



## L'énergie éolienne dans les essais en laboratoire

- les bases de l'aérodynamique
- production d'énergie à partir de l'énergie éolienne
- technologie des engrenages, commande de l'installation et surveillance des machines pour les éoliennes modernes

## Table des matières

## Technologie d'avenir

Tandis que les roues à vent traditionnelles sont utilisées depuis des siècles à des fins d'entraînement mécanique, la production d'électricité au moyen d'éoliennes de grande taille connaît une percée véritable ces dernières années.

La tendance actuelle est aux grandes éoliennes équipées de rotors de grande taille. Cela tient avant tout au fait que l'on rencontre des vents forts en altitude. La vitesse du vent a un impact très important sur la vitesse de rotation du rotor. On voit ainsi aujourd'hui un nombre croissant de rotors dont le diamètre dépasse 100m.

Le processus de production d'énergie à partir de la force du vent recouvre, outre les aspects pratiques, de nombreux aspects théoriques. C'est pourquoi notre concept didactique sur l'énergie éolienne s'organise autour des différents champs d'apprentissage listés à droite.



L'apprentissage en ligne de GUNT offre un vaste matériel éducatif multimédia en ligne pour les expériences de laboratoire, soutenant ainsi la formation technique et les études d'ingénierie.

## Fondements de la technique de l'énergie éolienne

## Aérodynamique

HM 226  
**Soufflerie pour la visualisation de lignes de courant**  
HM 170  
**Soufflerie ouverte**  
HM 170.09  
**Corps de portance aile NACA 0015**  
HM 170.22  
**Répartition de la pression sur une aile NACA 0015**

## Production d'énergie à partir de l'énergie éolienne

HM 170.70  
**Éolienne avec calage des pales**  
ET 210  
**Principes de base des éoliennes**  
ET 220  
**Conversion de l'énergie dans une éolienne**  
ET 220.01  
**Éolienne**  
ET 220.10  
**Appareil de commande pour éolienne ET 220.01**

## Technique d'application sur les éoliennes

## Technologie des engrenages

AT 200  
**Détermination du rendement des engrenages**  
GL 210  
**Comportement dynamique des engrenages droits à plusieurs étages**  
GL 212  
**Comportement dynamique des engrenages planétaires à plusieurs étages**

## Commande de l'installation

ET 222  
**Transmission de l'énergie éolienne**  
ET 224  
**Comportement en service des éoliennes**

## Surveillance des machines

PT 500  
**Système de diagnostic de machines, appareil de base**  
PT 500.11  
**Jeu d'accessoires: arbre fissuré**  
PT 500.12  
**Jeu d'accessoires: dommages sur les paliers à roulement**  
PT 500.15  
**Jeu d'accessoires: dommages aux engrenages**  
PT 500.19  
**Jeu d'accessoires: vibrations électromécaniques**



## Connaissances de base Énergie éolienne

Le succès des éoliennes modernes doit beaucoup aux apports d'une grande diversité de sous-disciplines. D'un point de vue économique, les systèmes de surveillance des états des éoliennes

(en anglais: Condition Monitoring Systems – CMS) jouent un rôle de plus en plus important dans la gestion des parcs éoliens.



### Aérodynamique

L'aérodynamique est l'étude du comportement des corps dans un gaz compressible (air). L'aérodynamique décrit les forces permettant à une roue à vent de tourner ou à un avion de décoller.

Pour le dimensionnement d'une pale de rotor destinée aux éoliennes d'aujourd'hui, il faut tenir compte aussi bien des propriétés aérodynamiques que de la charge mécanique admissible. Pour répondre en particulier aux exigences posées par les éoliennes de très grande taille, on utilise souvent des profils de pale optimisés au fil de nombreuses simulations.

### Production d'énergie à partir de l'énergie éolienne

Pour pouvoir exploiter l'énergie éolienne, il faut commencer par transformer l'énergie cinétique du vent en énergie de rotation. L'énergie de rotation peut ensuite être utilisée par un générateur pour produire de l'énergie électrique. Comme dans tous les processus de transformation de l'énergie, on observe ici aussi des pertes à chaque étape de la transformation. En partant de la puissance éolienne utile maximale (limite de Betz), il faut lui soustraire des pertes aérodynamiques, mécaniques et électrodynamiques.

### Technologie des engrenages

Lors de la transmission de la puissance de l'axe du rotor en direction du générateur, deux conditions fondamentales doivent être respectées:

- bon synchronisme avec une vitesse de rotation et des couples aussi constants que possible
- bon ajustage de la plage de vitesses de rotation entre le rotor et le générateur

Bien que des progrès substantiels aient été réalisés ces dernières années dans le domaine des convertisseurs de fréquence, la construction des organes d'entraînement continue de reposer de manière générale sur l'utilisation de systèmes d'engrenages (multiplicateurs). Les engrenages permettent d'adapter la vitesse de rotation et la fréquence du générateur aux exigences du réseau de courant alternatif.

### Commande de l'installation

La performance des éoliennes dépend des composants mécaniques et électriques ainsi que d'une commande efficace de l'installation. L'influence des paramètres effectifs dans toutes les conditions de fonctionnement pertinentes doit être connue ici. Pour cela, la dépendance de la puissance du rotor par rapport à la vitesse du vent, la vitesse du rotor et l'angle des pales du rotor est prise en compte dans les caractéristiques correspondantes.

### Surveillance des machines

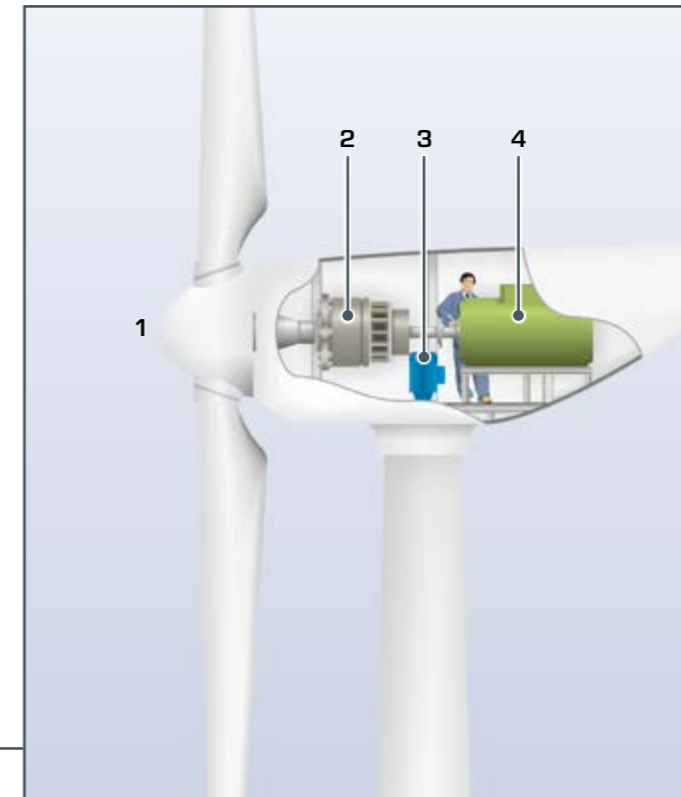
La construction et le fonctionnement d'une éolienne demandent des investissements très élevés. Une panne du palier de rotor, du multiplicateur ou de l'arbre de rotor a des conséquences financières.

