

# *Greenelec Europe SA*

*Siège social : Place du Carré 7 à B 5660 FRASNES-LEZ-COUVIN Belgique*  
Statuts signés le 27-03-2006 auprès du Notaire DANDOY à Mariembourg (Couvin)  
TVA BE 0880.350.620 Compte Triodos 523 0801657 27 [Greenelec@skynet.be](mailto:Greenelec@skynet.be)

**Adresse courrier :** Monsieur Jacques MAMBOUR, Administrateur-délégué  
METZERT, rue du Beynert 64 à B 6717 ATTERT Belgique  
Tél 063.217256 ou Gsm 0495 921604  
E mail [J.MAMBOUR@skynet.be](mailto:J.MAMBOUR@skynet.be)

Partenariat éolien aux « Ailles de Dailly-Tri Châlon »  
Ferme de la Chapelle entre Boussu et Frasnes et Couvin

## **Etude technico-économique GREENELEC 1** **Extrait des conclusions**

Fichier : Etude technico-économique GREENELEC 1

Cette étude résulte de l'action développée en préparation par l'asbl EVE Couvin qui a pu bénéficier de l'appui du FEDER et du Ministère de la Région Wallonne, dont GREENELEC Europe SA veillera à soutenir la pérennité de l'action au cours des années de vie de l'éolienne GREENELEC 1, comme convenu sur base du document du 6 février 2006 tel qu'approuvé par EVE asbl et ses partenaires.

Le permis obtenu fait état d'une éolienne de deux mégawatts équipée de pales d'une quarantaine de mètres de longueur. L'éolienne ENERCON E82 a été choisie par les promoteurs parce qu'elle est considérée comme supérieure et surtout plus durable que ses concurrentes en tenant compte des aspects cités ci-dessous.

## 1. Les fondations et le mât en béton postcontraint

La technologie ENERCON repose ici sur un mât en béton précontraint de 72 mètres : sur une semelle de fondations qui est creuse, des éléments en béton vibré sont placés en superposition et, par les tubes qu'ils contiennent, sont postcontraints par des câblages en acier inox qui sont alors protégés par un ciment-colle hydrofuge.

La semelle de fondations est creuse et permet l'accès et l'inspection de ses composantes, et dès lors la vérification de la bonne qualité et de l'uniformité du béton, celui-ci ayant déjà été analysé mixer par mixer au moment du pompage (325 mètres cubes). Au cas où, avec le temps, une évolution anormale serait constatée, des actions correctrices pourraient être menées avant qu'il ne soit trop tard. La qualité du coffrage et du ferrailage et leur mise en œuvre ont été largement appréciées par les nombreux visiteurs et au moment du placement, il est à noter que quatre unités de vibration ont été utilisées simultanément ... alors que dans la plupart des cas, une ou deux unités sont mises en œuvre ... quand tout va bien. Les conditions de temps et de température ont été excellentes : la date a à cet effet été reportée de deux jours pour bénéficier des meilleures conditions. Le résultat est excellent et c'est ce que constata l'ingénieur qualité qui visita le chantier avant l'arrivée des éléments du mât.

Les éléments en béton sont modulaires et permettent au mât de prendre une structure tronconique qui, non seulement donne au regard le meilleur effet, mais constitue la meilleure forme portante pour la stabilité et la durée de l'éolienne : le béton vibré et peint est beaucoup plus stable et durable que le meilleur acier galvanisé et il subit beaucoup moins l'influence des contacts avec des objets métallique rouillés, sales, ... La masse contribue à la fois à stabiliser l'ensemble de l'édifice et à réduire les usures liées aux vibrations qui sont ici réduites au minimum. La non flexibilité du mât ainsi créé diminue notamment les contraintes auxquelles sont soumises les longues pales auxquelles les mouvements horizontaux de l'arbre lent de rotation causent dans d'autres éoliennes des dégâts irrémédiables liés aux sollicitations dues au balancement abusif du mât. Les câbles en acier inox de contrainte sont fixés à un mât supérieur en acier qui exerce une fonction de pression (car il est bien connu que le béton est très résistant à la pression mais résiste mal à la traction) et ces câbles en acier inox n'exercent de traction que sur ce mât supérieur en acier galvanisé, d'une hauteur de 3 mètres, lui-même surmonté d'un autre mât de 25 mètres. Les câbles sont tendus depuis l'intérieur de la semelle en béton dont ils traversent l'épais plafond, à l'aide de vérins : ils exercent donc sur le béton une action de pression. Aux traversées des câbles, les perforations du béton sont assurées par des tubes en acier autour desquels le béton a préalablement été renforcé par un ferrailage en forme de ressort qui lui garantit la meilleure stabilité. Les câbles en inox sont finalement protégés par un ciment-colle qui l'isole de l'humidité, des pollutions, qui empêche l'oxydation et les vibrations, et qui répartit uniformément les tractions sur l'ensemble du mât.

