



Observatoire Europe-Afrique 2030

Fiche « Chaîne de valeur »

Fiche n°4

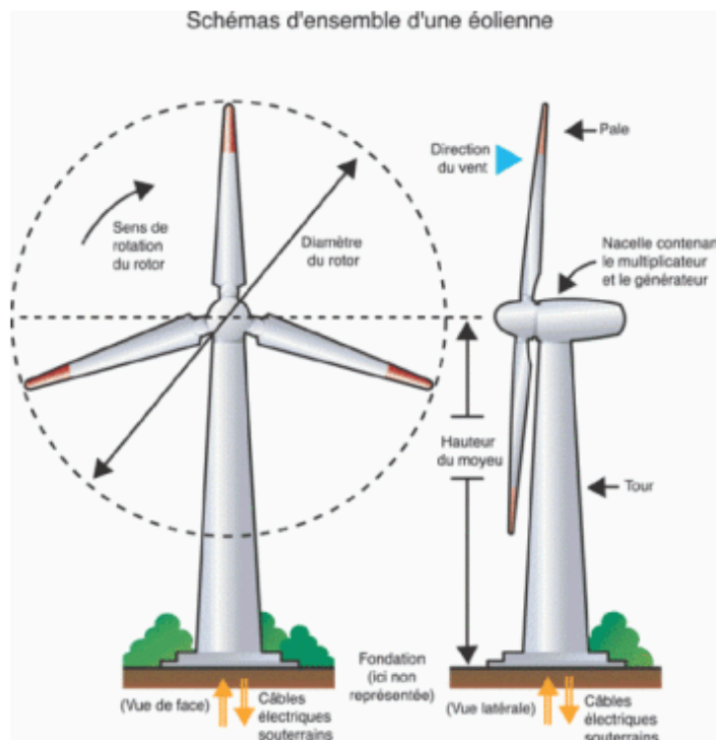
Ferme éolienne

Table des matières

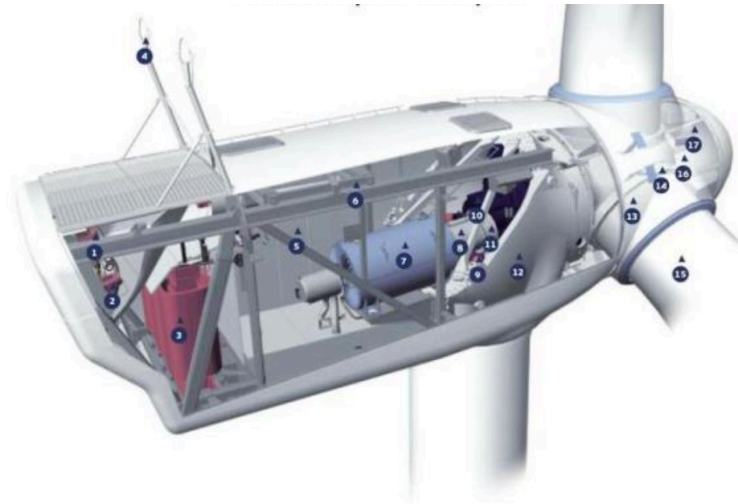
1.	<i>Éléments constitutifs d'une éolienne</i>	2
2.	<i>Coût d'investissement d'une éolienne</i>	4
3.	<i>Chaîne de valeur</i>	6
4.	<i>Sources d'information</i>	7

1. Eléments constitutifs d'une éolienne

Une centrale éolienne, parc éolien, ou ferme éolienne est une installation industrielle de plusieurs éoliennes produisant de l'électricité.