Afin d'éviter toute panne, des analyses de vibrations sont réalisées en continu sur les éoliennes. L'objectif de ces analyses est de détecter aussi tôt que possible les composants endommagés afin de les remplacer avant la survenue d'une panne de l'éolienne.

Outre le rotor et le générateur, l'éolienne compte de nombreux autres composants dont l'association assure le fonctionnement et l'efficacité de celle-ci.

Les aspects suivants jouent un rôle central dans la formation des spécialistes du domaine technique de l'énergie éolienne:

- principe de fonctionnement et action combinée des différents composants
- montage et surveillance de fonctionnement

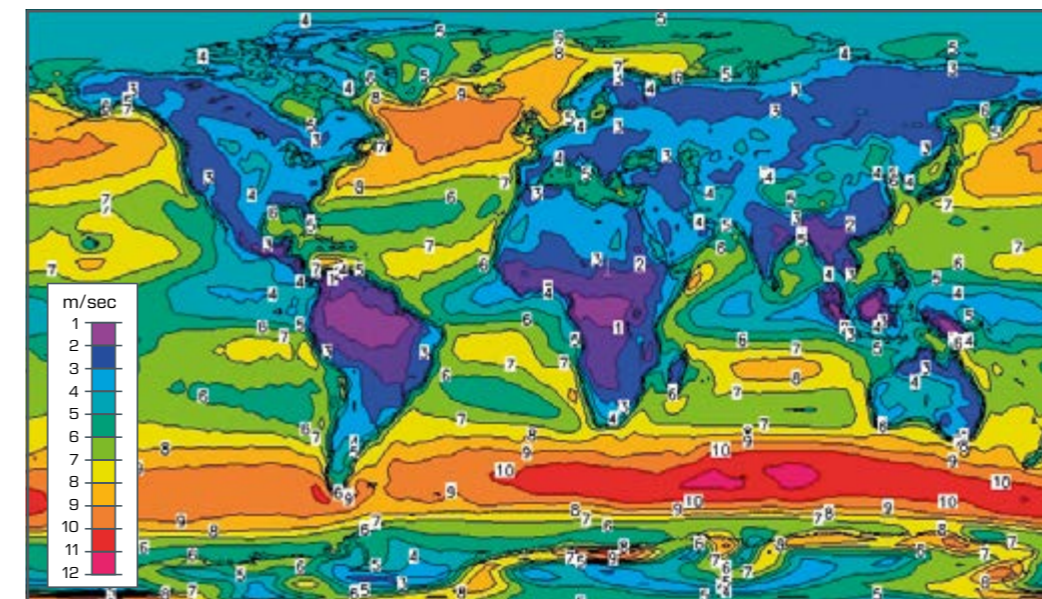


Structure d'une éolienne typique

- 1 rotor, 2 engrenage,  
3 moteur azimut, 4 générateur

### Potentiel global d'énergie éolienne

Le graphique montre le potentiel moyen global d'énergie éolienne sous la forme de surfaces colorées