Le mât en acier supérieur a subi une galvanisation de haute qualité, similaire aux mâts des éoliennes des meilleures classes. Sa longueur inférieure à trois dizaines de mètres, tout en permettant une certaine souplesse (par vent fort, il est même possible de ressentir le « mal de mer » dans la nacelle, en haut de l'éolienne), évite des mouvements excessifs et dès lors des sollicitations inacceptables qui caractérisent les mâts en aciers plus longs où il n'est pas rare de constater l'apparition de micro-fissures qui signalent le vieillissement progressif du mât qui finit toujours par devoir être remplacé dans un terme plus ou moins court. La réduction, dans la technologie ENERCON, de cette longueur de mât en acier galvanisé réduit très fortement les sollicitations de balancement et de torsion et garantit dès lors au mât basé sur une structure de béton postcontraint une durée de vie bien supérieure aux technologies comptant uniquement sur le mât en acier.

## 2. Les pales

La longueur des pales est un élément important de la puissance générée car elles balayent une surface qui est un cercle sur lequel, en fait, vient s'appliquer l'énergie cinétique du vent. L'énergie récupérée dépend dès lors d'abord du diamètre du cercle, donc de la longueur de la pale, et cette énergie augmente avec le carré de la longueur de la pale. Ici, les pales de 41 mètres de longueur correspondent à une surface balayée de 5281 mètres carrés.

Au-delà de la longueur des pales correspondant à des sites à vent moyen comme celui de Couvin, il convient de noter cinq points très importants qui assurent aux pales ENERCON une très longue durée de vie :

1. l'excellent système de **protection contre la foudre** : le bout de pale est composé d'une plaque en métal, structure recourbée et fixée à deux câbles qui traversent toute la longueur de la pale, relayant à des points de contact-fixations sur chaque face de la pale, et aboutissant à la base de la pale à une bague de contact par laquelle transite la décharge électrique, évitant ainsi la soudure des éléments de la couronne de rotation sur laquelle est fixée la pale. De nouveaux câbles permettent la progression à travers le rotor pour aboutir de même à une bague en bas de la nacelle, et repartir à travers le mât vers le sol où se trouvent enfouis deux cerclages de cuivre entourant, à deux niveaux différents, la semelle de fondations dont les ferraillements eux-mêmes sont raccordés à la terre. Il est à noter que la nacelle dont les premiers modèles – comme chez les concurrents – étaient en matériaux composites, est maintenant réalisée à l'aide de parois métalliques pour exercer la fonction de « cage de Michael FARADAY » et empêcher ainsi les dégâts dus à la foudre.
2. la fixation des pales aux bagues des couronnes d'orientation (pour la mise en drapeau par vent violent) qui est habituellement effectuée grâce à une seule série de fixations parallèles à la pale, est assurée dans le système ENERCON par une **double série de fixations perpendiculaires** à la pale. Cette double série permet de mieux répartir les tractions et donc d'éviter les fêlures tandis que la perpendicularité enserre les fibres de verre de manière à éviter l'arrachement des pales, ce qui est généralement à l'origine de leur remplacement lorsque des fissures apparaissent à la base des pales, à proximité du moyeu où les sollicitations sont maximales.
3. la structure de la pale est composée de l'enveloppe extérieure correspondant globalement à une structure de type « NACA » (comme les ailes d'avion, où s'applique le principe de Daniel BERNOULLI (théorie cinétique des gaz, 1727) de pression différenciée en fonction de la vitesse du vent). La pale ENERCON comprend en outre des **parois intérieures** agissant en « raidisseurs » qui limitent les flexions et les torsions des pales et réduisent dès lors leur usure et leur vieillissement.
4. la **forme vrillée** de la pale : le vent progressant à même vitesse sur toute la surface du cercle balayé par la pale, il exerce une poussée qui diffère fortement en bout de pale par rapport au centre, et au centre par rapport aux zones proches du moyeu ... lorsque la pale présente une surface proche du plan et est donc assez droite (à l'allure générale d'une lame de couteau). En effet, la vitesse circumférencielle étant différente (beaucoup plus élevée en bout de pale où elle peut atteindre 82 mètres par seconde, soit près de 300 km/h), la pression en bas de pale est nettement supérieure puisque la pale y progresse plus lentement ...sauf si la pale présente une inclinaison plus forte permettant, par triangulation, de réduire et d'équilibrer les pressions sur toute la longueur de la pale, ce qui permet d'augmenter le rendement et surtout d'uniformiser les effets des nombreuses variations successives des vitesses momentanées du vent. Les pales ENERCON sont pour cette raison très nettement vrillées, ce qui les différencie de la concurrence et contribue à augmenter leur résistance et leur durée de vie en diminuant les sollicitations à la flexion et à la traction.

