



Eolerm

Eolienne (Puissance nominale 1kW ou 3kW) **COMMUNICANTE** et instrumentée

CAP Electricien , Bac Pro MELEC / CIEL
BTS Electrotechnique - IUT
Universités - Ecoles d'ingénieurs

Points forts

- ✓ Étude personnalisée et installation de votre éolienne connectée au réseau
- ✓ Petite éolienne professionnelle
- ✓ Solution offrant une puissance électrique significative sans permis de construire et sans nuisance sonore
- ✓ Communication des données de production d'énergie solaire sur le site à l'intérieur du lycée (par tableau d'affichage) et à l'extérieur du lycée (via une liaison Internet)
- ✓ Suivi des données de fonctionnement de l'installation en local ou à distance
- ✓ Multiples possibilités d'acquisition de mesure pour diagnostic (Tensions, Intensités, Vitesse du vent, Bruit, Températures...)
- ✓ Activités de mesurage, bilans énergétiques, dimensionnement et justification de composants, communication, construction mécanique, maintenance, chantier, analyses technico-économiques...

Composats particuliers

- ✓ Petite éolienne (Hauteur de mât inférieure à 12m) de puissance nominale 1 ou 3kW sur mat à haubans ou autoporteur
- ✓ Cas Injection réseau:
 - Redresseur / Régulateur de tension électronique
 - Onduleur répondant à la norme DIN VDE 0126
- ✓ Système d'acquisition et traitement des données en local sur PC ou à distance



Eolienne 3000 W installée au Lycée Jules Renard Nevers



Eolienne 2500 W installée au Lycée Jean Moulin Béziers



Architecture système

Points de mesures accessibles sur les coffrets (Fiches double puits, Boucles de courant):

- ✓ Tension continue en sortie d'éolienne (Le redressement de la génératrice est fait dans la tête de l'éolienne))
- ✓ Tension continue en sortie du coffret de régulation
- ✓ Tension alternative en sortie de l'onduleur
- ✓ Courant en sortie d'éolienne,
- ✓ Courant en sortie du coffret de régulation
- ✓ Courant en sortie de l'onduleur

Caractéristiques des éoliennes 3kW / 1kW

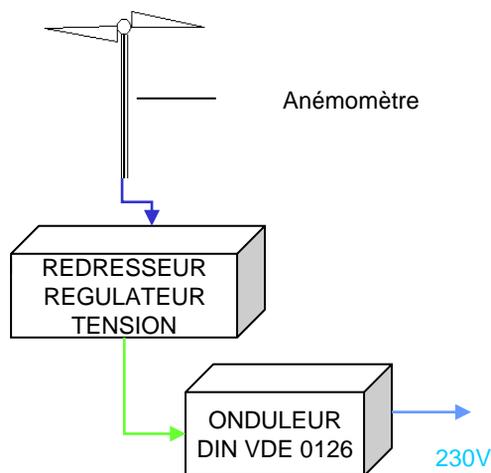
- ✓ Aérogénérateur 3 pales (Marque Kestrel, Modèle e400i / e300i)
- ✓ Système de régulation de vitesse de rotation à pas variable
- ✓ Générateur à entraînement direct, brushless à aimants permanent
- ✓ Puissance 3000W à 11m/s (e400i), 1000W à 11m/s (e300i)

Caractéristiques de l'onduleur pour éolienne 3kW

- ✓ Onduleur 3.6kW (Marque PowerOne, Modèle PVI-3.6-W)
- ✓ Profil de courbe de charge à 16 points
- ✓ Rendement maximal: 96.8%
- ✓ Supervision de fonctionnement

Caractéristiques de l'onduleur pour éolienne 1kW

- ✓ Onduleur 1.2kW (Marque SMA, Modèle WB 1200)
- ✓ Profil de courbe de charge à 4 points
- ✓ Rendement maximal: 92%
- ✓ Supervision de fonctionnement