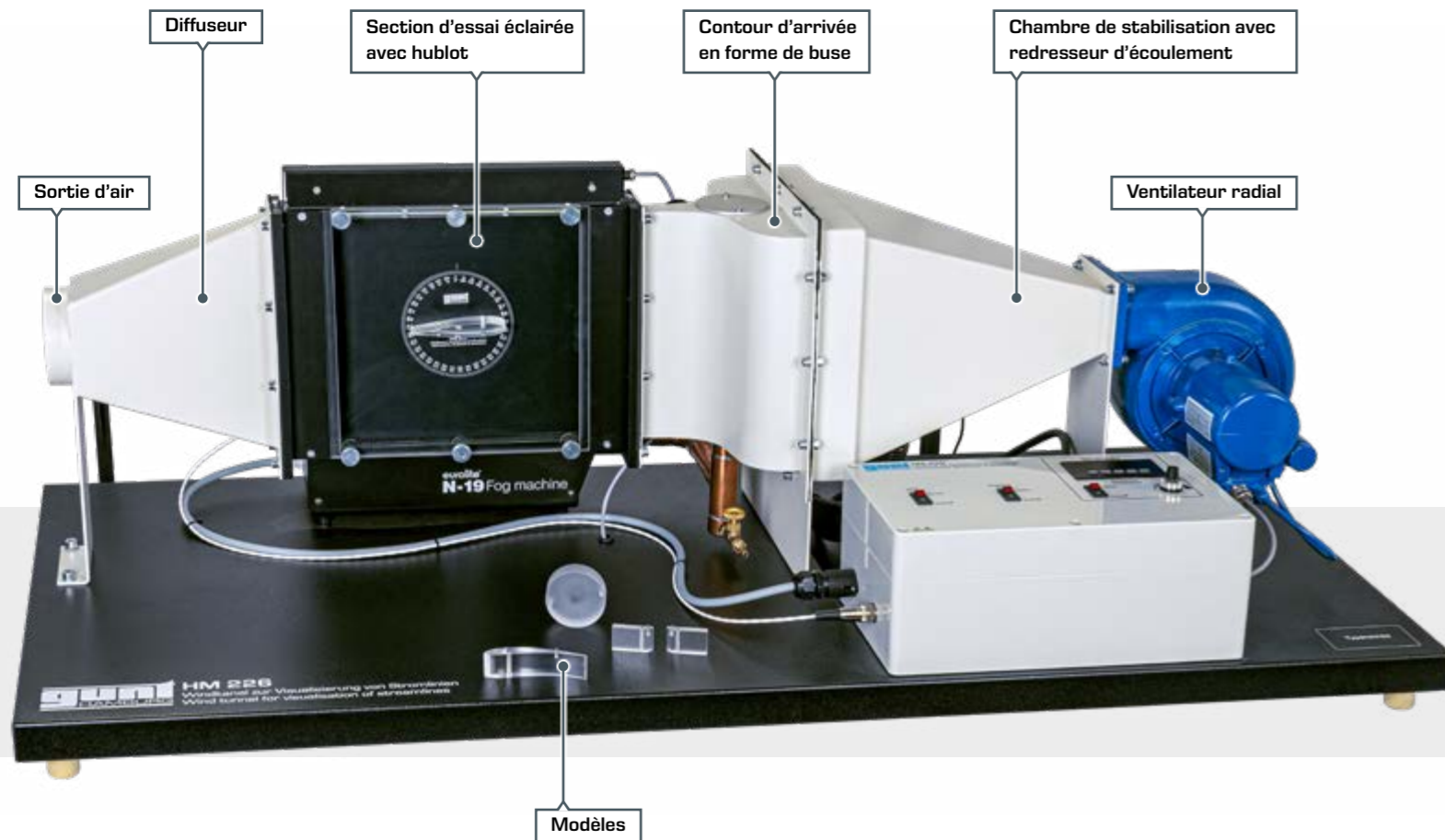


# HM 226

## Soufflerie pour la visualisation de lignes de courant

L'appareil d'essai HM 226 est une soufflerie ouverte, destinée à visualiser les lignes de courant, les décollements d'écoulement et les turbulences à l'aide de brouillard. Le fluide vaporisé n'est pas nocif. Il est soluble à l'eau et n'a aucun effet sur les matériaux conventionnels.

La section d'essai est munie d'un arrière-plan noir et d'une vitre; Les lignes de courant sont bien visibles grâce à un éclairage supplémentaire.

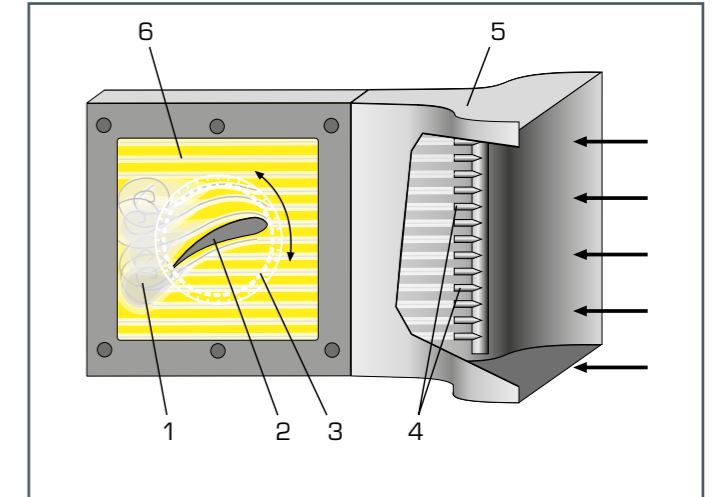


Quatre modèles interchangeables sont compris dans la livraison. L'angle d'incidence de l'aile porteuse est ajustable.



Modèles

1 aile, 2 plaque à orifice, 3 cylindre, 4 profilé d'aube directrice



Structure de la section d'essai

1 tourbillon, 2 modèle, 3 échelle d'ajustage de l'angle d'approche, 4 buses d'injection du brouillard, 5 contour d'arrivée en forme de buse, 6 section d'essai éclairée

Au produit:

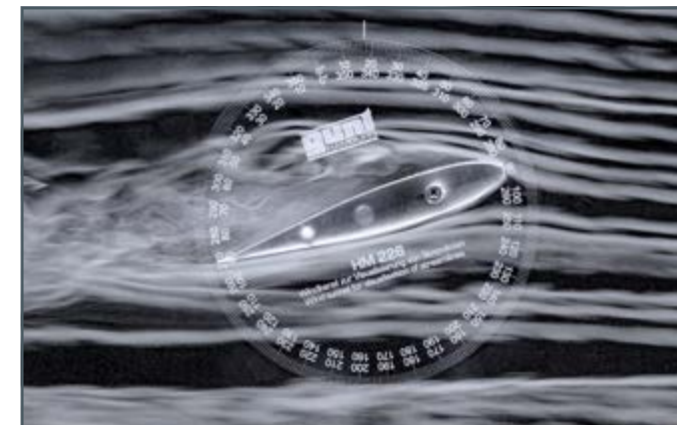


**Contenu didactique**

- visualisation des lignes de courant
- écoulement autour de corps, de traversant appliqué à différents modèles
- décollement d'écoulement et turbulences
- décrochage en fonction de l'incidence

**Features**

- fenêtre, éclairée pour optimiser l'observation des lignes de courant
- écoulement à faibles turbulences
- le champ d'écoulement est généré par injection de brouillard, grâce à plusieurs buses
- le générateur de brouillard est compris dans la livraison



Afficher les détails de la section d'essai

Le décrochage en fonction de l'angle d'attaque

## HM 170

Soufflerie ouverte  
avec accessoires

## Fondements de la transformation de l'énergie éolienne

Au début de la chaîne fonctionnelle d'une éolienne se trouve le rotor. La quantité d'énergie éolienne qui sera transformée en travail mécanique dépend pour l'essentiel des propriétés aérodynamiques de la pale de rotor.