5. le profil général des pales ENERCON donne au cercle qu'elles balayent une forme **concave**, dès lors plus efficace et plus résistante dans le temps, grâce aux trois éléments suivants :
  31. la pale est légèrement *recourbée* vers la source du vent
  32. le *bout de pale* est fortement plié vers le vent (triangle de pointe presque perpendiculaire à la pale)
  33. le pied de pale est équipé d'un *spoiler* qui repose, en position normale, sur le moyeu et renforce ainsi le point de fixation tout en empêchant le vent de s'engouffrer autour du moyeu et d'y générer des vibrations nuisibles

### 3. l'alternateur synchrone multipolaire

La plupart des éoliennes actuellement installées en Wallonie et ailleurs sont équipées d'alternateurs asynchrones qui sont en fait des moteurs du type le plus fréquent et le plus simple. C'est le type de moteur que l'on trouve dans presque tous les appareils électroménagers où il est conçu pour tourner à sa vitesse nominale (souvent à 1500 tours) et il démarre pour atteindre très rapidement cette vitesse qui est, pour cet alternateur asynchrone, une question de vie ou de mort : il ne peut fonctionner qu'à sa vitesse nominale ou à une vitesse très proche ... Si on le ralentit, il a tendance à s'échauffer ... et même à griller si le ralentissement est un peu important ...

Par contre, si on réussit à l'accélérer au-delà de sa vitesse nominale (en actionnant son axe plus rapidement, en exerçant une force tournante très rapide ...), cet alternateur asynchrone se met à cesser de consommer de l'électricité et, au contraire, il en produit et en fournit au réseau. Avec les anciens compteurs, on pouvait constater que les compteurs tournaient à l'envers et décomptaient les kilowattheures ...

Un premier problème, avec cette technologie asynchrone, est que l'énergie électrique produite n'est pas de très bonne qualité et qu'elle a tendance à perturber un peu le réseau. C'est ce qui amène les opposants à l'énergie éolienne à clamer qu'il n'en faut pas trop ... sous peine de perturber le réseau.

Mais le plus gros problème est qu'il faut pouvoir atteindre la vitesse nominale de plusieurs centaines de tours ... à partir d'un axe que font lentement tourner les pales ...

En effet, cet axe où sont fixées les pales tourne à une vingtaine de tours par minute au maximum, lorsque le vent est très important ... et même à moins de dix tours lorsque le vent est faible.