Vue en coupe d'une nacelle



- | | | | |
|---|--------------------------|----------------------|----------------------------|
| 1 Système de refroidissement | 6 Pont roulant | 11 Frein mécanique | 16 Vérin de réglage de pas |
| 2 Système de refroidissement de l'alternateur | 7 Alternateur OptiSpeed® | 12 Châssis | 17 Régulateur du moyeu |
| 3 Transformateur | 8 Couplage composite | 13 Roulement de pale | |
| 4 Anémomètre et girouette ultrasoniques | 9 Moteur d'orientation | 14 Moyeu | |
| 5 Régulateur supérieur VMP avec convertisseur | 10 Multiplicateur | 15 Pale | |

Cliquez pour agrandir (nouvelle fenêtre)

L'hélice transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en couple mécanique. Elle est composée de pales portées par un moyeu. La plupart des éoliennes industrielles actuelles sont équipées de trois pales. Lorsque la vitesse du vent dépasse celle qui correspond à la puissance nominale, un système de régulation contrôle et dégrade le rendement de l'hélice de façon que celle-ci ne capture que la puissance strictement nécessaire. Les pales sont fabriquées à partir de matériaux composites.

La nacelle est l'habitable situé au sommet du mât. Elle est orientable afin que l'angle entre l'axe de l'hélice et la direction du vent soit nul en moyenne. L'ensemble générateur y est installé. Elle contient toute la machinerie transformant la rotation lente des pales en électricité. Cette machinerie permet de superviser l'éolienne : diriger les pales en fonction de la force du vent, arrêter l'éolienne. Des girouettes sont placées sur le toit de la nacelle pour mesurer la direction moyenne du vent. La nacelle est orientable dans l'axe du vent et y est maintenue par une boucle d'orientation motorisée.

L'ensemble générateur, **intégré dans la nacelle, assure deux fonctions** : Transformer le couple mécanique du moyeu tournant en électricité grâce à un générateur électromécanique, et adapter le courant électrique fourni par le générateur aux normes du réseau dans lequel la machine délivre son énergie pour que le couplage (synchronisation des fréquences de la machine et du réseau) soit possible.

Il faut adapter les caractéristiques de la source d'énergie (vent variable et puissances variables) aux besoins du réseau électrique (fréquence fixe, amplitude constante de la tension, puissance demandée variable).

Dans ce cadre, il existe deux grandes familles d'éoliennes :

- **Les éoliennes à couplage direct** (éoliennes à entraînement multiplié et couplage direct au réseau) : un multiplicateur de vitesse est placé entre l'arbre de l'hélice et celui du générateur électromécanique. Il amène la vitesse de rotation de l'hélice de 50 tr/min à 1 500 tr/min, vitesse de rotation nominale des générateurs asynchrones du meilleur rapport qualité/prix. Cette technologie oblige cependant l'hélice à fonctionner à vitesse de rotation constante (à +/- 2%), ne permettant pas d'utiliser au mieux l'énergie du vent.
- **Les éoliennes à couplage indirect** (éoliennes à entraînement direct et couplage au réseau par convertisseur électronique) : le moyeu de l'hélice est relié directement au rotor du générateur électromécanique (générateur synchrone). Comme la vitesse du vent varie, la fréquence de sortie du courant délivré par l'alternateur varie aussi. Pour assurer le couplage avec le réseau de distribution électrique (fréquence et amplitude de la tension fixes), il faut installer un convertisseur redresseur (associé à un onduleur).

Mât (ou tour)

Il porte la nacelle et permet de placer l'axe de l'hélice à une hauteur supérieure à celle de son rayon. Les mats sont généralement de construction tubulaire, tronconique. Ils sont réalisés en associant entre eux des éléments pour boulonnage intérieur de brides. Le diamètre de la base d'une tour est de 5 m et diminue progressivement pour atteindre environ 3 m au sommet. Les tours comportent 3 ou 4 sections. En règle générale, la hauteur du mat est égale au diamètre de l'hélice. Pour les sites très ventés, on peut construire des mats deux fois plus hauts que le diamètre de l'hélice afin d'aller chercher des vents plus forts. Le mât peut contenir une partie des composants électriques et électroniques, en association avec la nacelle.

