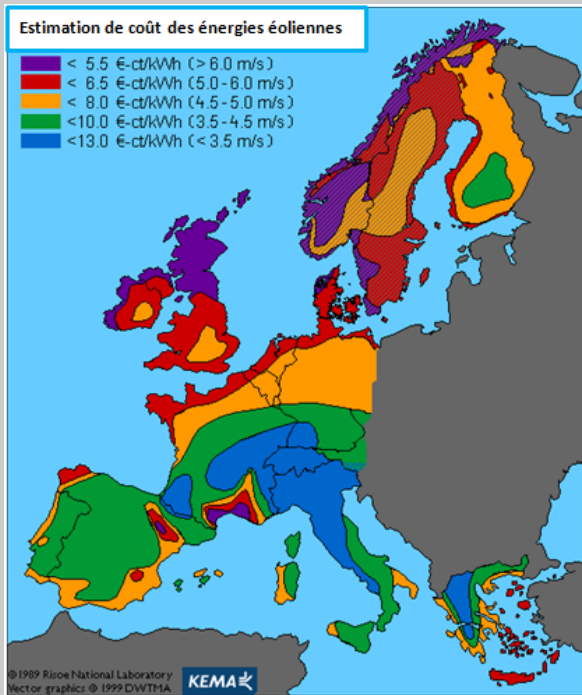


Etude de cas

Ton Van de Wekken

Kema Consulting

Octobre 2010



Développement et utilisation des parcs éoliens

fr.leonardo-energy.org

Table des matières

<u>1.</u>	<u>Notes introductives</u>	<u>4</u>
<u>2.</u>	<u>Etude de faisabilité du projet</u>	<u>6</u>
2.1	Sélection du site et validation des ressources éoliennes .	7
2.2	Etude de faisabilité technique	9
2.3	Validation des principaux risques	9
2.4	Demande d'autorisation aux autorités locales.....	10
2.5	Projet financier	11
<u>3.</u>	<u>Phase de pré-construction</u>	<u>13</u>
3.1	Conception du parc éolien et prédictions de production énergétique	13
3.1.1	Effet de parc.....	14
3.1.2	Pertes réseau.....	14
3.1.3	Disponibilité.....	14
3.2	Obtention de permis	15
3.2.1	Permis environnement	15
3.2.2	Bruit.....	15
3.2.3	Sécurité	15
3.2.4	Permis de construire	15

Développement et utilisation des parcs éoliens

fr.leonardo-energy.org

3.3	Connexion au réseau.....	16
3.4	Contrat d'achat à long terme.....	16
3.5	Choix des fournisseurs.....	16
3.6	Financement du projet.....	17
4.	<u>Phase de fabrication</u>	19
4.1	Vue d'ensemble de la phase de projet.....	19
4.2	Contrôle qualité pendant les phases de construction et de production.....	20
4.3	Inspection des travaux et remise du projet.....	20
5.	<u>Exploitation et maintenance</u>	21
5.1	Exploitation quotidienne.....	21
5.2	Garanties et assurances.....	21
5.3	Maintenance et réparation.....	22
6.	<u>Annexe A : deux exemples de calcul de cash-flow pour un parc éolien de 10 MW</u>	23

Développement et utilisation des parcs éoliens

fr.leonardo-energy.org

1. Notes introductives

De nos jours, la plupart des pays européens ont une bonne connaissance du domaine éolien et de la production d'énergie de nature éolienne. Dans les années 80 et 90, le Danemark et l'Allemagne ont fortement accru leur savoir dans le domaine, notamment grâce à la fabrication et à la mise en production d'un nombre important de turbines éoliennes. L'Allemagne reste à ce jour, et pour la dixième année consécutive, le pays installant le plus grand nombre de turbines éoliennes, suivie de près par l'Espagne. Depuis presque 10 ans, de nombreux pays européens ont mis en place des politiques de promotion des sources d'énergie renouvelable, dont l'énergie éolienne. Ainsi, le Royaume-Uni, la France, l'Italie, les Pays-Bas et certains pays d'Europe de l'Est sont producteurs d'énergie de nature éolienne et apportent de nombreuses aides pour favoriser l'exploitation des sources renouvelables.

Les technologies d'implantation des turbines éoliennes ont énormément changé en 20/25 ans. Dans les années 80, les turbines étaient installées de façon individuelle avec des puissances moyennes de l'ordre de 100 à 500 kW, et les parcs éoliens étaient rares. Politiques locales et autres considérations économiques ont considérablement fait évoluer ces pratiques. Aujourd'hui, la plupart des aides concernent le développement des parcs éoliens. Le nombre moyen de turbines dans un parc éolien est de 25.

Depuis l'année 2000, la puissance des turbines peut aller de 750 kW jusqu'à 3 MW environ. Plusieurs parcs éoliens ont une puissance installée de 50 MW. Les puissances maximales de turbines sont approximativement de 4,5 à 6 MW. Toutefois, ces turbines n'existent que comme prototypes et ne sont pas encore commercialisées.

La plupart des parcs éoliens sont de type onshore, mais de plus en plus de parcs de type offshore font leur apparition. Les parcs offshore ont pour caractéristiques des turbines de plus forte puissance et des coûts d'investissement élevés (environ le double des coûts d'investissement d'un parc onshore de puissance équivalente). Ces coûts plus élevés sont dus aux coûts des fondations sous-marines, des câbles sous-marins et des vaisseaux de transport et de mise en place des infrastructures. Les coûts opérationnels des parcs offshore sont aussi deux fois plus élevés que les coûts opérationnels des parcs onshore. L'avantage principal des parcs offshore réside dans les faibles perturbations que l'environnement impose au vent (le vent est plus constant et le rendement des turbines est donc meilleur), ainsi que des ressources éoliennes importantes, ce qui permet une utilisation plus importante des turbines.