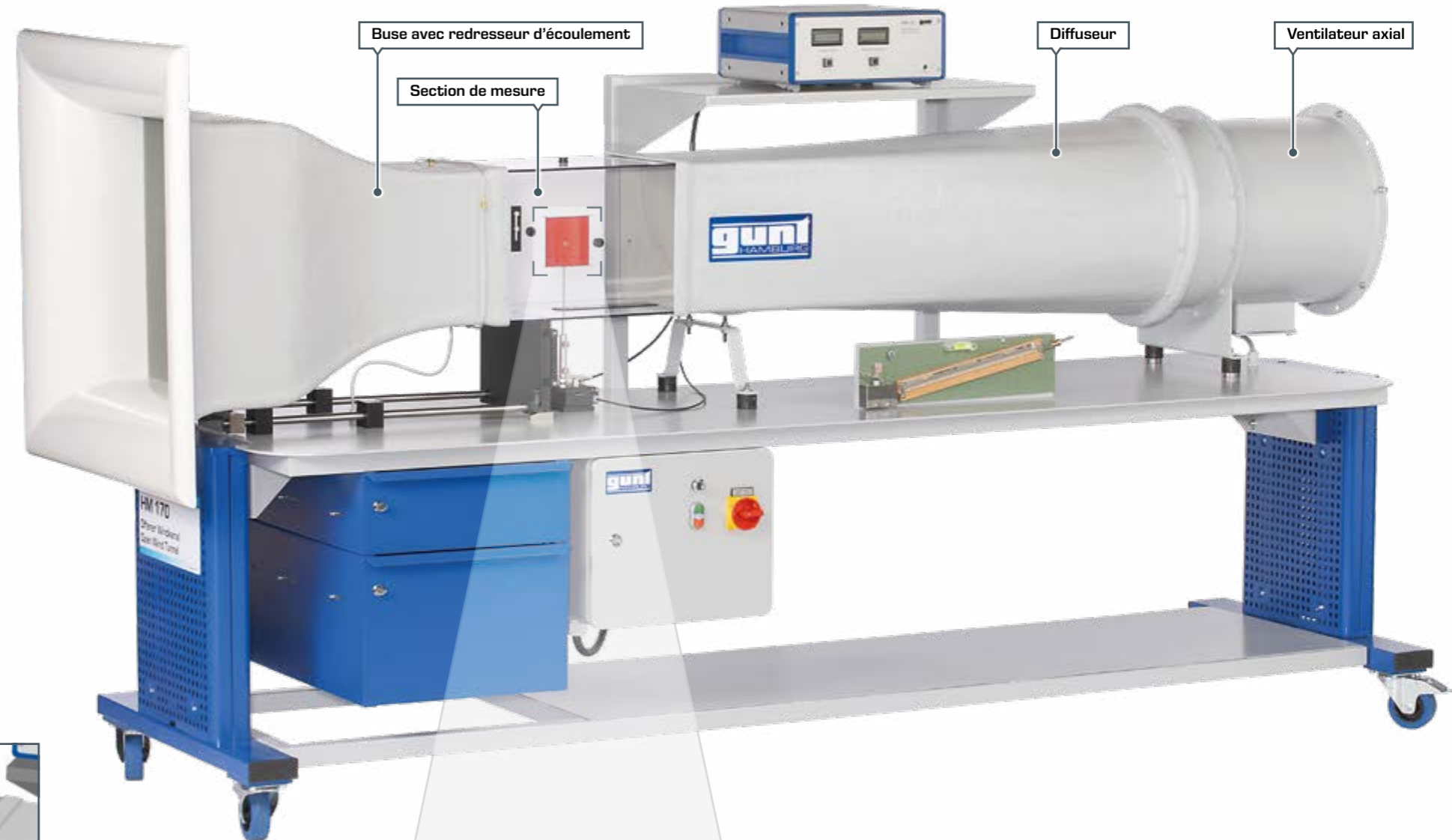
La soufflerie HM 170 permet la réalisation d'essais avec différentes formes de profils et profils de corps. On peut par exemple mesurer l'influence de l'angle d'attaque sur la répartition de la pression sur le profil. Les forces ascensionnelles et les forces de traînée résultantes déterminent la transformation de l'énergie cinétique du vent en travail mécanique au niveau de l'arbre du rotor.

Le HM 170 est une soufflerie ouverte de type « Eiffel » permettant de démontrer et mesurer les propriétés aérodynamiques de différentes maquettes. De l'air ambiant est pour cela aspiré et accéléré au moyen d'un redresseur d'écoulement. Le vent

contourne une maquette, par exemple une aile, à l'intérieur d'une section de mesure. Puis l'air est rejeté à l'extérieur sous l'action du ventilateur.

De nombreux accessoires sont disponibles pour la réalisation des différents essais avec le HM 170.

Au produit:

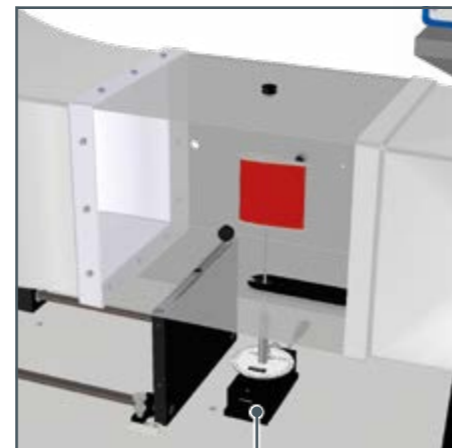


## Features

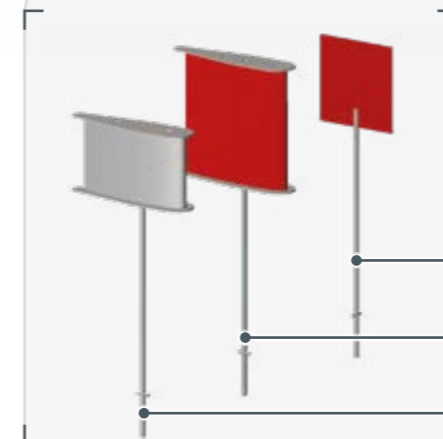
- soufflerie ouverte pour divers essais aérodynamiques
- écoulement homogène par un redresseur d'écoulement et contour de buses spécial
- section de mesure transparente

## Contenu didactique

- études sur des corps contournés
- enregistrement de la répartition de la pression sur une aile contournée
- mesure de la force ascensionnelle et de la force de traînée
- sustentation et décollement d'écoulement en fonction de l'angle d'attaque et de la vitesse d'écoulement



Capteur de force pour 2 éléments



Pour une initiation détaillée à l'aérodynamique des éoliennes, nous vous recommandons de commencer par des essais avec les accessoires suivants:

**HM 170.05**  
Corps de résistance carré percé

**HM 170.09**  
Corps de portance aile NACA 0015

**HM 170.22**  
Répartition de la pression sur une aile NACA 0015



# HM 170

## Soufflerie ouverte avec accessoires

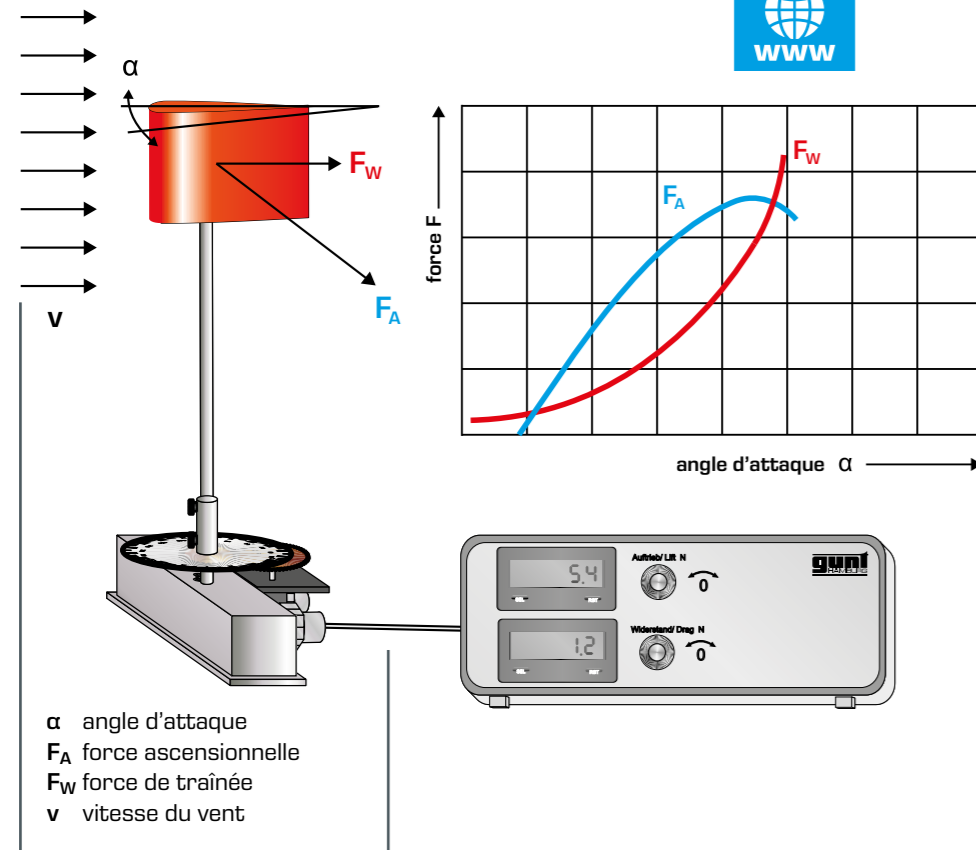
### HM 170.09

Corps de portance aile NACA 0015

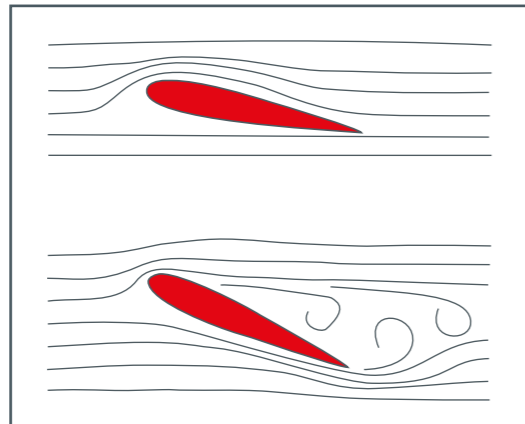
La force ascensionnelle est par définition perpendiculaire à la direction de l'écoulement incident. À une vitesse du vent donnée, la force ascensionnelle maximale peut être observée à un angle d'attaque caractéristique du profil de pale utilisé.

Avec le HM 170.09, vous enregistrez automatiquement les forces s'exerçant sur un profil de pale.

Au produit:



Contenu didactique	
■	analyses sur des corps soumis à un écoulement autour de corps
■	détermination du coefficient de traînée (coefficient $c_x$ )
■	détermination du coefficient de portance
■	avec le capteur de force HM 170.40 ▶ coefficient de moment



#### "Pitch" et "Stall" déterminent les caractéristiques de fonctionnement de l'éolienne

La force agissant sur la pale de rotor peut être ajustée par le biais de l'angle d'attaque (Pitch).

Le décrochage (Stall) est utilisé spécifiquement sur les petites éoliennes de manière ciblée pour limiter la vitesse de rotation du rotor.

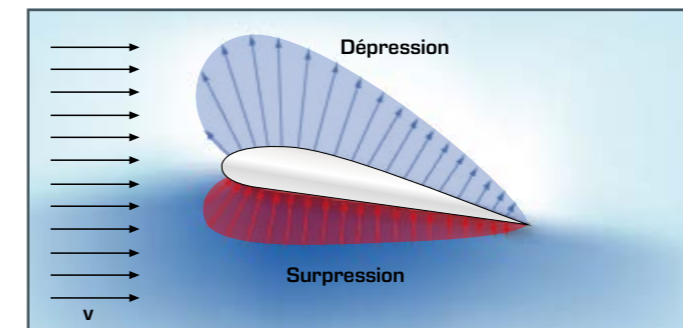
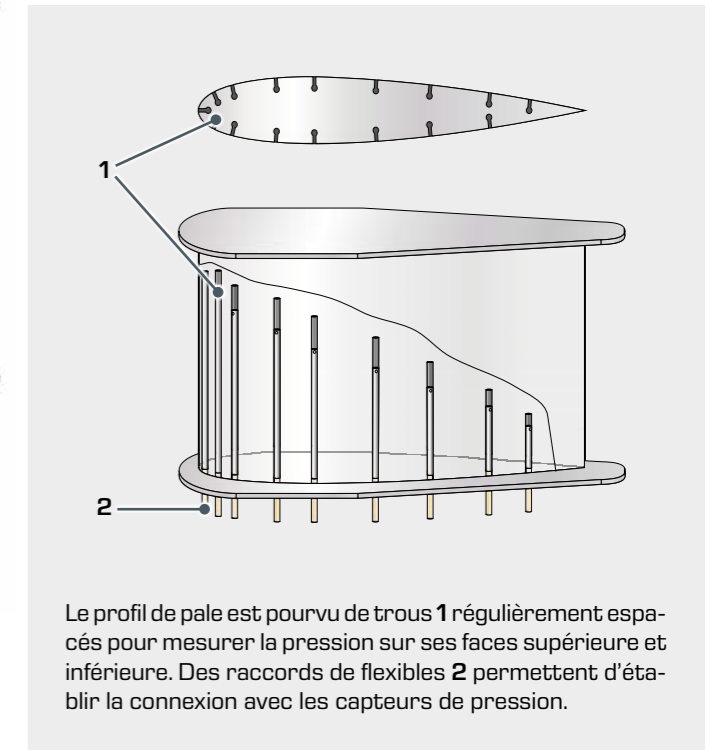
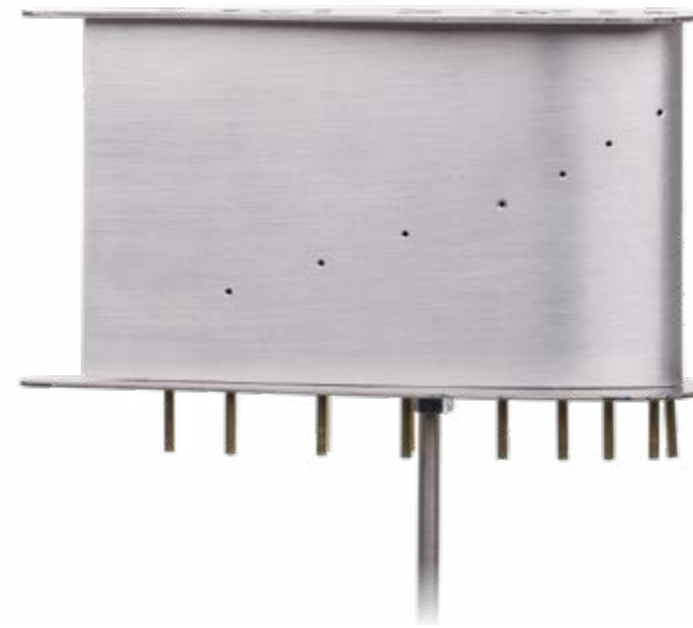
### HM 170.22