La tour repose sur des **fondations**, qui pour des éoliennes terrestres, consistent en une assise en béton sur laquelle est fixé l'ensemble de la structure, devant être capable de résister aux tempêtes et aux vents extrêmes. Il faut près de 500 tonnes de béton pour les fondations d'une éolienne de 3 MW.

Au sol, une **cabine de dispersion** permet l'injection du courant produit au niveau de la nacelle dans le réseau électrique. Les éoliennes industrielles actuelles les plus répandues sont les éoliennes tripales, entraînant une génératrice asynchrone.

2. Coût d'investissement d'une éolienne

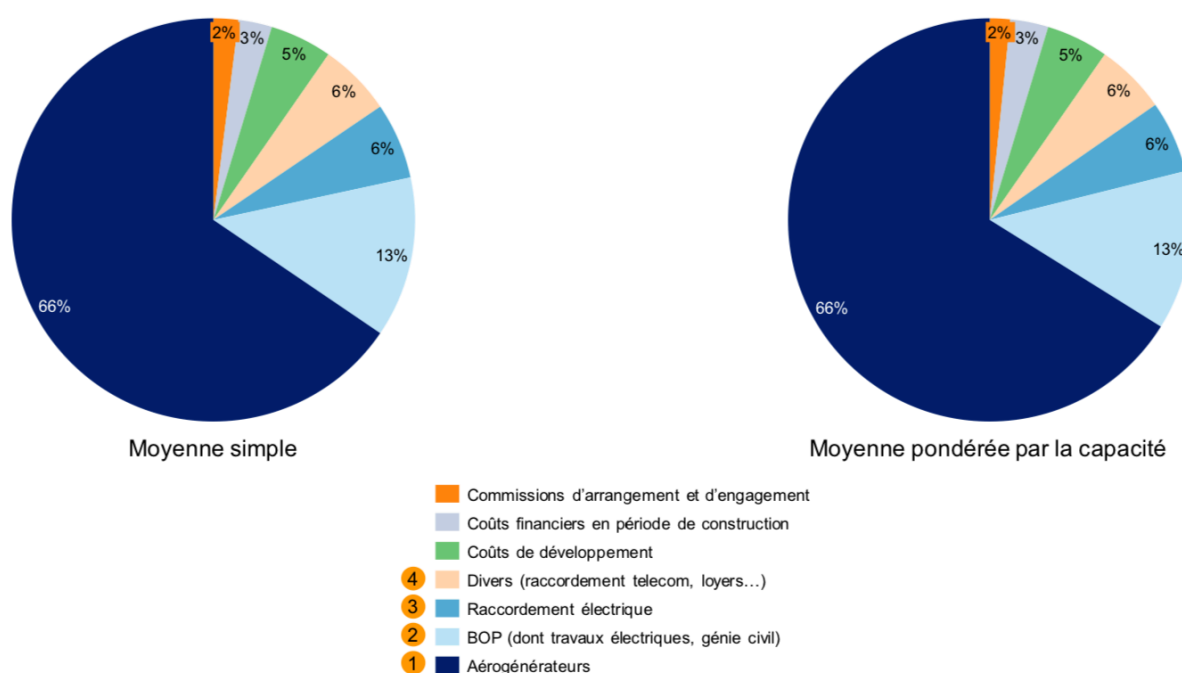
Le coût d'investissement moyen se situe autour de 1,4 M€₂₀₁₆/MW installé, avec la ventilation suivante :

- Fabrication et montage des aérogénérateurs : 66%
- Génie civil et autres infrastructures : 13%

- Raccordement au réseau : 6%
- Le reste est composé des frais divers et des frais financiers pendant la période de construction