Le coût de l'énergie produite par des parcs éoliens onshore varie de 55 à 100 €/MWh (selon les ressources éoliennes disponibles). La plupart des emplacements ne permettent pas une exploitation des ressources éoliennes rentable et des aides extérieures sont nécessaires pour faire en sorte que les parcs soient bénéficiaires.

Développement et utilisation des parcs éoliens

fr.leonardo-energy.org

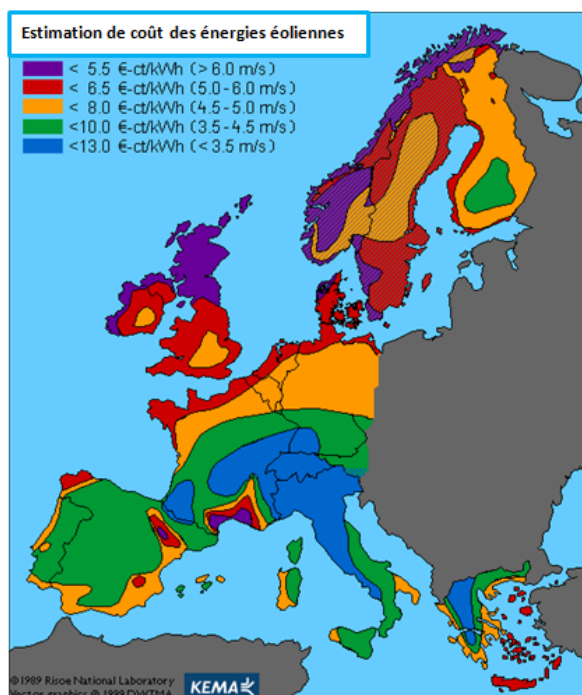


Figure 1a : cartes des vents en Europe (non disponible pour l'Europe de l'Est et les Balkans)

Figure 1b : parc éolien de 10 MW sur une étendue plane le long de la côte Atlantique

La carte européenne des vents montre que la Scandinavie, le Royaume-Uni, l'Irlande et la côte atlantique ont les meilleures conditions de vent pour la production d'énergie éolienne.

La durée nécessaire de réalisation d'un parc éolien se décompose en une période de développement suivie d'une période de construction. La durée de la période de construction est bien connue : inférieure à un an pour les parcs d'une petite et moyenne puissance (< 15 MW) et de 1 à 2 ans pour les parcs éoliens de forte puissance. La durée de vie d'un parc éolien est en moyenne de 20 ans.

La durée de la période de développement est plus difficile à estimer. Tout d'abord, le temps nécessaire à l'obtention d'un permis de construire est difficilement prédictible et dépend des procédures obligatoires et du nombre et du type d'objections des différentes parties concernées par le projet. Selon les cas, la période d'obtention du permis de construire peut varier de 6 mois à 5 ans.

Le financement d'un parc éolien fait l'objet de considérations particulières. Par le passé, les turbines éoliennes faisaient partie du capital de l'entreprise. Le financement des turbines était alors comparable au financement d'autres types de dépenses d'investissement.

Développement et utilisation des parcs éoliens

fr.leonardo-energy.org

De nos jours, les parcs éoliens sont établis en entités légales indépendantes de type société à responsabilité limitée (SARL), dont la plupart sont financées par emprunt. Il est évident que, dans ces conditions, le financeur d'un tel projet exige des garanties financières particulières.

En règle générale, le développement et l'exploitation d'un parc éolien peut être séparé en quatre phases :

- étude de faisabilité (dont la conclusion est de type go/ no-go),
- projet (dont la conclusion est de type go/ no-go),
- construction,
- exploitation et maintenance.

Dans ce guide, nous présentons l'étude de cas avec les données suivantes :

- parc éolien d'une puissance installée de 10 MW
- fabrication de 5 turbines éoliennes de 2 MW
- hauteur de moyeu de 80 m
- diamètre de rotor de 80 m, rotor à 3 pâles
- fondation octangulaire, taille : approximativement 18 x18 mètres
- poids de la nacelle : 100 tonnes, poids de la tour : 200 tonnes
- durée de vie 20 ans

Les quatre phases de développement seront analysées séparément dans les paragraphes suivants.

2. Etude de faisabilité du projet

Pendant la phase projet, un ou plusieurs sites sont retenus pour l'édification du parc éolien. Les caractéristiques principales sont étudiées, telles que le nombre de turbines, la puissance installée et la hauteur des moyeux. L'étude de faisabilité comprend aussi un inventaire ainsi qu'une validation des principaux risques du projet, telle que l'évaluation des ressources disponibles en vent, les capacités du réseau électrique et la vérification cadastrale auprès des municipalités.

Cette phase est conclue avec une décision de type go/no-go pour la phase suivante du projet.

2.1 Sélection du site et validation des ressources éoliennes

Le développement et la construction d'un parc éolien rentable nécessitent l'obtention d'une ou de plusieurs surfaces de dimensions satisfaisantes. Même pour un parc de taille moyenne, i.e. 5 turbines de 2 MW, une surface au sol importante est nécessaire. Selon le diamètre du rotor, la distance à respecter entre chaque turbine varie de 300 à 500 mètres et plus. Afin de réduire les nuisances et pour raisons de sécurité, les distances à respecter aux bâtiments les plus proches varient aussi de 300 à 500 mètres.

La prochaine étape, une fois la surface choisie, est d'estimer les conditions climatiques locales à long terme. En règle générale, les surfaces à fort potentiel sont situées dans des lieux désertiques sur des surfaces planes ou au sommet de collines. Le critère essentiel de choix étant des ressources en vent fort et récurrent.

Le but de cette étape de présélection est d'identifier et d'évaluer un certain nombre de critères clés permettant de valider le choix définitif de la surface à exploiter. Si aucune limitation particulière n'est identifiée lors de cette phase, le projet peut évoluer vers l'étape suivante.