Synoptique de l'installation



Comparaison des petites éoliennes fréquemment proposées en France

	WH3 GE	Skystream	ERM (Kestrel)
Type de régulation	Par effacement latéral (furling) entraînant des désorientations fréquentes et brutales, ainsi qu'une courbe de puissance dégradée par vent fort. Le fonctionnement sans charge électrique est préjudiciable.	Electronique uniquement. L'éolienne s'arrête dès que les conditions de fonctionnement sortent des limites constructeur. En cas de défaut de l'électronique, l'éolienne ne dispose plus d'aucune protection. Elle ne peut pas tourner sans charge électrique.	Dispositif passif de régulation par contrôle mécanique du pas. Fiabilité optimale et puissance optimale. Pas de désorientation.
Mode d'orientation	Safran articulé instable.	Eolienne en configuration « aval » ayant du mal à s'orienter sur les vents faibles.	Safran fixe. Orientation stable et optimale.
Onduleur	Externe. Le SMA Windy Boy généralement utilisé est peu adapté aux éoliennes car c'est un onduleur photovoltaïque dont seule la partie software a été adaptée. Son rendement en éolien est faible et son paramétrage limité.	Intégré à l'éolienne, il est inaccessible et ne peut être paramétré. Il n'a aucun intérêt pédagogique. En cas de panne, il nécessite une manœuvre du mât.	L'onduleur PowerOne PVI-3.0 est externe et permet un paramétrage complet, sans mise en danger de l'éolienne.
Alternateur	Alternateur à flux radial à stator bobiné. Les aimants étant situés sur le rotor, ils sont soumis à la force centrifuge et peuvent être projetés en cas de dysfonctionnement. Cette panne est fréquente en petit éolien et provoque la destruction de l'alternateur.	Alternateur inaccessible.	Alternateur discoïde à flux axial, léger et disposant d'un couple résistant au démarrage minimal pour permettre l'exploitation des vents faibles.



Approche pédagogique

Activités pédagogiques envisagées (Eolerm Connecté Réseau)

Dimensionnement & Bilans énergétiques

- ✓ Analyse fonctionnelle
- ✓ Dimensionnement d'une installation et évaluation de la production d'énergie
- Utilisation de données météo pour déterminer le potentiel éolien
- Utilisation d'un logiciel de dimensionnement d'une installation
- ✓ Vérification des données de dimensionnement de l'installation (Puissance éolienne, Sections de câbles, Puissance onduleur, Taille protections...)

Analyses économiques et environnementales

- ✓ Analyses technico-économiques (Cas d'un particulier, d'une entreprise, d'une collectivité...)
- Comparaison de l'éolien avec d'autres moyens de production locale d'électricité (Solaire, Co-génération...)
- Etude de coûts et Temps de retour sur investissement en fonction des subventions
- ✓ Enjeux de la production d'électricité locale dans les pays en voie de développement
- ✓ Analyses environnementales
- Emissions de CO2 évitées
- Problématique de la production décentralisée comparée à la production centralisée (Pertes en ligne...)

Production de l'énergie électrique

- ✓ Mesures et interprétation de données (Courant, Tension, Vitesse du vent)

Transformation de l'énergie électrique

- ✓ Etude de l'onduleur (Mesures pour calcul du rendement en fonction de la puissance nominale...)
- ✓ Paramétrage de l'onduleur (Fonction Recherche du Point de Puissance Maximal MPP...), synchronisation réseau
- ✓ Analyse de la chaîne de puissance (Protections CC, AC avec parafoudre). Réponse aux exigences réglementaires d'EDF
- ✓ Distribution et la tarification de l'énergie électrique
- ✓ Qualité de l'énergie électrique et pollution des réseaux avec des mesurages adéquats et performants
- ✓ Mise en service de l'équipement, régulation et synchronisation

Equipements Communicants

- ✓ Etude et définition du support d'un réseau communicant
- ✓ Recherche des limites de fonctionnement entre les deux interfaces
- ✓ Recherche de la compatibilité entre les systèmes communicants
- ✓ Dialogue expérimental entre les systèmes communicants, établissement d'un protocole de test et analyse des performances
- ✓ Définition des services apportés par le système communicant (Plus values pour l'utilisateur et le gestionnaire)

Mise en service & Réalisation (Chantier)

- ✓ Planification de l'installation par les élèves avant passage du professionnel (Demande de travaux auprès de la mairie, Collecte des plans du lycée, Identification des chemins de câbles à utiliser, Détermination des sections de câbles...)
- ✓ Renforcement de câbles et pose de câbles entre le panneau et le l'armoire technique
- ✓ Remplacement des coffrets de protection
- ✓ Mise en service de l'installation
- ✓ Procédure et conditions de connexion au réseau
- ✓ Exécution du protocole de demande de revente d'énergie avec E.D.F
- ✓ Câblage et raccordement de panneaux supplémentaires
- ✓ Mise en place de l'acquisition de données de vent
- ✓ Mise en place de la communication suivant le protocole choisi

Maintenance

- ✓ Diagnostic à distance (Création de pannes: Câble déconnecté...)
- ✓ Planification et organisation des interventions de maintenance (Vérification des connexions, de l'éolienne...)