Répartition de la pression sur une aile NACA 0015

La mesure de la répartition de la pression autour d'un profil d'aile permet d'inculquer à l'élève des connaissances de base sur la génération de la force ascensionnelle.

Avec le HM 170.22, la répartition de la pression est démontrée sur le profil de pale NACA 0015.

Au produit:



Pour que se forme une sustentation sur un corps contourné par du vent, il faut que l'on ait une surpression sur la partie inférieure du corps et une dépression sur sa partie supérieure.

Contenu didactique	
■	répartition de la pression sur une aile soumise à un écoulement autour de corps ▶ en fonction de l'angle d'incidence

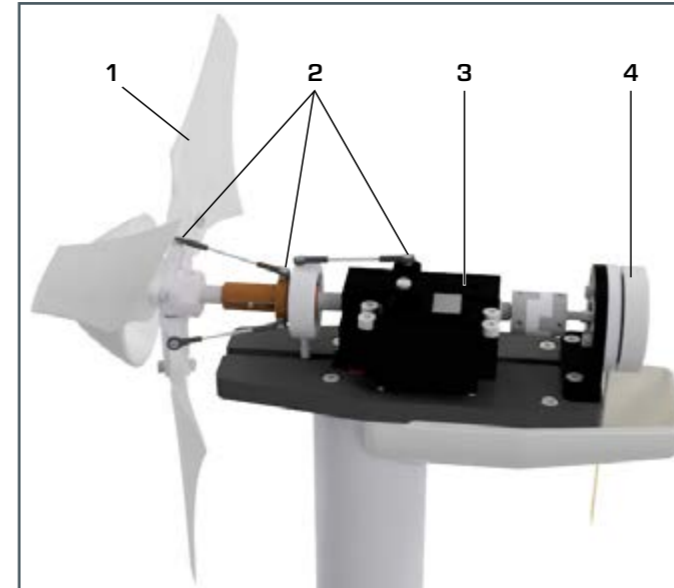
# HM 170.70

## Éolienne avec calage des pales

Avec la soufflerie HM 170, HM 170.70 permet la démonstration d'une éolienne avec ajustage des pales du rotor et générateur à vitesse de rotation variable. Le ventilateur axial dans la soufflerie dispose d'une vitesse de rotation variable et fournit l'écoulement d'air nécessaire pour réaliser les essais. Le générateur est directement entraîné par un rotor à 3 pales. L'angle d'inclinaison des pales du rotor est modifié à l'aide d'un servomoteur.

Pour passer à différents points de fonctionnement, la vitesse de rotation de consigne du générateur peut être spécifiée avec un régulateur. La vitesse de rotation du rotor est enregistrée avec précision grâce à des capteurs Hall intégrés dans le générateur. Pour l'étude de différentes formes, des pales de rotor à profil droit et optimisé sont incluses dans le volume de livraison.

Au produit:



Composants de l'éolienne

1 pale de rotor, 2 ajustage des pales de rotor, 3 servomoteur, 4 générateur



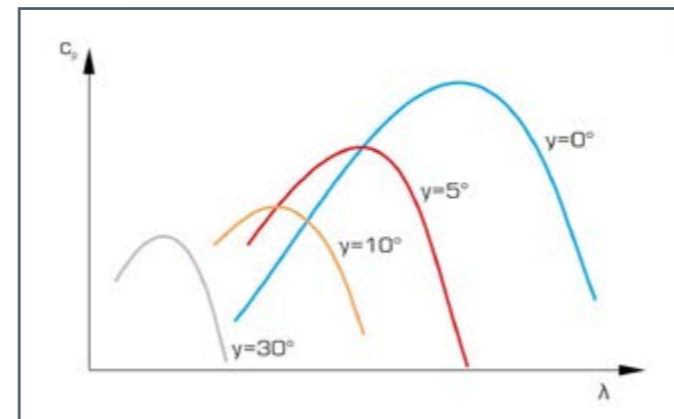
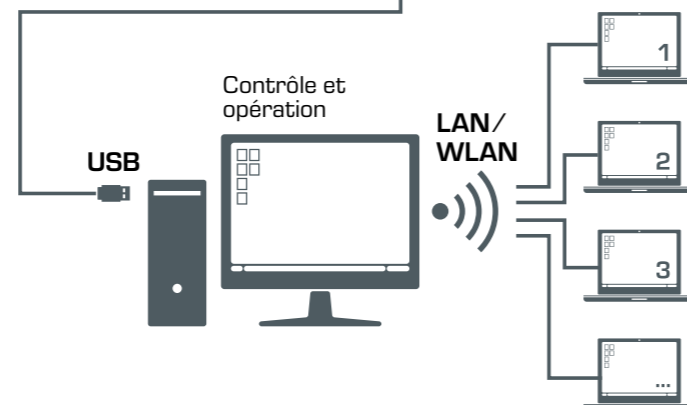
HM 170.70 connecté à la soufflerie ouverte HM 170

### Features

- éolienne à vitesse de rotation variable
- angle réglable des pales du rotor par servomoteur
- possibilité d'examiner ses propres formes de pales de rotor (impression 3D)
- capacité de mise en réseau: observer, acquérir, évaluer des essais via le réseau propre au client

### Contenu didactique

- conversion de l'énergie cinétique en énergie électrique
- ajustage de la puissance par
  - ▶ ajustage de la vitesse de rotation
  - ▶ ajustage des pales de rotor
- comportement en cas d'écoulement incident oblique
- détermination du diagramme caractéristique coefficient de puissance-vitesse spécifique
- comparaison de différentes formes de pales de rotor



Coefficient de puissance par rapport à la vitesse spécifique à différents angles d'inclinaison de la pale du rotor et à vitesse du vent constante



# ET 210

## Éolienne compacte

Sur les éoliennes modernes, la puissance absorbée issue du vent est ajustée aux différentes conditions de vent. Sur la plage de vents forts, on limite la puissance absorbée afin de protéger l'installation. C'est à cela que sert le calage des pales. Il permet de modifier l'angle des forces s'exerçant sur une pale. Sur la plage de vents ordinaires, la puissance absorbée est optimisée par des systèmes de générateurs à vitesse variable.