La faisabilité financière est un pré-requis essentiel pour le développement d'un projet éolien. La validation des ressources éoliennes est d'importance cruciale pour correctement estimer la production annuelle d'énergie et constitue donc le critère principal de faisabilité économique. La quantité d'énergie disponible dans le vent varie comme le cube de la vitesse du vent. Les stations météo locales permettent d'établir des cartes de vent précises du site du futur parc éolien. Il est important de disposer de données couvrant une année entière afin d'éviter toute fluctuation de la vitesse des vents en fonction des saisons. La carte des vents est associée à une carte en 3 dimensions permettant de rendre compte du relief de la surface. De la distribution estimée des vents sur le site, il est possible d'en déduire une estimation de la production énergétique annuelle représentant le bénéfice estimé du parc éolien.

La production énergétique annuelle du site est calculée en multipliant la puissance de la turbine avec la fonction de distribution des vents :

$$\text{Production énergétique annuelle (kWh)} = E \sum_{i=1}^n f(W_i) \cdot P(W_i)$$

Avec :

- f : fonction de distribution du vent (nombre d'heures par intervalle de vitesse de vent sur l'année)
- P : courbe de puissance de la turbine éolienne (puissance disponible en sortie en fonction de la vitesse du vent)
- W_i : vitesse de vent par intervalle i , intervalle moyen de 0,5 à 1 m/s
- i : nombre d'intervalles entre la vitesse de démarrage (cut-in wind speed) et la vitesse de coupure (cut-out wind speed) de la turbine, généralement de 3 à 25 m/s

Développement et utilisation des parcs éoliens

fr.leonardo-energy.org

La figure 2a représente la courbe de puissance (PV) d'une turbine de 2 MW pour une utilisation optimale, i.e. sans prendre en compte les perturbations qui engendrent des pertes de rendement. La figure 2b représente la distribution des vents la plus communément utilisée, basée sur une fonction de distribution de Weibull, avec un paramètre de forme égal à 2 et une vitesse moyenne de vent égale à 7 m/s.

D'après la courbe de puissance de turbine telle que décrit sur la figure 2a et la distribution de vitesse des vents décrit sur la figure 2b, avec un facteur de forme égal à 2.0, la quantité brute d'énergie produite correspondant à des vents de 7 à 8,5 m/s est présentée sur le tableau 1.

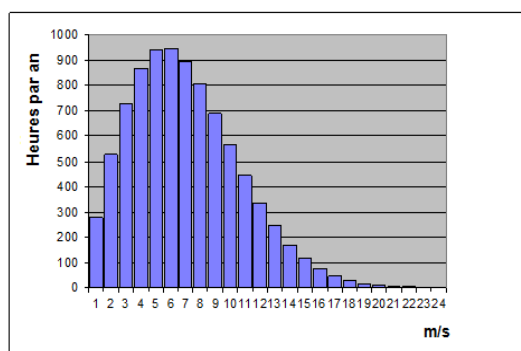
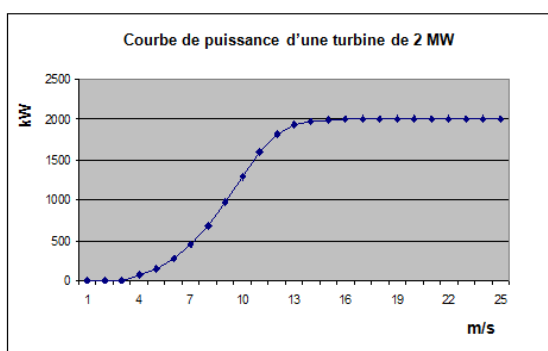


Figure 2a : courbe de puissance d'une turbine de 2 MW (avec mesure de réduction du bruit)

Figure 2b : distribution de vitesse des vents, vitesse moyenne de vent 7,0 m/s, et paramètre de forme pour la distribution de Weibull $k = 2$

Vitesse moyenne du vent	7,0 m/s	7,5 m/s	8,0 m/s	8,5 m/s
Facteur de forme de Weibull : $k=2$				
Puissance du parc éolien (MW)	10	10	10	10
Quantité moyenne d'énergie produite (MWh)	27 000	31 000	34 000	37 000
Nombre d'heures équivalents à pleine charge	2 700	3 100	3 400	3 700

Tableau 1 : quantité brute d'énergie produite (MWh) par un parc éolien d'une puissance installée de 10 MW en fonction de la vitesse du vent

Quantité brute d'énergie produite (MWh) par un parc éolien d'une puissance installée de 10 MW :

- vitesse moyenne de vent à hauteur de moyeu = 7 m/s
- vitesse de vent d'après la fonction de distribution de Weibull avec un facteur de forme égal à 2
- aucune mesure de réduction des perturbations sonores requise
- quantité d'énergie brute produite 27 000 MWh
- équivalent à 2 700 heures de fonctionnement à pleine

2.2 Etude de faisabilité technique

Les turbines éoliennes modernes sont disponibles pour des puissances allant de 0,75 à plus de 3 MW par unité, pour des diamètres de rotor de 55 à plus de 100 m. Bien que par le passé des rotors à 2 pales étaient utilisés, on ne commercialise aujourd'hui que des rotors à 3 pales. La hauteur de moyeu varie entre 0,9 et 1,25 fois le diamètre des pales. La plupart des fabricants proposent des turbines avec différents diamètres de rotor correspondant à des climats offshore faibles (grand rotor), moyens (rotor normal) ou forts (petit rotor).

Lors de l'étude préliminaire, les dimensions du terrain doivent être analysées avec précaution. En effet, il est nécessaire de respecter une distance minimale de 4 à 5 fois le diamètre des pales entre chaque turbine, soit des distances de 300 à 400 mètres. Tous les obstacles tels que les arbres et les immeubles ont tendance à perturber l'écoulement du vent. Il convient donc de favoriser les surfaces planes.

