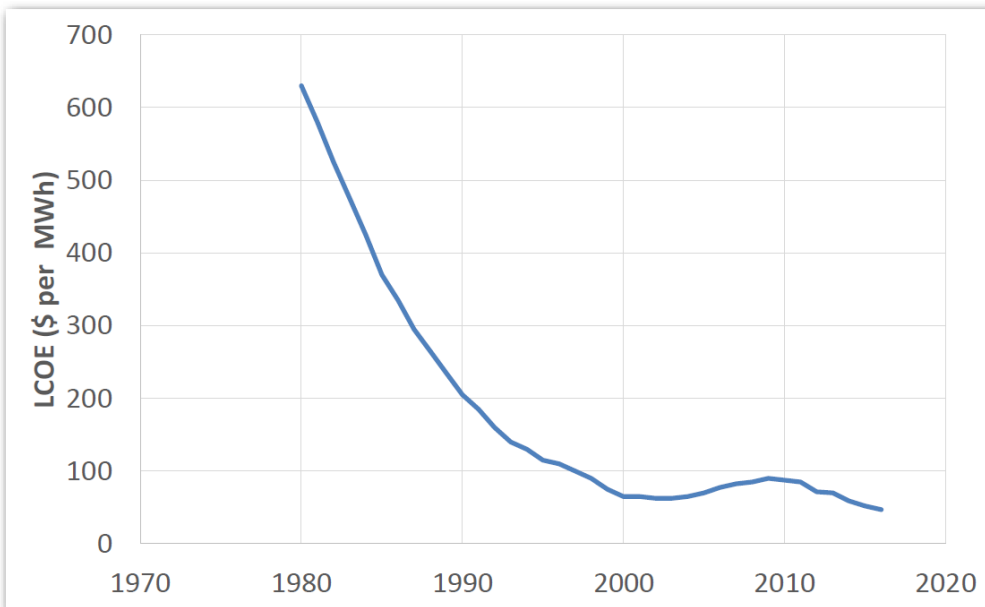


Thermique :
~ 30 – 60 %

P_{eol}

L'éolien, une énergie de moins en moins chère

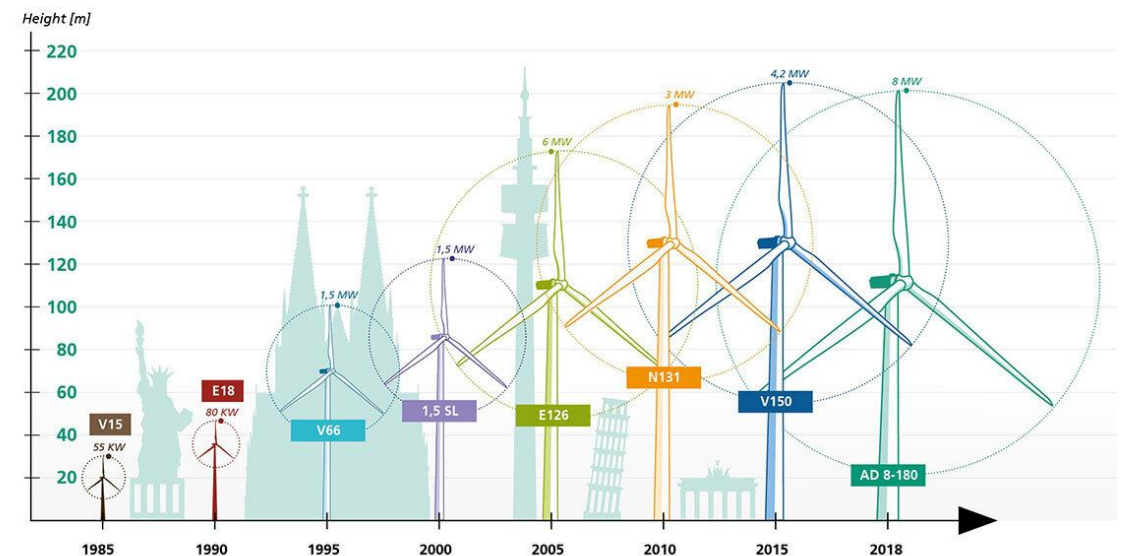
- Evolution des coûts actualisés de l'énergie (LCOE) éolienne aux USA depuis les années 1980



Source: 1980-2011: "Revolution Now", DoE, 2016; 2012-2016: Lazard

- Dernier appel d'offre onshore (France) : 59 € / MWh
- Dernier appel d'offre offshore (France) : 44 € / MWh
- Coût de l'électricité nucléaire historique : 42 € / MWh

- Evolution de la taille des éoliennes depuis 1980



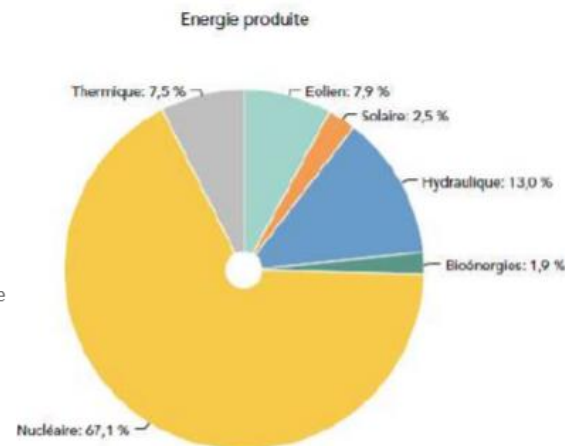
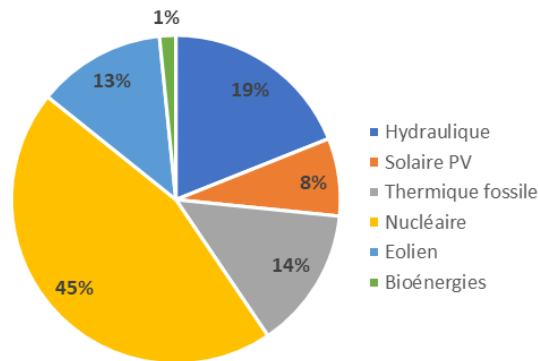
- Augmentation de la taille et de l'efficacité des pales
- Effets de volume / industrialisation des procédés
- GE Haliade X – 12 MW / rotor d'un diamètre de 220 m