L'ET 210 montre le fonctionnement d'une éolienne avec calage des pales et générateur à vitesse variable. L'écoulement d'air est généré par un ventilateur. Un redresseur d'écoulement assure l'homogénéité de l'écoulement et empêche la formation de tourbillons. Un rotor à trois pales entraîne directement le générateur. Pour l'étude de différentes formes, des pales de rotor à profil droit et optimisé sont incluses dans le volume de livraison.

Au produit:

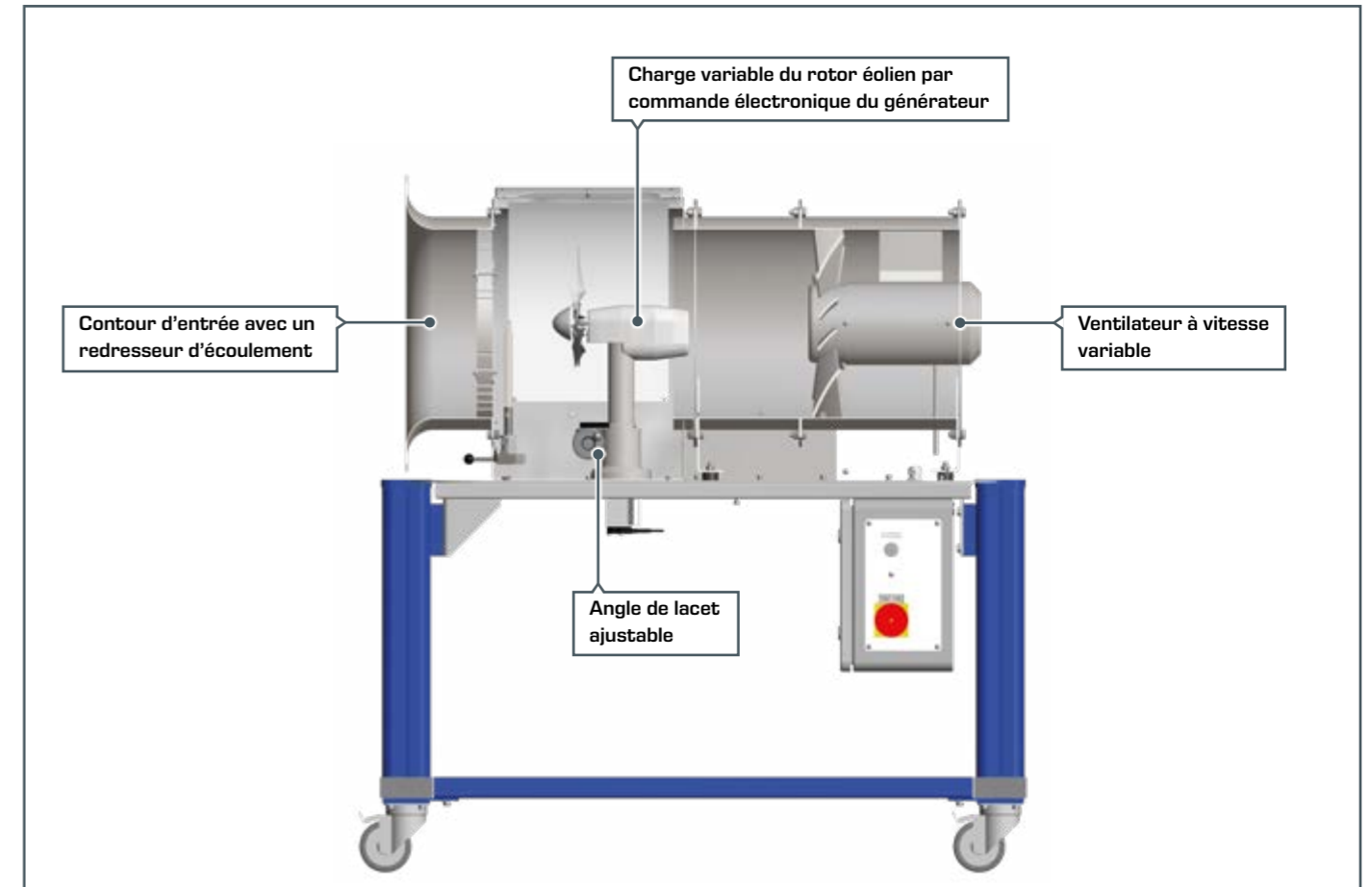
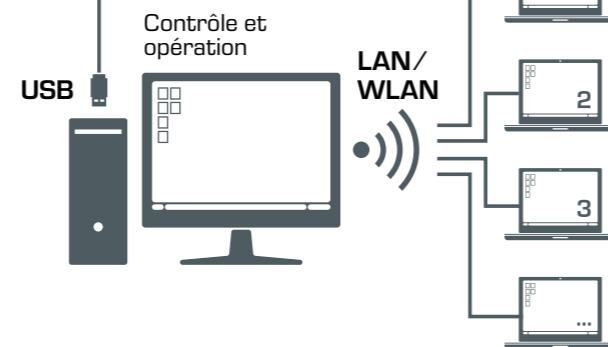


### Features

- appareil compact, les essais peuvent être effectués sans accessoires supplémentaires
- éolienne à vitesse de rotation variable
- calage des pales et ajustage de l'angle de lacet
- capacité de mise en réseau: observer, acquérir, évaluer des essais via le réseau propre au client