En plus de l'orographie du terrain, il est recommandé de prêter attention aux caractéristiques du réseau électrique. La question principale étant la distance avec la sous-station haute ou moyenne tension la plus proche, bénéficiant d'une puissance d'alimentation suffisante. Il est recommandé de prévoir, dès la phase d'étude du projet, un rendez-vous avec l'opérateur de réseau afin de déterminer les possibilités de raccordement au réseau et les coûts qui y sont associés, ainsi que les délais de réalisation du raccordement.

2.3 Validation des principaux risques

Dans la plupart des pays, il est interdit de placer des turbines éoliennes au-dessus des routes, des voies ferrées et des voies navigables. Une distance minimale des turbines aux infrastructures publiques doit être respectée. Dans les pays du nord et dans les pays au climat continental, il convient de prévoir d'éventuels risques de formation de glace.

Développement et utilisation des parcs éoliens

fr.leonardo-energy.org

En effet, la glace formée sur les pales peut être projetée à des grandes distances et causer des dommages importants. Les autorités locales ainsi que les différentes parties concernées peuvent exiger des analyses supplémentaires de risques en cas de proximité avec un quelconque élément suivant :

- transport, stockage et manipulation de biens dangereux,
- pipelines pour transport de matières dangereuses (même enterrées),
- résidences particulières, bâtiments publics ou entreprises privées,
- routes, voies ferrées, voies navigables,
- conducteurs de haute ou moyenne tension,
- danger de glace.

2.4 Demande d'autorisation aux autorités locales

Les parcs éoliens doivent répondre aux exigences nationales, régionales et locales. Dans la plupart des pays, une législation spécifique traite des programmes de planification environnementale et d'harmonie architecturale.

Pendant la phase d'élaboration du parc éolien, il est obligatoire de se conformer aux plans d'aménagement de zone en vigueur. Il est par exemple possible qu'un plan d'aménagement de zone interdise l'installation de turbines éoliennes ou impose des hauteurs maximales de bâtiment. Dans ces conditions, des négociations doivent être entreprises auprès des autorités locales pour définir comment rendre possible la réalisation d'un parc éolien.

Les législations de la plupart des pays européens imposent que les turbines éoliennes soient certifiées conformément aux normes de sécurité nationales ou internationales spécifiques aux turbines éoliennes. Un document de certification doit donc être produit par les fabricants.

Surface retenue pour un parc éolien de 10 MW :

- vérifier auprès de la municipalité les plans d'aménagement de zone et les hauteurs maximales de construction ;
- distance à respecter d'approximativement 400 mètres entre deux turbines ;
- en cas de disposition en ligne, la distance à respecter entre la première et la dernière turbine est donc de 1 600 mètres ;
- les résidences particulières et les bâtiments publics doivent se trouver à une distance minimale d'environ 300 à 500 mètres des turbines ;
- les autorités et autres parties concernées peuvent exiger des analyses de risques supplémentaires si des activités quelconques se tiennent à moins de 500 mètres des turbines.

2.5 Projet financier

Les tableaux ci-après représentent un exemple des coûts d'investissement et d'exploitation d'un parc éolien de 10 MW. Les coûts d'investissement et d'exploitation sont directement proportionnels à la puissance installée du parc. Les coûts d'investissement au MW sont à peu près de 1,25 M€ et les coûts opérationnels annuels sont supérieurs à 40k €/MW.

Pour un parc éolien de 10 MW avec 5 turbines de 2 MW chacune, les coûts d'investissement et de maintenance sont tels que décrits dans les tableaux ci-après :

Développement et utilisation des parcs éoliens

fr.leonardo-energy.org

Coûts d'investissement non récurrents - Tarifs 2006 -	Coût par turbine [K€]	Coût pour le parc éolien [K€]
Coûts préparatoires	100	500
5 turbines de 2 MW chacune	2 000	10 000
Infrastructure électrique et civile du parc éolien	200	1 000
Raccordement au réseau	200	1 000
INVESTISSEMENT TOTAL (1ère année)	2 500	12 500
Maintenance (10ème année) - Tarifs 2006 -	250	1 250
TOTAL	2 750	13 750

Coûts opérationnels d'exploitation et de maintenance récurrents

Coûts opérationnels d'exploitation récurrents - Tarifs 2006 -	Coût par turbine [K€]	Coût pour le parc éolien [K€]
Coûts de service, de maintenance et d'assurance par turbine	50	250
Taxes locales et frais pour le raccordement au réseau local	10	50
Bail	15	75
Gestion quotidienne	5	25
Consommation électrique propre	5	25
TOTAL	85	425

Coûts d'investissement et d'exploitation pour un parc éolien de 10 MW :

- investissements initiaux : 12,5 M€, soit 1,25 M€/MW
- coûts d'exploitation annuels : 425 k€, soit 42,5 k€/MW
- coûts de remise à neuf après 10 ans d'exploitation : 1,25 M€, soit 10 % du capital initial investi

Les parcs éoliens sont le plus souvent financés par des fonds propres et des prêts bancaires. Les fonds propres représentent le plus souvent de 20 et 40 % de l'investissement total. Pour des raisons de défiscalisation, il peut être intéressant pour les entreprises, les groupes d'investissement, ou même pour les particuliers d'investir dans des projets d'énergie éolienne. Plusieurs gouvernements européens ont ainsi mis en place des aides spécifiques visant à promouvoir la production d'énergie électrique via des sources d'énergie renouvelable. L'une de ces aides étant une défiscalisation pour les investissements relatifs à des projets liés aux sources d'énergie renouvelable.

3. Phase de pré-construction

Cette phase comprend tout le travail préparatoire nécessaire à la fabrication. Le promoteur du parc éolien doit faire une demande pour l'autorisation de tous les permis nécessaires, et un contrat d'achat à long terme doit être établi pour la vente de l'énergie produite sur le site. Les fournisseurs des turbines éoliennes et des infrastructures civiles et électriques doivent être choisis. Et enfin, le financement doit être validé.