L'éolien en France

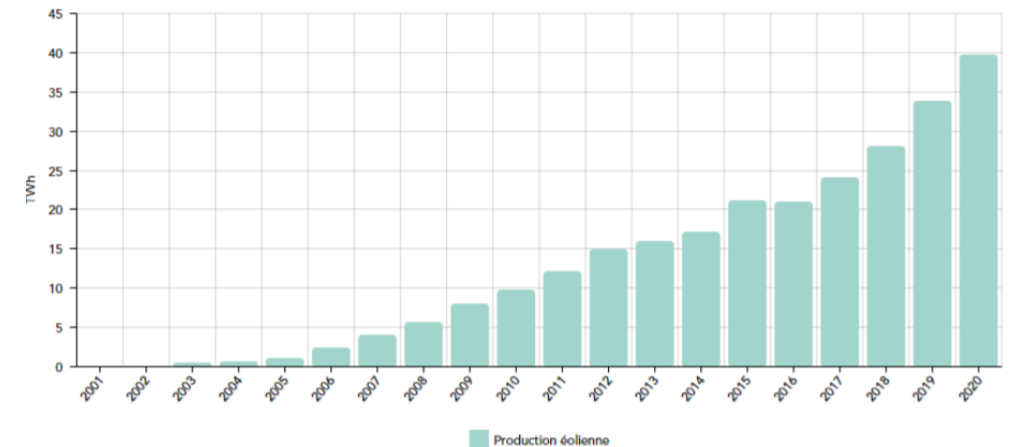
Chiffres et Enjeux

L'éolien occupe une place de plus en plus importante dans le mix électrique français

Puissance électrique installée par filière en France (fin 2020, source RTE)



Evolution de la production éolienne



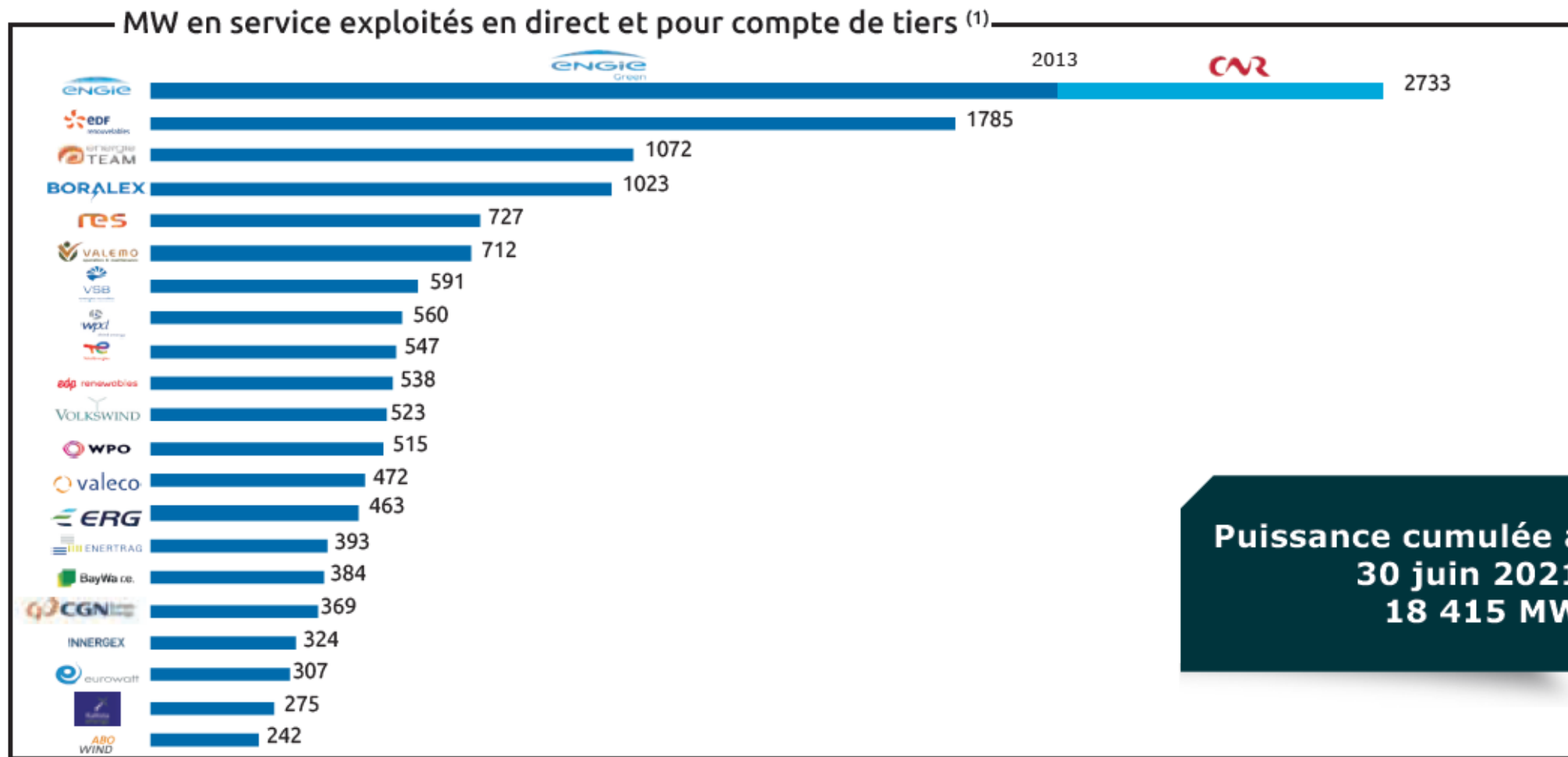
<https://www.rte-france.com/actualites/bilan-electrique-francais-2020>

Comme toute filière énergétique industrielle, elle est confronté à un certain nombre d'enjeux

- + Energie renouvelable
- + Energie décentralisée et disponible partout
- + Peu dangereuse
- + De plus en plus compétitive
- + Faible occupation de l'espace au sol
- Impact acoustique
- Impact paysager/visuel
- Impact environnemental
- Reste plus cher que le nucléaire historique
- Variabilité temporelle