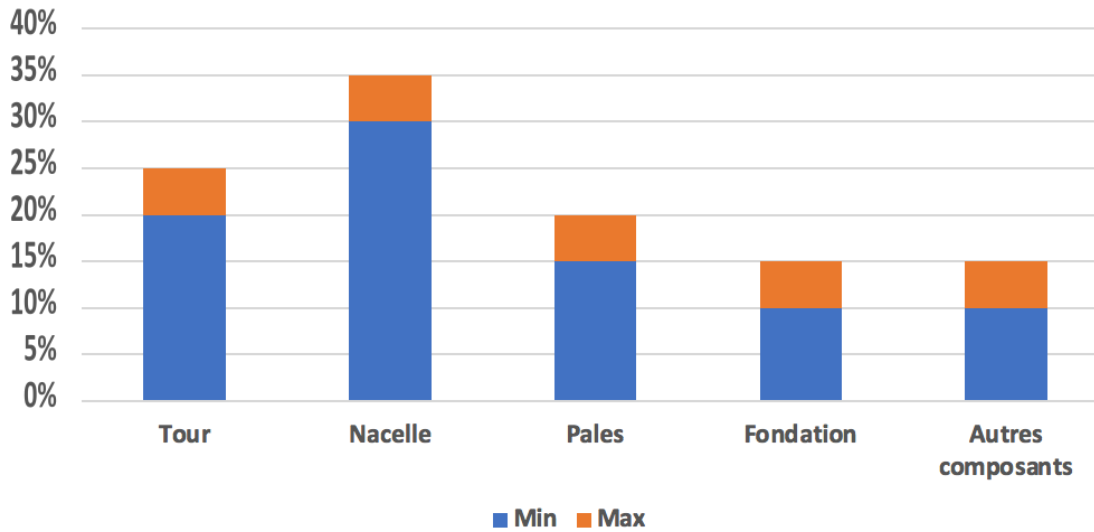
Le coût unitaire des turbines dépend peu de leurs caractéristiques (hauteur, notamment). Il n'y a pas d'effet d'échelle sur les coûts des aérogénérateurs. Le coût unitaire ne décroît pas avec le nombre d'aérogénérateurs installés. Les coûts d'investissement analysés sont proportionnels à la capacité installée : en moyenne 1,4 M€/MW.

Décomposition moyenne des CAPEX des parcs de l'échantillon



Les aérogénérateurs de grande hauteur avec des tailles de pales plus grandes permettent de produire plus d'électricité. Pour autant, leur coût au MW n'est pas plus élevé.

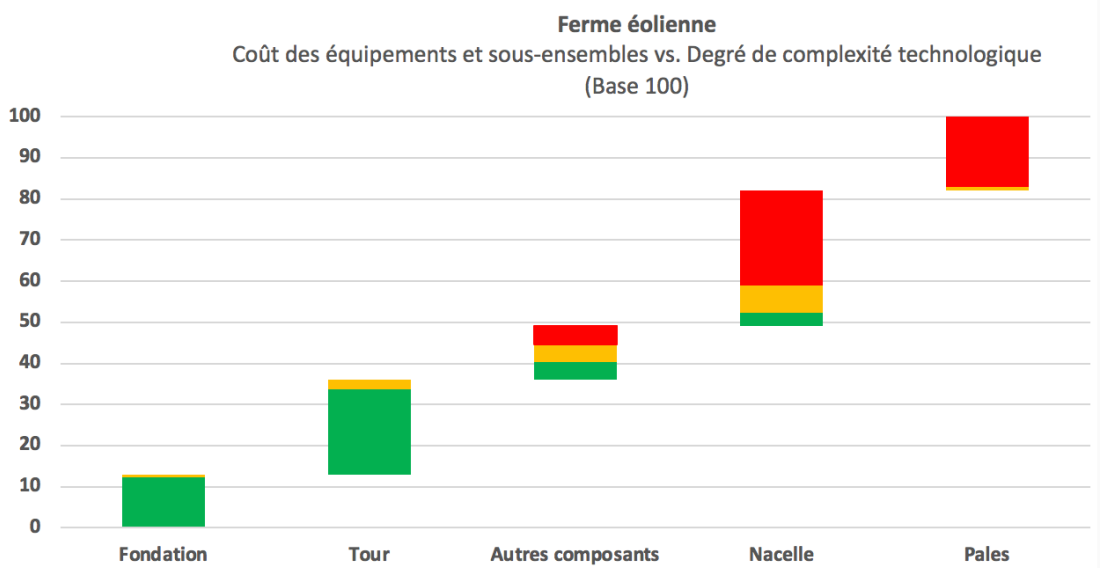
Eolienne industrielle Ventilation du coût des équipements