3.1 Conception du parc éolien et prédictions de production énergétique

D'après les estimations en ressources éoliennes pour les différents emplacements possibles du parc éolien, il convient de déterminer l'emplacement au plus fort potentiel. Des modèles de simulation informatique reconnus tels que « WasP », « WindFarmer » et « WindPro » permettent alors de calculer la quantité d'énergie produite pour les différents projets.

Les vitesses et les directions des vents sont prises en compte dans le modèle, ainsi que l'orographie du terrain. Par exemple, une pente raide aura pour effet une accélération des vents au sommet de la pente. La modélisation permet ainsi de localiser les meilleurs emplacements pour les turbines afin de favoriser leurs expositions aux vents. La disposition des turbines favorise généralement la direction des vents dominants.

Les distances minimales entre chaque turbine sont spécifiées par les fabricants. Ces distances doivent être respectées pour garantir le rendement des turbines d'une part, mais aussi pour éviter d'endommager des éléments de structure primaire par « effet de parc » (sillage des perturbations) des turbines situées au vent. La distance minimale à respecter dépend de la disposition des turbines par rapport à la direction des vents dominants. En cas de disposition perpendiculaire aux vents dominants, la distance à respecter entre chaque turbine doit être au minimum de 4 fois le diamètre des rotors. Dans d'autres configurations, une distance minimale de 5 fois le diamètre des rotors doit être respectée.

La quantité brute d'énergie produite par le parc éolien dépend principalement de la distribution locale des vents et de la disposition des turbines. Afin de calculer la quantité nette d'énergie produite, il est nécessaire d'estimer l'ensemble des pertes. A partir de la quantité brute d'énergie produite, il convient alors de prendre en compte :

- l'effet de parc,
- les pertes réseau,
- la disponibilité.

Développement et utilisation des parcs éoliens

fr.leonardo-energy.org

3.1.1 Effet de parc

L'écoulement du vent en aval du rotor de la turbine est fortement perturbé et ralenti, c'est ce que l'on appelle l'effet de parc. Les turbines placées en aval de l'écoulement perturbé ont un rendement moindre que les turbines situées au vent bénéficiant d'un vent de meilleure qualité (écoulement laminaire). De plus, un vent fortement perturbé peut causer des dommages sur l'infrastructure des turbines. En règle générale, on considère que les pertes dues à l'effet de parc correspondent à 3 ou 4 % de la quantité brute d'énergie produite.

3.1.2 Pertes réseau

Les pertes réseau sont les pertes électriques situées entre le disjoncteur de connexion de la turbine et le point de raccordement au réseau électrique public (compteur électrique). Selon la géométrie de disposition des turbines, on considère que les pertes électriques correspondent à 2 ou 3 % de la quantité brute d'énergie produite.

3.1.3 Disponibilité

La disponibilité d'une turbine éolienne est définie comme le temps pendant lequel une turbine est en fonctionnement ou prête à fonctionner, alors que les conditions extérieures ne sont pas réunies pour permettre la production d'énergie. Les turbines actuelles ont une disponibilité technique proche de 97 % (voire même supérieure).

La production nette d'énergie d'un parc éolien de 10 MW est calculée de la façon suivante :

- quantité brute d'énergie produite : 27 000 MWh:
- 3% de pertes dues à l'effet de parc
- 3% de pertes dues aux pertes réseau
- 97% disponibilité
- soit une quantité nette d'énergie produite de 24 500 MWh

3.2 Obtention de permis

3.2.1 Permis environnemental

Le parc éolien doit répondre aux réglementations environnementales en vigueur. Le permis environnemental nécessite de produire un plan du site ainsi que diverses études environnementales concernant la faune et la flore locale.

3.2.2 Bruit

Le bruit est l'un des problèmes environnementaux les plus importants. Les turbines éoliennes sont bruyantes en fonctionnement, principalement au niveau des pales et de la chaîne de transmission mécanique. La distance à respecter doit garantir que le bruit au niveau des résidences les plus proches ne dépasse pas les valeurs seuils définies par les normes en vigueur.

En plus des tests sonores et de l'aspect visuel, la plupart des autorités exigent des études de risques et de sécurité, ainsi que des études de projection d'ombre. De plus, la rotation des pales exposées au soleil provoque un effet stroboscopique des ombres lorsque ces dernières cachent le soleil (environ une fois par seconde). Les effets de projection d'ombre et de stroboscopie causent des nuisances fortes sur les personnes résidant à proximité des éoliennes. La projection des ombres n'est pas régulée par la loi.

3.2.3 Sécurité

Il est interdit de placer des éoliennes au-dessus de routes ou de voies ferrées. La formation de glace sur les pales et sur la nacelle est source de danger pour les personnes et les biens situés dans un environnement proche et il convient de prendre des mesures de sécurité particulières.

Une mesure possible est l'arrêt des rotors en cas de gel et redémarrage des éoliennes après contrôle visuel d'absence de glace.

3.2.4 Permis de construire

En plus d'un permis environnemental, un permis de construire est nécessaire à la fabrication du parc éolien. Lors de la demande d'obtention de permis, les autorités réclament un croquis permettant de rendre compte de l'aspect visuel du parc éolien sur

Développement et utilisation des parcs éoliens

fr.leonardo-energy.org

l'environnement. En plus du croquis, il convient de fournir une description détaillée des turbines ainsi que des fondations, l'emplacement exact des turbines sur le terrain, et une vue d'ensemble des infrastructures civils et électriques, ainsi qu'une copie du certificat de validation.

3.3 Connexion au réseau

En règle générale, les turbines ne sont pas connectées individuellement au réseau électrique. Un réseau interne au parc doit être conçu et installé. Afin de minimiser les pertes, la moyenne tension (entre 10 et 20 kV) est généralement préférée pour le réseau interne. Dans la plupart des cas, les turbines sont connectées à des boucles pour garantir la redondance. Les générateurs de turbine fonctionnent souvent à des tensions inférieures à 1 000 V et chaque turbine est équipée d'un transformateur pour adapter la tension du réseau interne à celle du réseau public. Le transformateur de l'éolienne peut être situé dans la nacelle, dans le mât ou dans un local indépendant situé à proximité.