L'éolien en France

Principaux acteurs



Source : Etude FEE, 2021

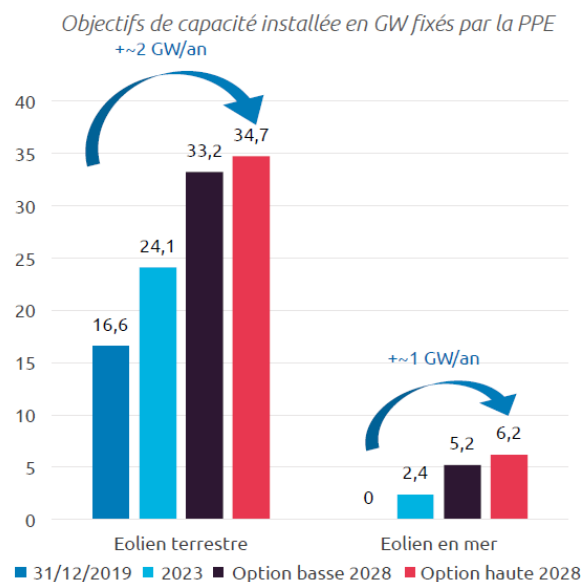
ENR les MW sont exploités à hauteur de 502 MW par Energieteam et 128 MW par Engie Green, le reste par des tiers.

L'éolien en France

Perspectives de développement court-terme

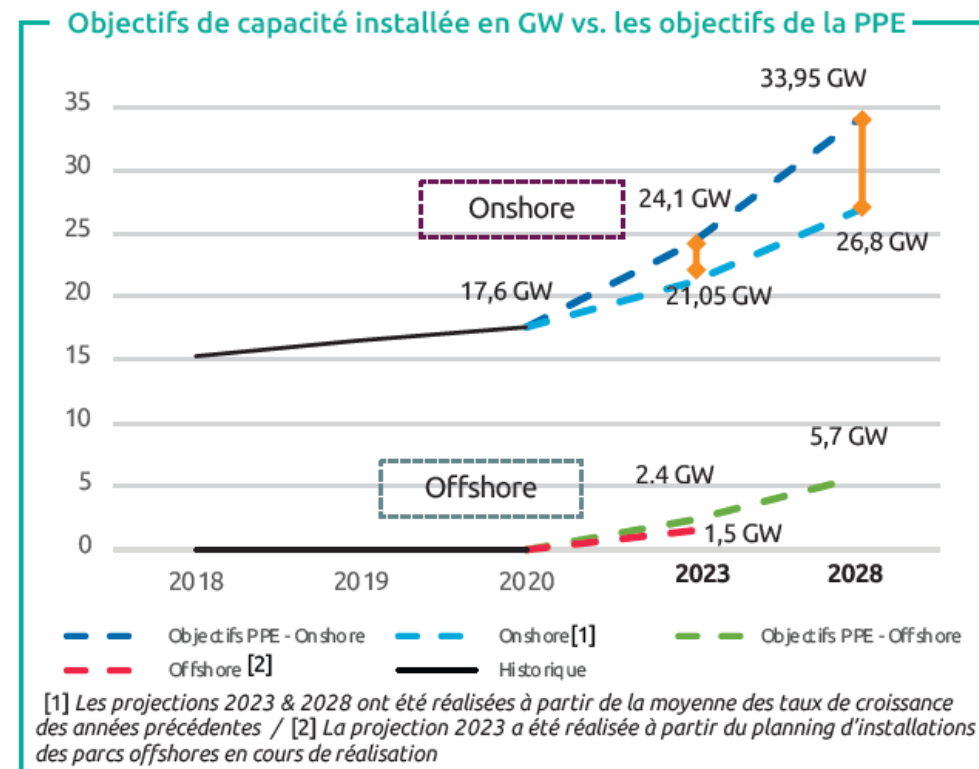
Nouveaux objectifs de la programmation pluriannuelles de l'énergie (du 23 avril 2020)

- x 2 sur la capacité éolien onshore
- x 2.5 sur la capacité éolien offshore



D'après l'observatoire de l'éolien (septembre 2020) :
<https://fee.asso.fr/pub/observatoire-de-leolien-2020/>

Mais en pratique, des objectifs qui peinent à être réalisés...