Cet arbre sur lequel sont fixées les pales est appelé « arbre lent » et il doit transmettre sa force tournante de manière telle qu'une rotation lente se transforme en rotation rapide : seul un multiplicateur peut y parvenir, ce qui signifie que sur l'arbre lent se trouve une grande roue dentée qui est accouplée à une petite roue dentée qui tournera très vite ... et il y a souvent deux ou trois accouplements de ce type, dans lesquels il y a de nombreux frottements, de l'usure, des vibrations, du bruit mécanique, ... et surtout une fameuse perte d'énergie à faire tourner toutes ces roues dentées de plus en plus rapidement ... pour en arriver à la vitesse nominale de l'alternateur où n'arrive évidemment qu'une partie de l'énergie réelle dont disposaient les pales ... Une bonne partie de la puissance du vent est ainsi perdue inutilement, parce qu'une mécanique est vorace en énergie ... et ne se justifie que par un mauvais choix technologique.

On dit que des éoliennes de ce type ont une « chaîne cinétique » composée de pales, roulements, arbre lent, multiplicateur, arbre rapide, alternateur asynchrone. Cette « chaîne cinétique » compliquée est imposée par le choix de l'alternateur asynchrone qui, pour produire de l'électricité, doit dépasser sa vitesse nominale de rotation ... très rapide ...

La chaîne cinétique consommant en pure perte une partie de l'énergie du vent, elle absorbe toute l'énergie disponible lorsque le vent commence à diminuer et cette énergie ne sert qu'à vaincre les frottements et tout ce qui est nécessaire à faire tourner les roues dentées (elles trempent dans de l'huile, ce qui contribue aussi à les ralentir car il faut « remuer » l'huile aussi

...). Dans bien des cas, lorsque le vent est moyen ou faible, il y a un équilibre entre la puissance fournie par le vent aux pales ... et la puissance absorbée par la « chaîne cinétique » elle-même, si bien qu'en fait l'éolienne tourne lentement mais elle ne parvient pas à faire tourner l'alternateur asynchrone au-delà de sa vitesse nominale et celui-ci ne produit donc pas d'électricité ! On peut dire que l'éolienne tourne mais ne produit pas ! Elle tourne dans le vide !

Si à ce moment le vent faiblit encore un peu, il y a déséquilibre dans le mauvais sens car la « chaîne cinétique » consomme davantage d'énergie que celle apportée par le vent : non seulement l'éolienne ne produit pas, mais elle s'arrête tout simplement alors qu'il y a encore un peu de vent ... Aux yeux du passant, l'éolienne a l'air en panne ... alors qu'il y a un peu de vent ...

Puis le passant repasse ... et constate que le vent a augmenté et que l'éolienne ne tourne toujours pas ! Lorsque l'éolienne est à l'arrêt, il faut, pour la remettre en mouvement, non seulement lui donner la puissance nécessaire pour fournir l'énergie qu'absorbe inutilement la « chaîne cinétique » en mouvement, mais encore bien davantage d'énergie car il faut vaincre l'inertie de l'ensemble. En effet, pour qu'une dent de roue dentée se remette à « reglisser » sur la dent de la roue à laquelle elle est accouplée, il faut lui donner un fameux « coup de pouce énergétique » car il faut vaincre la résistance au mouvement, au démarrage, que l'on appelle « inertie » ... Il faut vaincre l'inertie pour la remettre en mouvement ... et c'est beaucoup plus facile lorsque c'est reparti ... Pour redémarrer l'éolienne asynchrone, il faut donc un fameux coup de pouce ... qui doit en fait être un fameux « coup de vent » ... et donc il faut que le vent augmente à un point tel qu'il puisse fournir la puissance nécessaire pour non seulement donner l'énergie de rotation normale de la « chaîne cinétique » mais surtout pour donner en plus l'énergie permettant de vaincre la force d'inertie ... C'est pour cette raison que, même si le vent augmente un peu, l'éolienne asynchrone reste figée, comme si elle était en panne ... C'est davantage qu'une panne apparente et c'est une véritable calamité car c'est une panne liée à une carence, à une mauvaise conception technologique, à une méconnaissance des lois de l'électricité et de l'électronique ... disons une panne d'incompétence ...