Travaux Pratiques disponibles (Orientés 2nd):

- ✓ Etude de la chaîne d'énergie
- ✓ Recherche de paramètres
- ✓ Identification des fonctions des composants du système
- ✓ Analyse environnementale (carte des vents, anémomètre,...)
- ✓ Modélisation de pièces mécaniques (girouette, anémomètre,...)
- ✓ Etude de la chaîne de la transformation d'énergie
- ✓ Mini projet : adaptation d'un anémomètre
- ✓ Etude environnementale

Travaux Pratiques disponibles (Bac STI2D):

- Etude de solutions constructives (déclenchement pales, guidage, étanchéité, fonctions aérodynamique esthétiques, choix des matériaux, choix des constituants,...)
- ✓ Caractérisations mécaniques statique et cinématique
- ✓ Caractérisation de signaux par l'intermédiaire du serveur web (alternatif triphasé, amplitude des surfaces variables, courant continu, alternatif)
- ✓ Rendement sur banc : caractérisation de la génératrice en fonction de la vitesse et de la charge
- ✓ Caractérisation de l'éolienne : détermination de la courbe du coefficient de puissance de l'éolienne
- ✓ Etude de la conversion d'énergie et de signaux
- ✓ Etude des protections (parafoudre)
- ✓ Mesures de tension, courant, fréquence, puissance et mise en évidence de la notion de courbe de charge
- ✓ Etude des capteurs, mesures et adaptation de signaux (anémomètre, girouette)
- ✓ Etude de la conversion de signaux (entre la carte d'acquisition et le serveur web)
- ✓ Création d'une page web et d'un site web
- ✓ Etude environnementale

Travaux Pratiques disponibles (Bac STI2D):

- Mesures de performance (ex : calcul de production annuelle)
- ✓ Détermination de la courbe de charge
- ✓ Dimensionnement d'une installation (constituants, câbles, protections...)
- ✓ Etude technique, économique et environnementale
- ✓ Planification de projet et organisation de chantier (génie civil,)
- ✓ Réalisation et exécution d'un moyen de production : réalisation de l'armoire (fourniture de composants et intégration d'un onduleur différent de celui monté sur le système)
- ✓ Essais et mise en service et contrôle
- ✓ Réalisation du dossier technique



Informations sur le petit éolien

Les trois familles d'éoliennes

- ✓ Le "grand éolien" : machines de plus de 500 kW
- ✓ L'éolien de moyenne puissance (entre 20 kW et 300 kW)
- ✓ Le petit éolien (entre 100 watts et 20 kW).

Les trois familles d'éoliennes

- ✓ La puissance instantanée délivrée par une éolienne dépend de la formule suivante:
 - P : puissance de l'éolienne en Watts
 - η : rendement de l'éolienne (entre 0,3 et 0,45 pour le petit éolien)
 - S : surface du disque couvert par l'hélice en m²
 - v : vitesse du vent en m/s
 - B : limite de Betz (0,59)
 - ρ : densité de l'air, kg/m³ : 1,25 au niveau de la mer
- ✓ Le rendement η tient compte de plusieurs facteurs de pertes:
 - Hélice (Rendement maximum: 85%)
 - Multiplicateur (Rendement maximum: 95%)
 - Générateur (Rendement maximum: 98%)
 - Transformateur (Rendement maximum: 98%)
 - Redresseur (Rendement maximum: 98%)
 - Impossibilité d'avoir tous les organes à leur rendement maximum en même temps
- ✓ A titre de comparaison, les grandes éoliennes ont un rendement moyen de 50 à 55%.