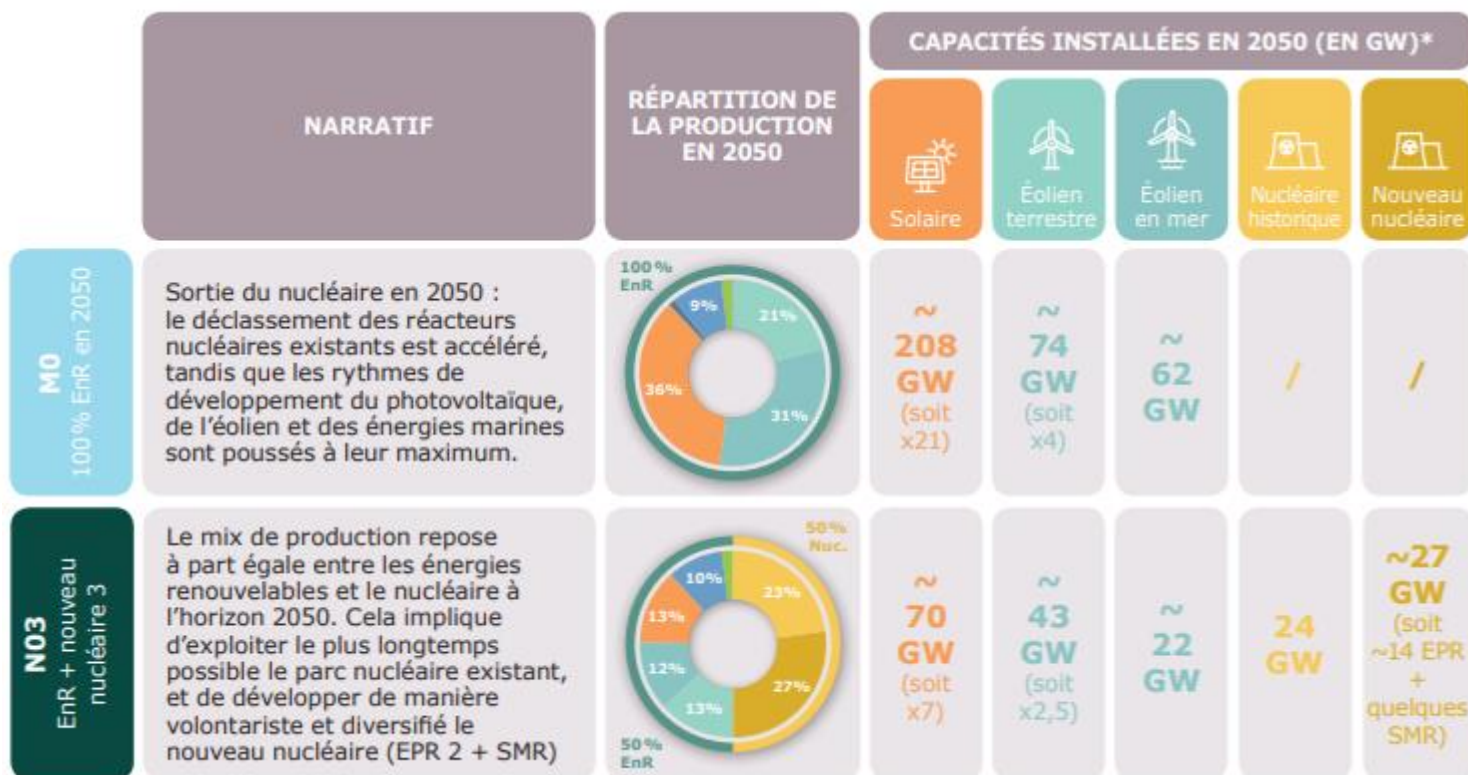


D'après l'observatoire de l'éolien (septembre 2021) :
<https://fee.asso.fr/actu/observatoire-de-leolien-2021/>

L'éolien en France

Perspectives de développement long-terme

En octobre dernier, RTE a proposé 6 scénarios différents pour le futur mix électrique français de 2050, respectant la neutralité carbone. Ci-dessous les deux scénarios les plus extrêmes



Rappel des chiffres (juin 2021) :

- Eolien terrestre : 18 GW
- Eolien en mer : 2 MW

→ Besoins de développement d'ici 2050 :

- Eolien terrestre : + 25 – 56 GW
- Eolien en mer : + 22 – 62 GW

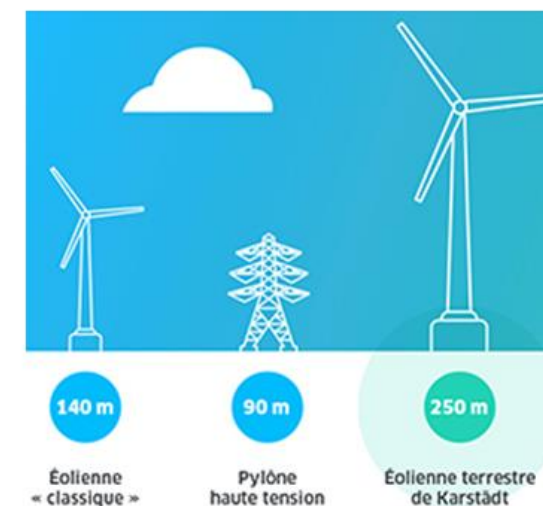
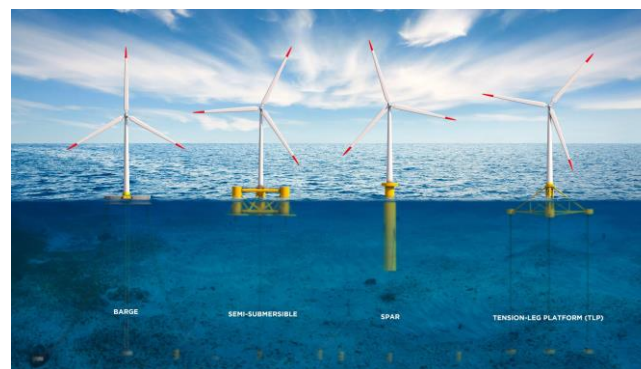
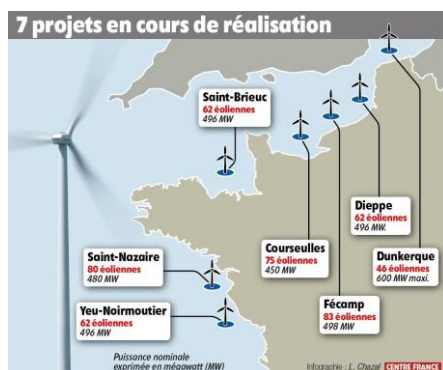
<https://www.rte-france.com/analyses-tendances-et-prospectives/bilan-previsionnel-2050-futurs-energetiques>

L'éolien en France

Enjeux pour le futur

Un fort développement des énergies renouvelables est attendu pour 2050, en particulier pour l'éolien et le solaire photovoltaïque. Comment suivre une telle trajectoire ?

- Renouvellement des parcs en fin de vie par de nouvelles éoliennes plus récentes
- Développement de l'éolien offshore et en particulier de l'éolien flottant



- Meilleure acceptation sociale de l'éolien → réduction des recours et des temps de développement
- Réduction des contraintes techniques requises pour l'implémentation d'un parc éolien → ouverture de nouvelles zones propices à l'implémentation de nouveaux projets