Le réseau interne est ensuite raccordé au réseau électrique public via un transformateur si nécessaire, par l'intermédiaire d'un disjoncteur de raccordement associé à un dispositif de comptage.

Dans certains cas, le réseau électrique public peut ne pas être disponible ou de puissance insuffisante. Dans ce cas, les coûts des travaux à mettre en œuvre pour renforcer le réseau sont entièrement à la charge du promoteur du parc éolien.

3.4 Contrat d'achat à long terme

Dans tous les cas de figure, un contrat d'achat est obligatoire. Le tarif d'achat est composé d'une contribution de production et de transport d'électricité et, le plus souvent, augmenté d'une prime extraordinaire pour production d'énergie d'origine renouvelable ou correspondant à des crédits carbone. En fonction, d'une part des ressources éoliennes et d'autre part des coûts d'investissement et d'exploitation, il apparaît que des tarifs d'achat au minimum égaux à 60 €/MW doivent être appliqués pour que le projet soit économiquement viable. Pour que le projet soit rentable, il convient de fixer des tarifs de 80 à 90 €/MWh.

3.5 Choix des fournisseurs

Selon la nature du projet, le promoteur peut décider d'émettre un appel d'offres public ou de sélectionner un certain nombre de fournisseurs choisis pour la fourniture des turbines éoliennes. L'appel d'offres doit regrouper toutes les informations ainsi que l'ensemble

des critères techniques.

- informations suffisantes concernant le projet incluant le statut des obtentions de permis et le planning du projet,
- informations financière, technique et d'exploitation du projet nécessaires au sous-traitant potentiel,
- Délais : date de clôture de l'appel d'offres et période additionnelle pour obtenir des informations complémentaires (questions, visite de site...),
- éléments contractuels,
- champ d'application d'approvisionnement
- spécifications techniques
- conditions de maintenance et de réparation,
- police d'assurance et de garantie.

Il peut être décidé que l'entrepreneur livre le parc éolien clé en main incluant turbines, fondations, routes d'accès, réseau électrique interne au parc et raccordement au réseau public. Une autre possibilité consiste à subdiviser la livraison en livraisons indépendantes souscrites auprès d'entrepreneurs différents, par exemple de distinguer la livraison des turbines et les travaux de génie civil et électrique. Cette seconde solution peut présenter des avantages financiers. Dans ce cas, le promoteur devra jouer le rôle d'entrepreneur principal pour coordonner l'ensemble et se trouve alors responsable du parc. La solution clé en main représente la solution la plus sage (la moins risquée).

Les turbines doivent impérativement être déclarées conformes par un organisme certifié et posséder un certificat de validité correspondant au climat local et à la disposition géométrique du parc éolien. Afin d'éviter tout problème de garantie, il appartient à l'entrepreneur de stipuler que les turbines éolienne doivent être « adaptées » au site.

3.6 Financement du projet

Comme nous l'avons vu précédemment, la plupart des sites éoliens européens ne sont pas rentables. Des mesures d'encouragement doivent alors être prises pour faciliter le développement des énergies renouvelables :

- subventions (gouvernementales ou locales) sur les investissements ;
- avantages fiscaux visant à favoriser les investissements ;
- réduction des taux d'emprunt ;
- subventions sur la production d'énergie d'origine renouvelable (augmentation des tarifs d'achat).

Développement et utilisation des parcs éoliens

fr.leonardo-energy.org

Si le financement repose en majeure partie sur des prêts extérieurs, les responsables financiers peuvent exiger des garanties supplémentaires de remboursement du prêt telles que :

- accord d'achat spécifiant un tarif minimum d'achat pendant la période du prêt ;
- garantie financière que les ressources éoliennes suffiront à dégager un bénéfice suffisant pour rembourser l'emprunt ;
- garantie concernant les différents éléments ainsi que la performance globale du parc éolien (disponibilité et courbe de puissance) pendant la durée de l'emprunt ;
- assurance couvrant les éventuelles casses de machines et les interruptions anticipées de contrat ;
- contrat de maintenance et de service.

En annexe A est développé un calcul de cash-flow basé sur deux tarifs d'achat différents, pour un projet de 10 MW. Les coûts de financement ne sont pas pris en compte dans le calcul. Toutes les dépenses et toutes les recettes sont basées sur les niveaux de prix de 2006. L'influence de l'inflation est donc implicitement prise en compte dans les frais et les revenus augmentent annuellement à taux fixé.

Calcul de cash-flow pour un parc éolien de 10 MW sur une durée de vie de 20 ans et basé sur les niveaux de prix de 2006 :

Tarif d'achat	60 €/MWh	85 €/MWh
Revenus bruts	1,47 M€/an	2,08 M€/an
Période de recouvrement	> 15 ans	> 9 ans
Valeur actuelle nette (VAN)	6,1 M€	17,7 M€
Taux de rentabilité interne	4 %	11 %

Le calcul montre qu'un tarif d'achat de 60 €/MWh est nécessaire pour couvrir tous les frais sans générer de profit. Si l'on suppose que le projet dans son ensemble est financé par un prêt bancaire, le bénéfice généré couvre juste les taux d'intérêt annuel, le remboursement du prêt et les coûts d'exploitation annuels.

Un tarif d'achat de 85 €/MWh permet de générer un bénéfice plus important (7%) dont une partie profitera à l'entrepreneur si l'on se base sur des taux d'intérêts bancaires de 4%.

4. Phase de construction

La phase de fabrication commence avec le début des travaux et ne s'achève qu'une fois le projet opérationnel.

4.1 Vue d'ensemble du projet de construction

Une fois les fournisseurs choisis et le financement du projet bouclé, la phase de construction peut alors commencer.