$$P = \frac{1}{2} \rho S v^3 B \eta$$

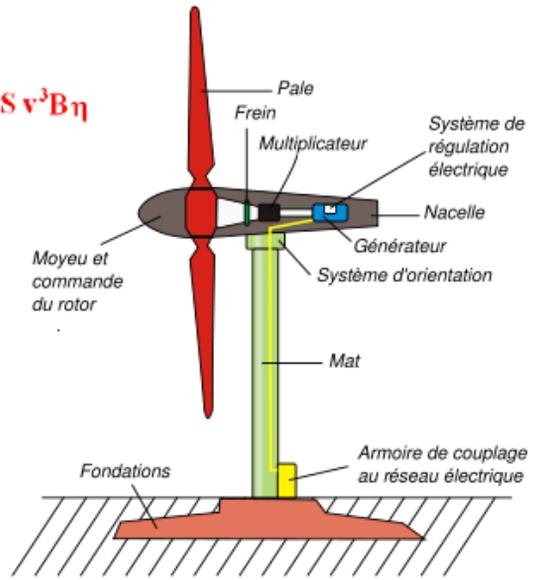
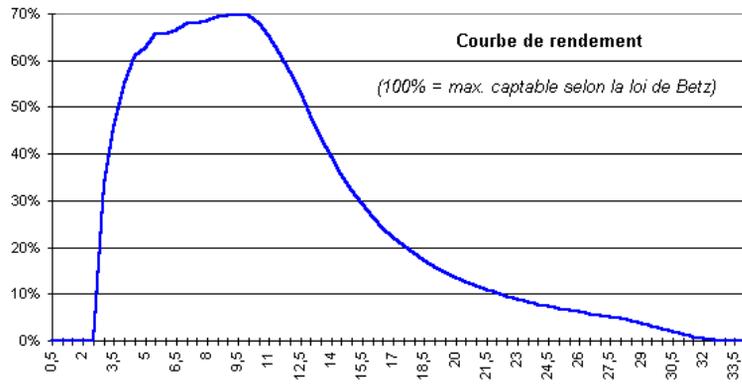
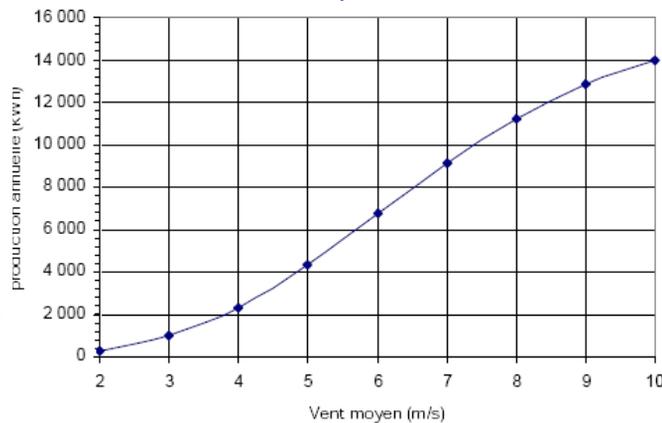


Schéma de principe d'une éolienne



Courbe de rendement d'une éolienne de 500kW

Production annuelle de l'éolienne 3kW en fonction de la vitesse moyenne des vents



Vitesse de vent et régulation aérodynamique

- ✓ Le vent étant très irrégulier, les éoliennes sont dotées d'un système de régulation (pas variable) permettant de garder une vitesse de rotation plus constante. Cette vitesse-seuil dépend de l'éolienne et se situe autour de 12m/s. La puissance nominale donnée par les constructeurs est donnée pour cette vitesse-seuil. Il est à noter qu'une éolienne débite quasiment autant d'électricité par un vent de 12,5 m/s que par un vent de 25 m/s.
- ✓ Une des raisons expliquant ce système de régulation tient de la construction mécanique. En effet, une éolienne capable de récupérer tout l'énergie d'un vent de 25m/s devrait supporter des efforts 8 fois plus importants. D'où un coût de fabrication bien supérieur pour quelques heures de fonctionnement à 25m/s par an.