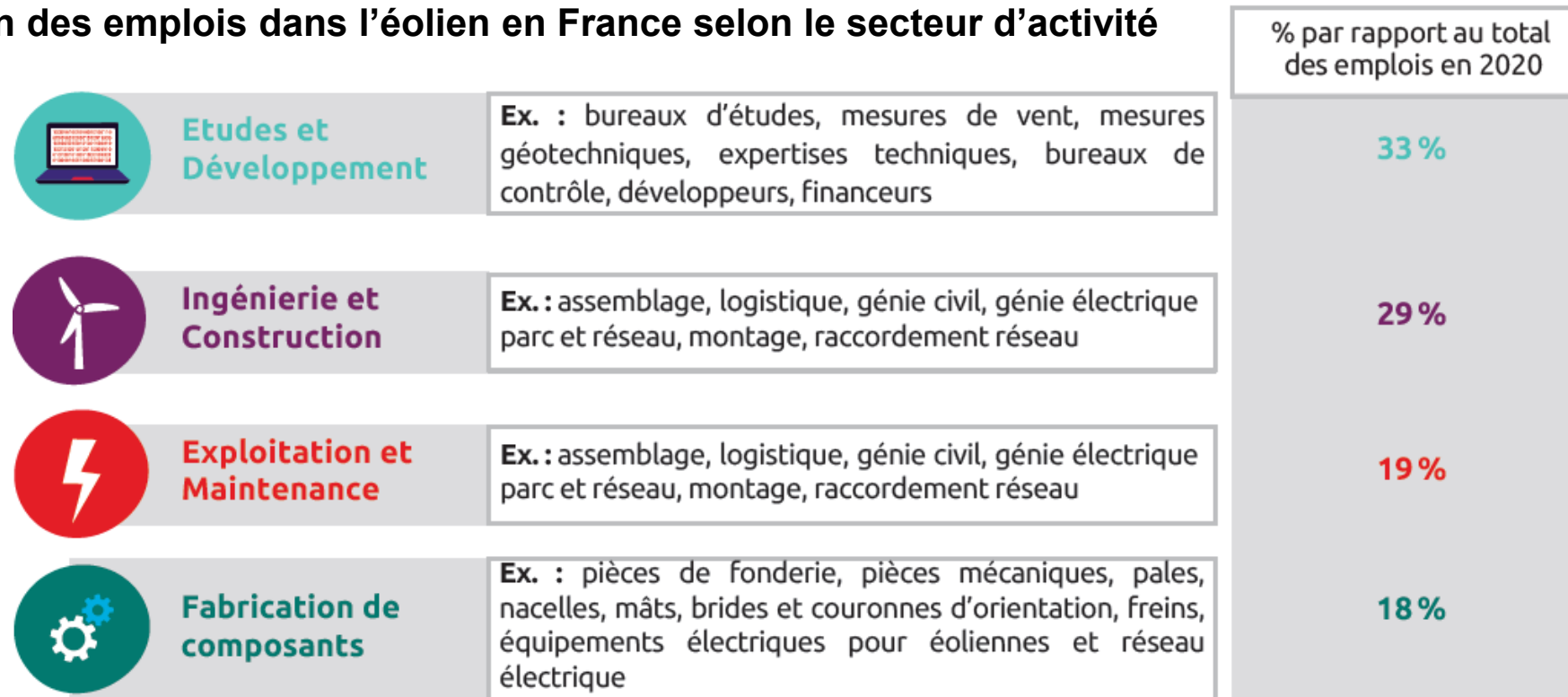


3

Ingénieur dans l'éolien

Ingénieur Etudes et Modélisation

Répartition des emplois dans l'éolien en France selon le secteur d'activité



➔ Le métier d'ingénieur d'études & développement est le plus répandu (1/3 des emplois concernés par l'éolien)

D'après l'observatoire de l'éolien (septembre 2021) : <https://fee.asso.fr/actu/observatoire-de-leolien-2021/>

Ingénieur d'étude vs Ingénieur recherche

Exemple d'activités

- Analyse / mesure de la ressource en vent sur un site
 - Estimation du productible d'un parc éolien
 - Etude d'impact acoustique d'un parc éolien
 - Optimisation du raccordement électrique d'un parc éolien
 - Analyse de la performance d'une éolienne / d'un parc éolien
- Développement d'outils et d'algorithmes innovants
 - Planification d'expérimentations terrain
 - Veille technologique
 - Présentation de résultats au cours de conférences
 - Participation à des projets de recherche européens

Compétences requises

- Compétences techniques dans son domaine d'étude
 - Maîtrise des logiciels métiers nécessaire pour les études
 - Rigueur dans l'application d'un processus
 - Être capable de bien apprécier les particularités de chaque projet
 - Disponibilité et conseil auprès de ses « clients »
- Solides connaissances techniques et scientifiques
 - De bonnes notions de code et algorithmique
 - Esprit d'initiative & prise de recul, rigueur scientifique
 - Communication
 - Anglais (écrit à minima) : langue de la recherche !

Ingénieur d'étude vs Ingénieur recherche

Présence suivant la taille de l'entreprise

**Petites – Moyennes entreprises
(10 – 50 personnes)**



Un ou deux ingénieurs d'étude avec un rôle multidisciplinaire

- Etudes acoustiques
- Mesures de vent
- Etudes de productible
- Etudes électriques
- Analyses de performances

Pas d'ingénieur recherche dédié

**Grandes entreprises
(> 50 – 100 personnes)**



Plusieurs services spécialisés dans chaque type d'études

- 1 service acoustique
- 1 service mesures
- 1 service productible
- 1 service systèmes électriques
- ...

Généralement un ou deux ingénieurs recherche selon la taille du service

**Bureaux d'études spécialisés
(taille variable)**



Spécialisés dans 1 ou 2 type d'études, ils fournissent des prestations de service

- BE acoustique
- BE mesures
- BE productible
- BE biodiversité
- ...

En fonction de la taille du BE, celui-ci peut avoir un service R&D dédié

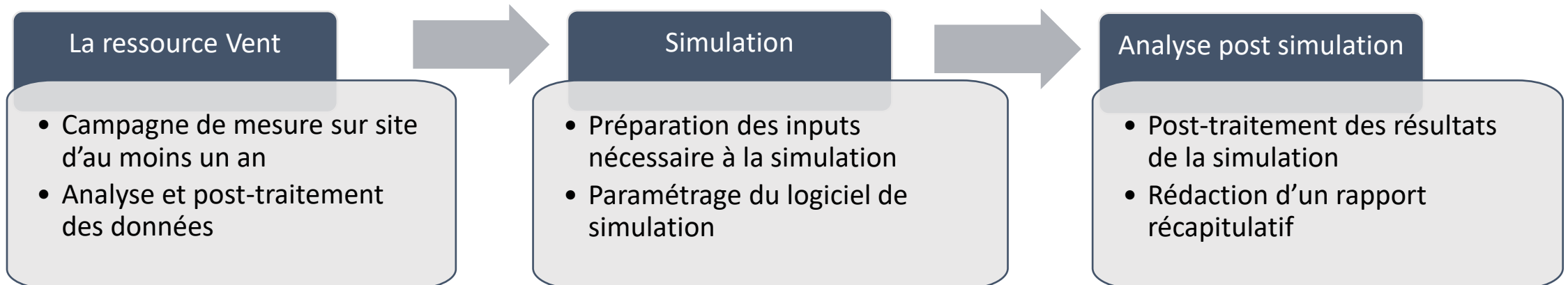
→ Selon le type d'entreprise, les fonctions de l'ingénieur seront très différentes !