Il appartient à l'entrepreneur de vérifier l'accessibilité du site pour les besoins en transports exceptionnels de la phase de construction. Autour de chaque turbine éolienne, un espace suffisant doit être aménagé afin de permettre le stockage des différents éléments, ainsi que l'assemblage du rotor et la mise en place d'une grue. Une surface de 80x50 m² convient à la plupart des applications. Une turbine de 2 MW requiert une grue de 600 tonnes pour le levage des éléments de la tour, de la nacelle et du rotor.

La fabrication et l'assemblage des éléments principaux a entièrement lieu à l'usine du fournisseur des turbines.

Les principaux éléments assemblés expédiés sur site sont :

- fondation,
- 3 ou 4 éléments de tour tubulaires,
- contrôleur de terre et disjoncteur,
- système SCADA de parc éolien,
- transformateur (si posé au sol),
- nacelle complètement assemblée (incluant la boîte de vitesses, la génératrice, le frein mécanique, un convertisseur de fréquence et, le cas échéant, un transformateur),
- moyeu et pales du rotor.

Pour les parcs éoliens de petite et de moyenne taille, la durée entre le passage de la commande et l'expédition finale est en moyenne de 6 à 9 mois. Ce laps de temps convient à la réalisation du génie civil incluant les routes, les fondations des turbines et des sous-stations, ainsi que de l'infrastructure électrique. Le temps nécessaire à l'assemblage du rotor et la construction des structures principales est de 2 à 3 jours ouvrés pour chacune des turbines. Suite de quoi 7 à 10 jours sont encore nécessaires pour finaliser l'installation et réaliser la connexion au réseau.

Développement et utilisation des parcs éoliens

fr.leonardo-energy.org

A partir du moment où tout le matériel est sur site, la construction d'un parc éolien de petite ou de moyenne taille ne prend que 2 à 3 mois.

4.2 Contrôle qualité pendant les phases de construction et de production

Il est fréquent que l'entrepreneur attribue au client un certain nombre de hold point/witness point qui se traduit par point d'arrêt/point d'intervention. Ces points ont pour but de permettre au propriétaire du parc éolien d'effectuer un audit de la progression et de la qualité du travail réalisé et de vérifier que les éléments sont bien en conformité avec les spécifications.

Ces points d'arrêt/points d'intervention sont généralement planifiés à chaque étape importante du projet, par exemple lorsque l'un des composants principaux est prêt à être expédié sur site. Ces points sont souvent liés à l'installation.

Ces points comptent notamment :

- début de fabrication des éléments, incluant un audit des procédures de qualité de l'entrepreneur,
- tests de validation usine des produits prêts à être expédiés,
- tests de réception site des produits livrés,
- inspections diverses liées aux différentes phases de construction.

4.3 Inspection des travaux et remise du projet

Après achèvement des travaux et avant remise du projet, une inspection générale est réalisée sur site. Cette inspection est réalisée par des représentants de l'entrepreneur et du propriétaire. Des tests et mesures peuvent être réalisés, mais l'inspection consiste le plus souvent à vérifier le bon fonctionnement de l'installation, que tous les éléments ont bien été livrés, sans omission de détails plus ou moins importants. Les différentes parties remplissent ensemble une check-list de tous les points importants abordés lors de l'inspection. Il est fréquent que la première inspection se solde par une « liste de réserves » résumant tous les points non conformes. De la gravité des points non conformes de la liste de réserves dépendra la remise du projet (immédiate ou différée). A la remise du projet, les derniers paiements doivent être effectués.

5. Exploitation et maintenance

A la date de remise du projet, le propriétaire du parc est responsable de l'exploitation quotidienne. C'est aussi la date de validité des contrats de maintenance et de garantie. La durée de vie technique et économique du projet prévue est de 20 ans.

5.1 Exploitation quotidienne

Les éoliennes sont conçues pour fonctionner de façon entièrement automatique. Le fonctionnement normal ne requiert pas la présence d'opérateur sur site.

Il est fréquent que les parcs éoliens de moyenne et de grande taille soient équipés d'un système de surveillance élaboré (type SCADA). Les moyens de communication modernes (Internet ou modem) permettent de se connecter au système de surveillance à distance et de suivre l'état de la production, de la disponibilité et les statistiques de pannes du site.

La fonction principale de l'opérateur est alors de vérifier régulièrement que le parc est en état de fonctionnement optimal. L'opérateur est par ailleurs responsable de vérifier que les travaux de maintenance et de réparation sont conformes aux contrats souscrits et sont effectués rapidement.

5.2 Garanties et assurances

Les garanties suivantes sont standards pour les 5 premières années d'exploitation :

- sur les biens livrés, incluant réparations et modifications,
- sur la disponibilité des turbines et de l'ensemble du parc (souvent supérieures à 95%),
- sur la performance. Du fait de l'impossibilité de prévoir les ressources éoliennes sur une année, cette garantie porte sur les courbes de puissance (garanties de certification souvent supérieures à 95 % des courbes de puissance des turbines).

Si les valeurs de disponibilité ou de performance sont inférieures aux valeurs garanties, la différence entre les valeurs réelles et garanties doit être régularisée par le fournisseur.

Certains fournisseurs offrent des garanties valables sur des périodes de 8 à 12 ans, ou au moins égales à la période de financement.