*Ce choix technologique d'un alternateur asynchrone présente plusieurs inconvénients graves :*

1. d'abord, il y a un **gaspillage d'énergie** en pure perte, rien que pour faire tourner à grande vitesse un alternateur mal conçu, via un multiplicateur où des roues dentées baignent dans l'huile qui s'échauffe ... et on exploite donc très mal l'énergie du vent avec une machine inadaptée
2. ensuite, il y a les **nuisances engendrées** comme les vibrations, le bruit mécanique et les fuites d'huile, les risques d'incendie, les usures et donc pièces à évacuer, ... car la technologie n'est **pas durable**, ce qui est paradoxal lorsque l'on dit agir dans le cadre du développement durable ... et du respect des riverains ...
3. enfin la **durée de vie réduite** à une bonne dizaine d'années, parfois à une vingtaine d'années en acceptant le remplacement de pièces importantes comme les roulements trop sollicités par les vibrations et les grandes vitesses de rotation, les engrenages, des éléments de l'alternateur asynchrone, ... souvent camouflée par un **appétit financier** à court terme : si la machine asynchrone ne tient que 15 ans, c'est bien suffisant pour un financier qui voit la durée des certificats verts lucratifs sur quelque 10 ans et qui préférera donc une machine de ce type asynchrone un peu moins coûteuse parce qu'il la remboursera en 7 ans et gagnera de nombreux euros pendant trois ans ... alors qu'avec une machine un peu plus coûteuse mais plus durable, son gain sera réduit à deux ans ou à même un an ... et le financier se moquera du fait qu'elle est plus durable et rendra des services pendant plusieurs décennies ...

*Avec GREENELECI, un alternateur ENERCON synchrone spécialement conçu pour très longtemps*

L'alternateur synchrone qui se trouve dans l'éolienne GREENELEC 1 fournie par ENERCON à GREENELEC Europe SA à Couvin est un alternateur multipolaire spécialement mis au point pour les éoliennes, ce qui signifie qu'il possède de très nombreux pôles. « Il y en a

tellement qu'on ne parvient pas à les compter », s'exclamait vers midi un enfant lors du montage le 21 septembre 2006.

On sait qu'un fil de cuivre qui se déplace dans un champ magnétique (un pôle magnétique tel que celui créé par un aimant par exemple) subit une transformation : ses électrons se déplacent et créent un courant électrique ... Dès qu'il y a passage devant un pôle, il y a déplacement des électrons dans le fil de cuivre et il y a donc naissance d'un courant électrique.

S'il n'y a que deux pôles (un positif, un négatif), il y a très peu de courant électrique si le bobinage de cuivre tourne lentement ... C'est la raison pour laquelle l'alternateur synchrone qui équipe l'éolienne de Couvin a été fabriqué avec un très grand nombre de pôles, et il y en a tellement que pour pouvoir les placer l'un à côté de l'autre, il fut nécessaire de prévoir une grande bague qui fait près de cinq mètres de diamètre ... et pèse 60 tonnes ... avec beaucoup de cuivre ... assez coûteux ... ! (Les voleurs n'ont pas eu le temps de venir se servir !!!)

L'avantage est qu'avec un si grand nombre de pôles, l'alternateur produit de l'électricité même s'il tourne très lentement et il peut tourner à des vitesses très variables, comprises entre deux tours par minute et vingt tours par minute ! En fait, il est directement placé sur l'arbre lent que font tourner les pales ... et il tourne donc exactement à la même vitesse que les pales. Il n'y a pas de chaîne cinétique car c'est l'arbre lent qui porte les pales et aussi l'alternateur synchrone et il n'y a donc aucune perte d'énergie : ***pas de frottements d'engrenages, pas de bruit, pas de vibrations car rien ne tourne rapidement, pas d'usure, pas d'huile à remuer, pas de fuites, pas de risques d'incendie, ... et donc durée de vie prolongée.***

De plus, l'énergie électrique qui sort de l'alternateur varie avec le vent et le courant électrique généré par l'alternateur synchrone multipolaire passe par un container où l'électronique règle très précisément la tension et la fréquence pour le réseau. C'est si bien fait, si parfait à la sortie de l'éolienne que cet électricité ne peut admettre que le réseau soit un peu imparfait et l'éolienne va même corriger automatiquement toutes les variations que connaîtra le réseau qui lui arrive ... A la moindre variation de tension provoquée par un consommateur à proximité du point d'injection, dans cette zone de Couvin, l'éolienne corrigera immédiatement la baisse soudaine de tension avant même que les distributeurs de réseau ne s'en aperçoivent ... L'énergie électrique générée par cette éolienne synchrone est donc d'une très grande qualité ... si bien qu'elle ne peut être comparée à la mauvaise qualité de l'énergie électrique produite par une technologie asynchrone ...