Zoom sur l'étude de vent

Principe et objectifs

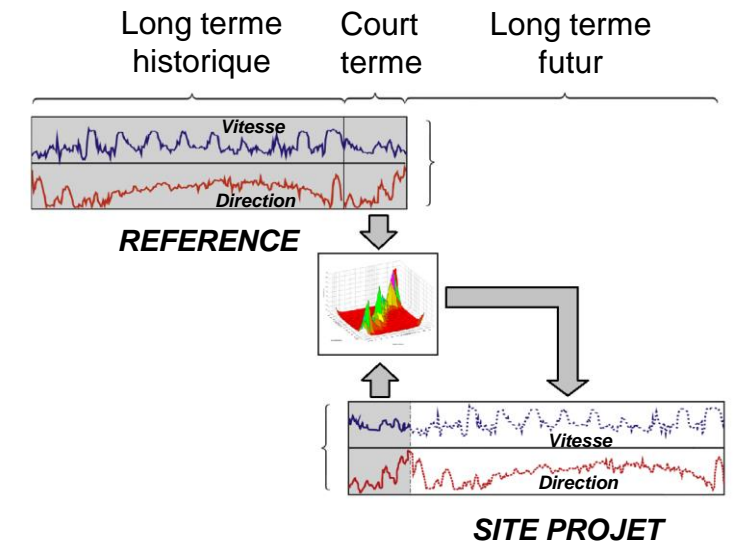
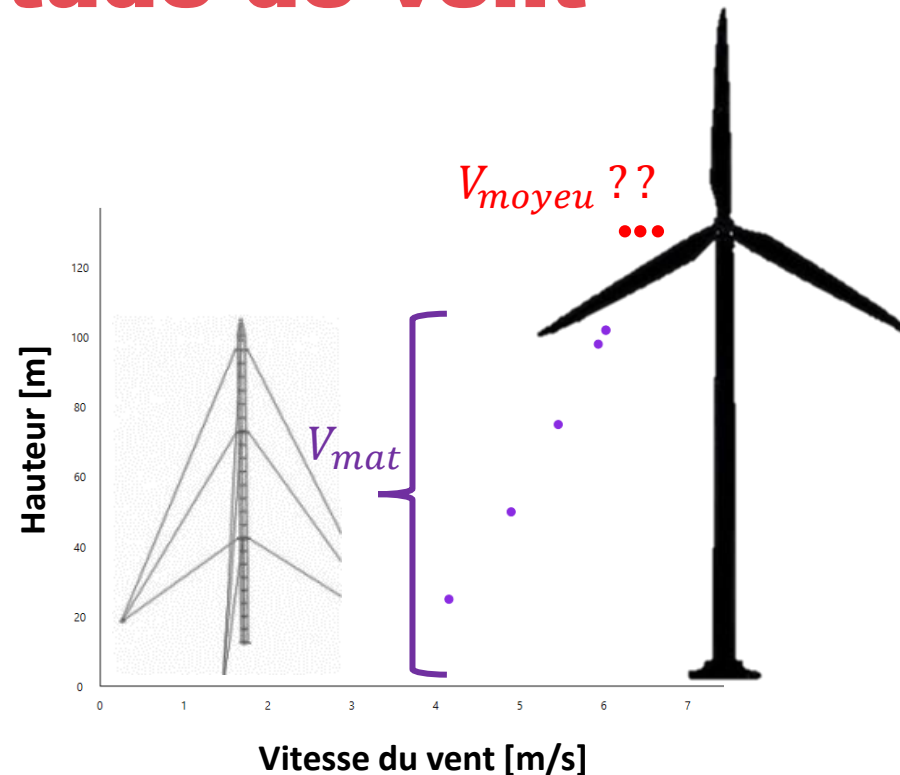
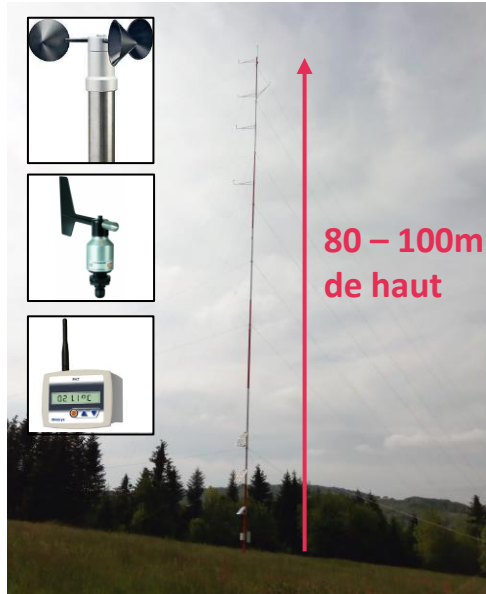
L'étude de vent (ou étude de productible éolien) est un type d'étude très répandu dans le domaine de l'éolien. Son objectif est d'estimer la ressource en vent d'un site et la production d'électricité annuelle d'un parc actuellement en développement.

Son processus passe par les étapes suivantes :



Zoom sur l'étude de vent

La ressource en vent



- Campagne de mesure du vent pendant une période d'au moins un an

- Analyse des conditions de vent sur site et extrapolation verticale des mesures

- Ajustement long-terme de la ressource en vent

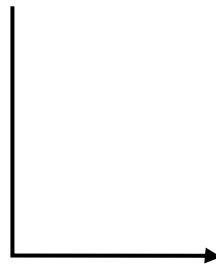
A la fin de cette étape, l'ingénieur d'étude dispose d'une ressource en vent représentative du long-terme, à l'emplacement du mat de mesure.