Techniques de régulation pour les éoliennes à axe horizontal

- ✓ Le pas variable permet de modifier l'orientation des pales sur le moyeu et ainsi de modifier l'énergie récupérée par l'éolienne. Il permet d'arrêter l'éolienne afin de la protéger des vents violents (en plaçant les pales en drapeau et en réduisant donc la prise au vent) ou à maximiser l'énergie absorbée par l'éolienne pour la faire démarrer ;
- ✓ Le pas fixe empêche les pales d'accélérer en utilisant l'effet Stall qui agit comme un frein par le décrochage aérodynamique au niveau de la pale du rotor
- ✓ Les volets (aérofrein ou flaps) s'ouvrent automatiquement, si la vitesse du vent devient excessive et ralentissent les pales ou diminuent leur portance en provoquant un décrochage aérodynamique



Informations sur le petit éolien (suite)

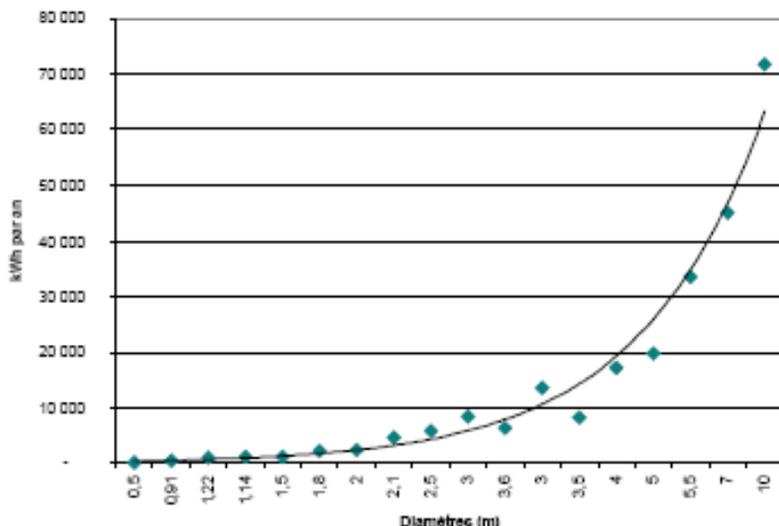
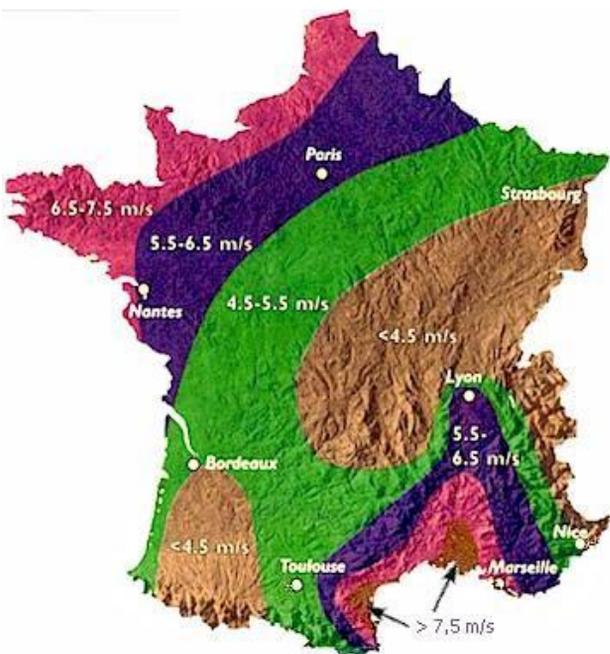
Temps de fonctionnement

- ✓ Le temps durant lequel l'éolienne travaille à la puissance nominale dépend de l'emplacement du site. Ce temps varie entre 2.000 et 3.000 heures par an.
- ✓ La prospection des sites possibles constitue le premier travail à effectuer pour juger de la possibilité d'utiliser le vent. Des relevés météorologiques complets sur les sites présumés sont effectués au moins pendant une année

Importance de la hauteur du mât

- ✓ La puissance de l'éolienne avec un mât de hauteur 40m est double que celle avec un mât de hauteur 10m
- ✓ Par ailleurs, avec la hauteur, les turbulences diminuent, donc durée de vie augmente.
- ✓ En effet, lorsque la direction du vent change, l'éolienne ne se met pas instantanément dans cette nouvelle direction: elle est lancée (effet gyroscopique du rotor). Avant d'être de nouveau dans la bonne direction, elle subit un effet de torsion.
- ✓ La (sur)multiplication de ces efforts entraîne une "fatigue" (et une rupture précoce en milieu turbulent). Il est donc important que l'axe de transmission (entre le rotor et la génératrice) soit bien dimensionné et que l'éolienne soit positionnée dans un milieu non turbulent.

Potentiel éolien en France



Production annuelle (kWh/an) en fonction du diamètre de l'éolienne à 6m/s