Dans l'éolienne de Couvin, rien que l'alternateur en fait un ***must technologique*** en comparaison avec les nombreuses éoliennes multimégawatt qui se sont installées en Wallonie et ailleurs ... car c'est l'électronique qui remplace la mécanique ... pour un développement vraiment durable ...

4. les autres constituants, comme les nombreux appareils fabriqués à base d'**inox** (interrupteurs fin de course, supports de pièces, ...) et notamment les moteurs d'orientation de l'éolienne (qui contribuent à limiter le balancement causé par le moindre jeu entre les couronnes : c'est très important pour la durée de vie de l'éolienne). Chez la concurrence, on en trouve deux ou trois quand tout va bien ... et ils sont six (trois à gauche et trois à droite) chez ENERCON E82. Il en va de même du système de frein d'immobilisation qui est composé de deux unités de vérins électriques en inox ... alors que la plupart des concurrents équipent leurs éoliennes d'un seul frein hydraulique (huile) en simple acier ...

*Pour ces raisons, ENERCON (société qui a fabriqué 41,7 % des éoliennes placées en Allemagne en 2005) considère que cette éolienne E82 est **beaucoup plus solide et plus durable** que la concurrence et cette société est donc la seule à proposer un contrat d'assurance-entretien de type « omnium » pour une durée initiale de douze années ! La durée de vie réelle d'une machine étant habituellement de l'ordre du quintuple de cette « garantie », il est permis de s'attendre à une durée de vie de l'éolienne **ENERCON doublant largement la durée de vie des machines concurrentes.***

## Quelle sera l'énergie produite ?

Pour la quantité d'énergie électrique produite, les mesures de vents font état d'une vitesse moyenne de quelque

Hauteur en mètres	Vitesse moyenne m/s
42	3.97
48	4.08
50	4.3

En estimation linéaire, la vitesse moyenne, estimée au niveau du moyeu de rotation des pales, atteindrait 7.514 m/s, ce qui donne avec l'éolienne ENERCON E82 plus de 5 millions de kWh par an. Les données récentes relatives aux résultats obtenus avec les prototypes de cette éolienne confirment cette estimation : « en comparaison avec l'éolienne ENERCON E70, la nouvelle éolienne E82 génère 20 à 25 % d'énergie supplémentaire à la même hauteur de mât mais avec une variation liée à la qualité du vent » (Windblatt 02 2006 p6).

Selon le rapport de mesures de ENERGIE 2030, il apparaît que,

1. si l'on s'en tient à une projection sur base de l'éolienne de 500 kW placée à Saint Vith qui, sur un tel site en production normale produirait quelque 900 000 kWh, il est possible de s'attendre au quadruple tenant compte de la puissance nominale installée (2000 kW au lieu de 500 kW), et donc d'espérer produire annuellement 3.600.000 kWh ... mais la technologie de cette éolienne date de plus de dix années et des progrès très importants ont été réalisés depuis lors ...
2. si l'on s'en tient à la prévision prévue avec une ENERCON E70 sur mât de 98 mètres, telle que mentionnée dans le rapport de mesures, la production annuelle serait de l'ordre de 5.785.600 kWh, sachant qu'il est conseillé de «réaliser le calcul de rentabilité avec prudence et de déduire une marge de 30 % sur les résultats obtenus» ... soit  $5.785.600 - 1.735.500 = 4.050.100$  kWh annuels ... soit une puissance moyenne de 462.3 kW
3. C'est donc sur base de 450 kW de puissance moyenne qu'il fut proposé d'effectuer le calcul de rentabilité ... même si l'éolienne E82 est promise à une production dépassant de plus de 20 % l'éolienne E70 utilisée dans le rapport de mesures de vents rédigé lorsqu'aucune E82 n'existait. Sur base d'une puissance moyenne de 450 kW, la production quotidienne (24 heures) serait de 10800 kWh et, annuellement (360 jours effectifs), de 3.888.000 kWh, ce qui constitue notre base de travail pour le plan financier.