Zoom sur l'étude de vent

Pertes et incertitudes

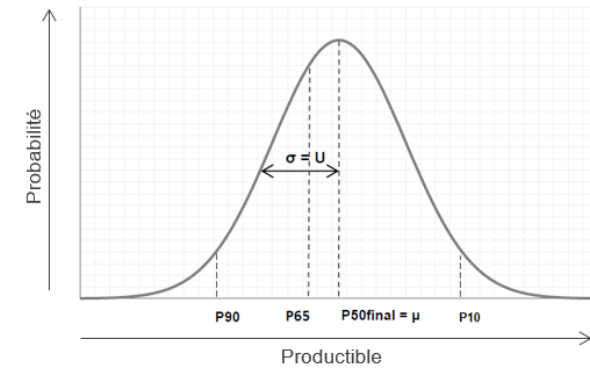
- Prise en compte des pertes d'exploitation du projet éolien

En moyenne, un parc éolien perd 20% de sa production d'électricité



V138-3MW	
Pertes Environnement	
Pertes gel (icing stand still)	99.9
Pertes dégel De-icing system	99.9
Pertes dues à l'hystérésis High wind hysteresis	100
Pertes bridage acoustique Curtailment(de-rating or stop of the turbine noise)	90.3
Autres pertes par bridage Other curtailment	98
Sous total pertes environnement	88.31%
Pertes Electriques	
Pertes électriques (effet Joule) Electrical losses	98
Pertes dues à la foudre Lightning stand still	100
Pertes dues à la consommation des éoliennes Own consumption	100
Sous total pertes électriques	88.31%
Total pertes environnement et électriques	86.55%
Indisponibilités - Opérations et Maintenance	
Maintenance préventive Scheduled WTG maintenance	99.85
Maintenance du poste de livraison Substation maintenance	99.97
Maintenance corrective WTG only losses(incl. unscheduled WTG interventions)	96
Fonctionnement de l'éolienne (redémarrage après arrêt, vent nul) WTG unavailability due to operational events	99
Pertes dues au réseau interne du parc éolien Internal grid unavailability	99.7
Pertes dues au réseau externe (inclus la déconnexion réseau) External grid unavailability(incl. grid congestion)	100
Indisponibilité suite à la perte de la communication Unavailability telecom	99.7
Pertes dues aux visites d'inspections Inspections and visits	100
Pertes de performance dues à la salissure des pales Rotor blade soiling/degradation	100
Sous - performances pour cisaillement et turbulence Windflow turbine performance	98.55
Total indisponibilités	92.93%
Total pertes et indisponibilités	80.43%

- Prise en compte de l'incertitude de l'étude et calcul des productibles « probabilisés »



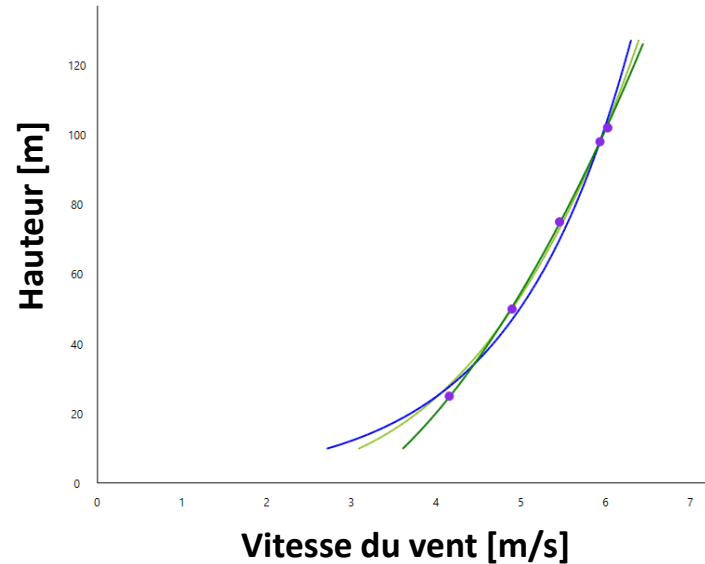
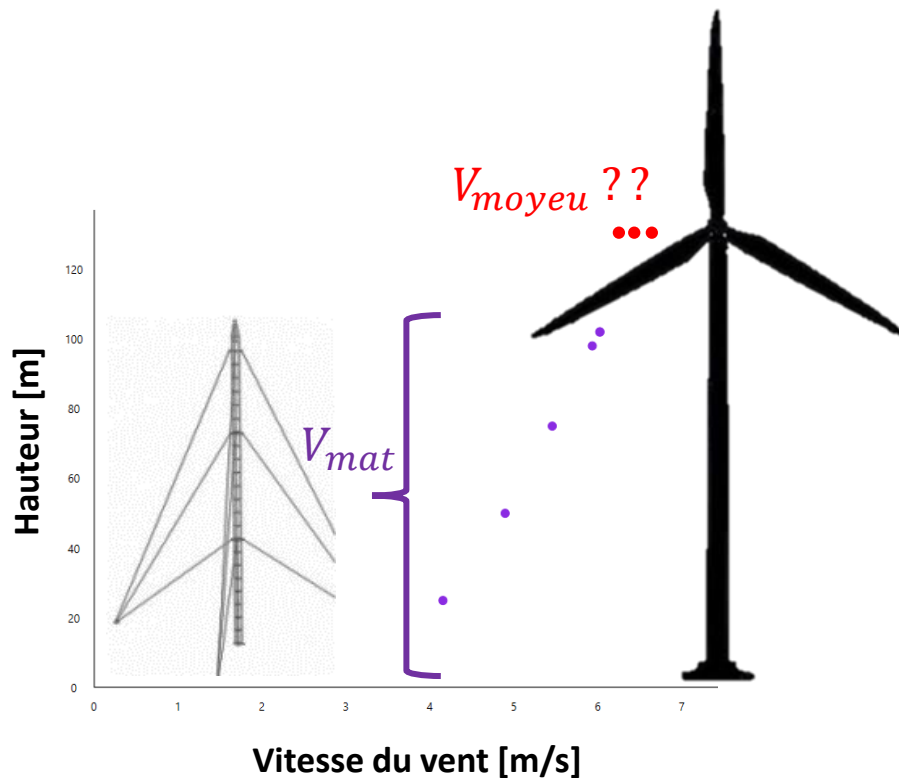
- P50 : le productible que le parc a 50% de chance d'atteindre (≈ estimation la plus probable)
- P90 : le productible que le parc a 90% de chance d'atteindre (≈ estimation plus conservatrice)

A la fin de cette étape, l'ingénieur d'étude dispose de la production annuelle nette du parc éolien, et de l'incertitude associée à ce chiffre. Ce sont ces estimations qui sont utilisées pour calculer la rentabilité d'un projet éolien.