Des assurances sont requises pour :

- la responsabilité des tierces parties
- la casse de matériel (endommagement de matériel, descente de foudre, feu, vandalisme, faute de l'opérateur de maintenance ou d'exploitation, etc.)
- l'interruption d'exploitation (compensation pour défaut de production suite à une panne machine)

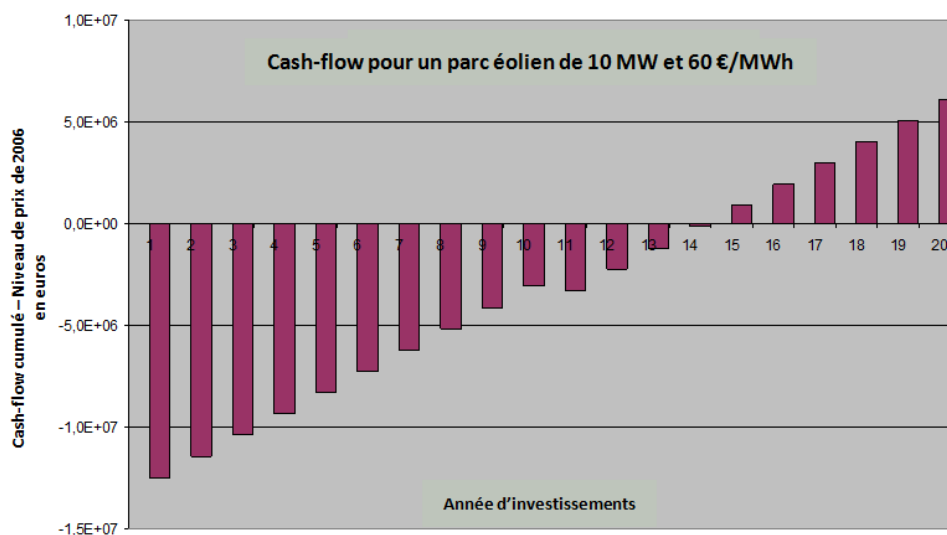
5.3 Maintenance et réparation

Les turbines modernes nécessitent une maintenance préventive bi-annuelle. La maintenance d'une turbine éolienne d'une puissance de l'ordre du MW nécessite 2 ou 3 jours pour 2 ingénieurs. La maintenance consiste en une série de tests et d'inspections des dispositifs de contrôle et de sécurité, la réparation des défauts, le remplacement ou la mise à niveau des consommables tels que la graisse des paliers ou la lubrification de la boîte de vitesses. La boîte de vitesses est l'élément le plus fragile et fait donc l'objet d'attentions particulières lors des opérations de maintenance. A intervalles réguliers, des échantillons d'huile sont prélevés et analysés pour y déceler d'éventuelles traces de pollution (due à une usure prématurée par exemple), les filtres sont remplacés et les engrenages sont inspectés.

Le nombre de réparations varie fortement entre les différentes turbines et les différents parcs. Le nombre moyen annuel d'actions correctives par turbine est de 3 ou 4. Seules les actions correctives nécessitant l'intervention d'un ingénieur sont comptabilisées. Le temps moyen de non fonctionnement par incident est de 2 à 4 jours. Les causes de pannes se répartissent également entre problèmes de nature mécanique et électrique.

Bien que le fait ne soit pas reconnu par les fabricants des turbines, il est communément admis que les turbines nécessitent une révision complète après 10 à 12 années d'exploitation. Cette révision comprend le nettoyage et la réparation des pales du rotor et la remise à neuf de la chaîne de transmission, le remplacement des engrenages et, si nécessaire, le remplacement d'éléments de la boîte de vitesses.

6. Annexe A : deux exemples de calcul de cash-flow pour un parc éolien de 10 MW



Eléments du scénario 1 : parc éolien de 10 MW

Tarif préférentiel

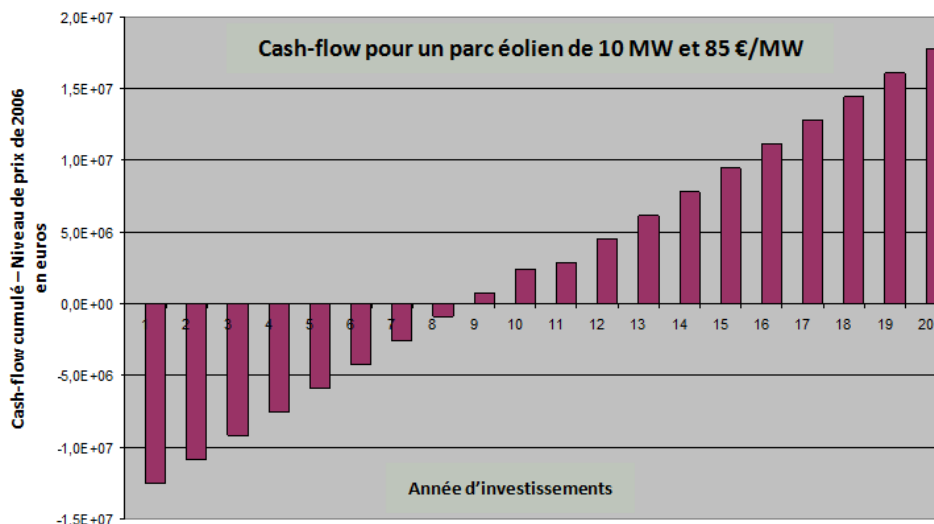
Coûts de financement non inclus !

Niveaux de prix de 2006

Coûts d investissements (1ère année)	12 500 000 €
Coûts de remise à neuf (10ème année)	1 250 000 €
Tarif d'achat au kWh	0,060 €
Production annuelle du parc en kWh	24 500 000
Revenus bruts de la production énergétique	1 470 000 €
Coûts récurrents annuels	425 000 €
Période de recouvrement	15 ans
Valeur actuelle nette (niveau de prix de 2006, 20 ans)	6 100 000 €
Taux de rentabilité interne	4 %

Développement et utilisation des parcs éoliens

fr.leonardo-energy.org



Eléments du scénario 1 : parc éolien de 10 MW

Tarif préférentiel

Coûts de financement non inclus !

Niveaux de prix de 2006

Coûts d investissements (1ère année)	12 500 000 €
Coûts de remise à neuf (10ème année)	1 250 000 €
Tarif d'achat au kWh	0,085 €
Production annuelle du parc en kWh	24 500 000
Revenus bruts de la production énergétique	2 082 500 €
Coûts récurrents annuels	425 000 €
Période de recouvrement	9 ans
Valeur actuelle nette (niveau de prix de 2006, 20 ans)	17 750 000 €
Taux de rentabilité interne	11 %