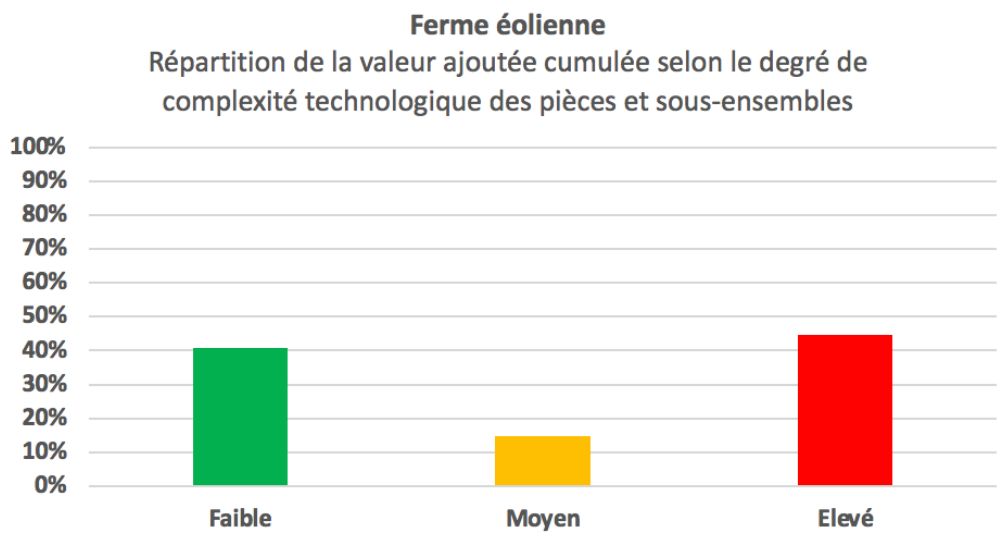
Ces répartitions peuvent varier en fonction de facteurs tels que la taille de la turbine et les exigences spécifiques du projet. Les coûts associés au transport, à l'installation et à la connexion au réseau doivent également être pris en compte.

Pour mémoire, le coût d'une pale d'éolienne industrielle est d'environ 100 000 à 125 000 \$ chacune pour une turbine de 1,5 MW (pale de 34 m à 38 m de longueur) et entre 250 000 \$ et 300 000 \$ chacune pour une turbine de 3 MW (pales 47 m de long).

3. Chaîne de valeur



Source: Observatoire Europe-Afrique 2030. Ces données ont été estimées à partir d'informations bibliographiques. Elles constituent des ordres de grandeur.



Source: Observatoire Europe-Afrique 2030. Ces données ont été estimées à partir d'informations bibliographiques. Elles constituent des ordres de grandeur.

4. Sources d'information

https://uved.univ-perp.fr/module2/co/2-2-3-1-les_constituants.html

https://fee.asso.fr/wp-content/uploads/2016/12/Poyry_FEE_Observatoire_couts_eolien_terrestre_final-1.pdf

<https://www.energie-online.fr/eolien/produits/prix-eolienne.htm>

https://fr.labdageeks.com/wind-turbine-costs/?utm_content=cmp-true

<https://diffusonslascience.fr/combien-coute-une-eolienne/>