Un exemple de sujet R&D

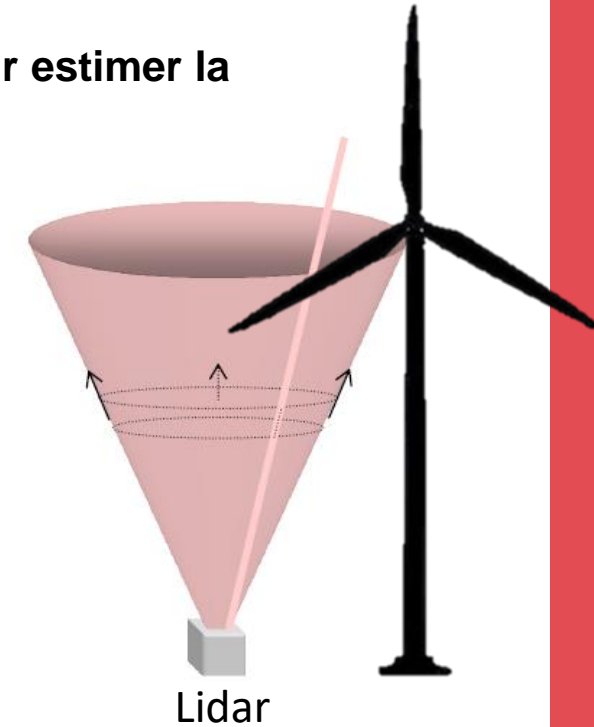
Extrapolation verticale du vent

Comment extrapoler les mesures de vent obtenues grâce à un mât de 80m de haut pour estimer la ressource en vent d'une éolienne de 110m de haut ?



Lois « physiques » ou « empiriques »

- Profil logarithmique
- Loi de puissance



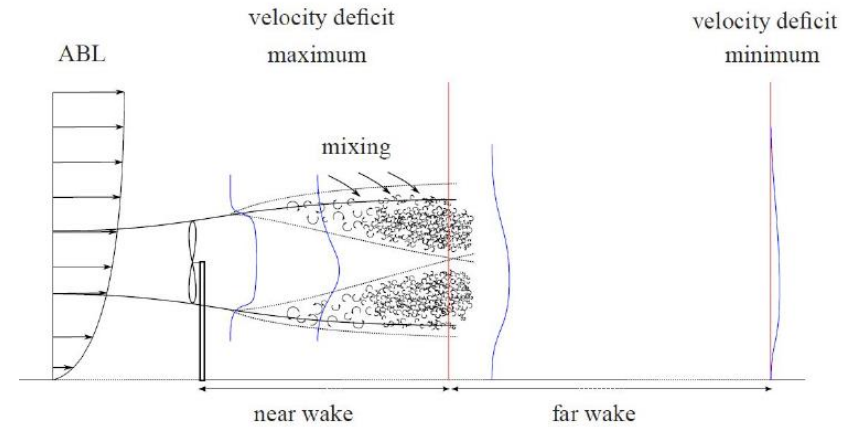
Modèles statistiques

- Apprentissage sur la base de données

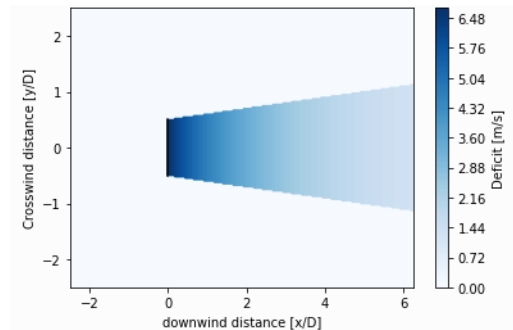
Un autre exemple de sujet R&D

Modélisation des sillages

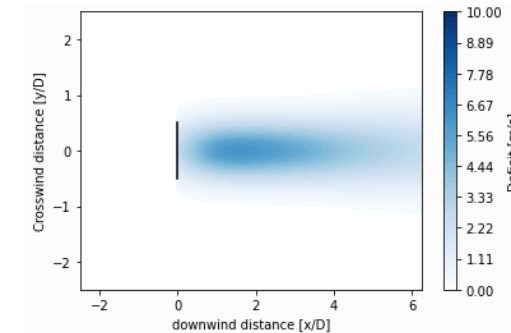
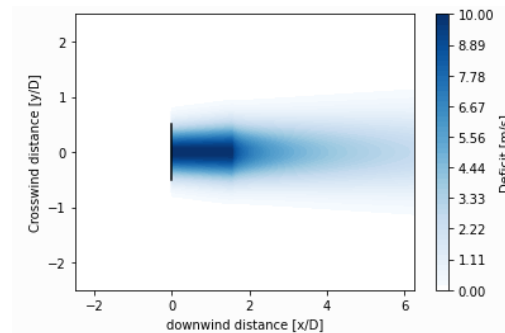
Quel est le meilleur modèle permettant de simuler le phénomène de sillage ?



● **Modèle de Jensen (1983 – 1986)**



● **Modèles gaussiens (2014 – ...)**





Conclusion

Conclusion

L'éolien, une énergie renouvelable jeune et dynamique

- Secteur des énergies renouvelables très dynamique à l'embauche
- Un large éventail de métiers divers et variés
- L'offshore devrait bientôt s'accélérer en France

Très forte diversité de métiers associés à cette énergie.

- Métier d'expert technique ou d'ingénieur d'étude lui-même très varié selon le type d'entreprise
- Tout un autre éventail de métiers lié au développement, au financement, à la construction de projets éoliens et à l'exploitation/maintenance de parcs déjà construits
- Le secteur de la recherche dans l'éolien est lui aussi très actif

⇒ **Le choix d'une spécialisation dans l'énergie et les fluides me paraît très pertinent !**



Merci pour votre attention

Pour me contacter :
thomas.duc@engie.com