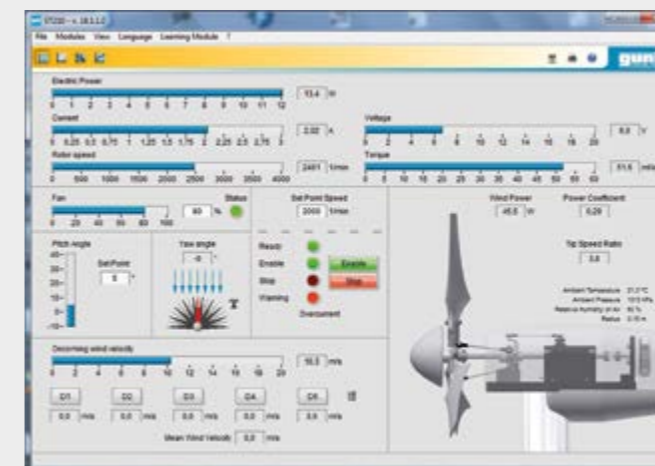
### Contenu didactique

- conversion de l'énergie cinétique en énergie électrique
- ajustage de la puissance par
  - ▶ ajustage de la vitesse de rotation
  - ▶ ajustage des pales de rotor
- comportement en cas d'écoulement incident oblique
- détermination du diagramme caractéristique coefficient de puissance-vitesse spécifique
- comparaison de différentes formes de pales de rotor

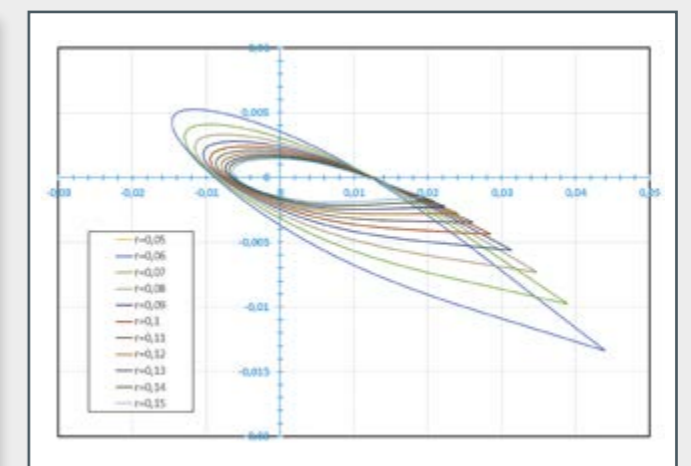


### Software

Le logiciel calcule la puissance électrique transformée, le couple du générateur ainsi que les caractéristiques spécifiques de l'installation.



Logiciel GUNT pour le contrôle des appareils et l'acquisition de données de mesure via un PC



Résultats calculés pour une séquence de segments sur une pale de rotor. Modification de la profondeur et de la torsion de la pale en fonction du rayon de la pale.



# ET 220

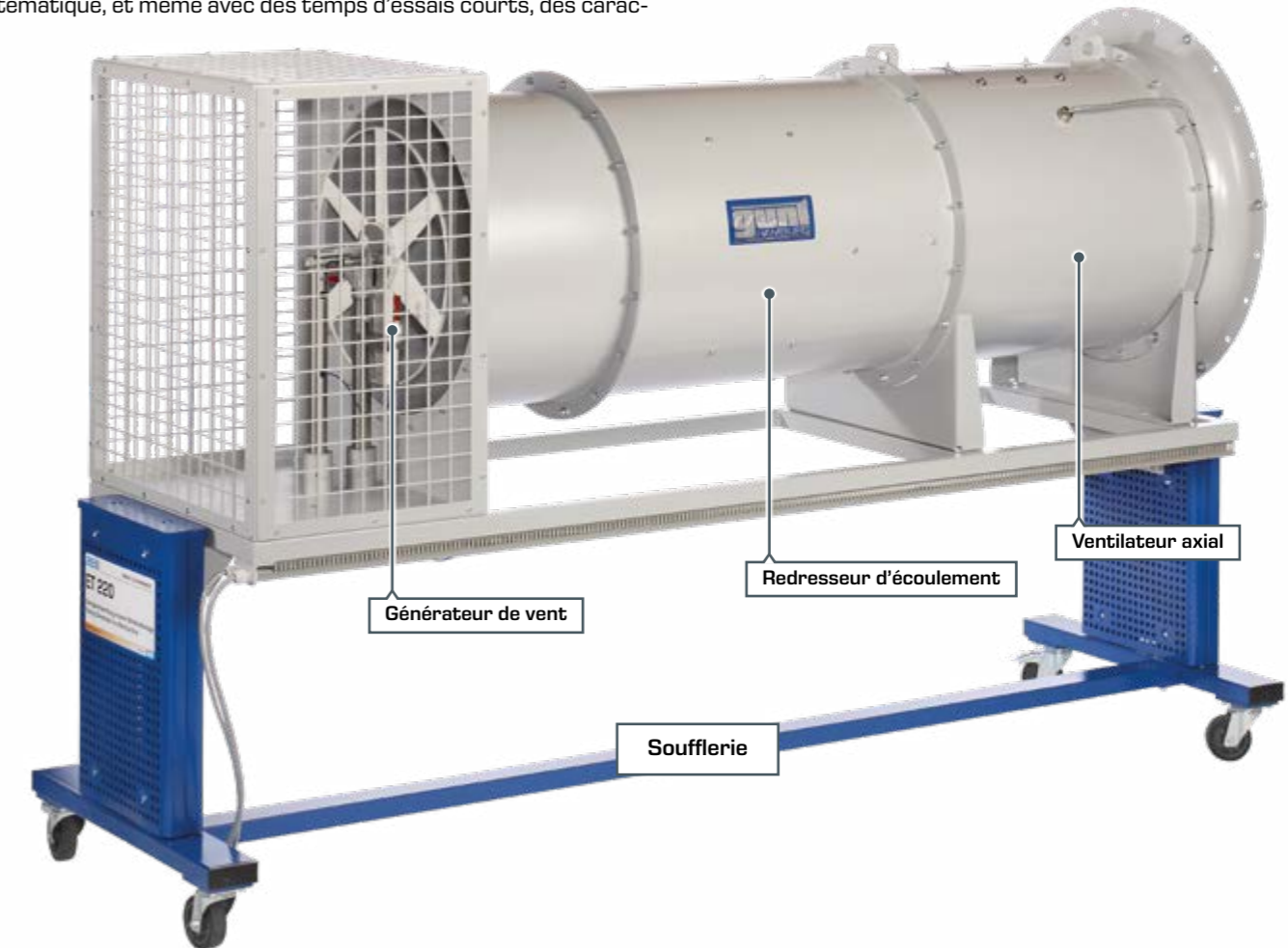
## Conversion de l'énergie dans une éolienne

Avec l'ET 220, vous pouvez enseigner pas à pas et de manière claire les différentes étapes depuis la transformation de l'écoulement d'air en énergie de rotation jusqu'au stockage de l'électricité dans des accumulateurs.

Afin d'étudier le fonctionnement d'une éolienne dans des conditions météorologiques réelles à l'extérieur, ET 220 peut être utilisé en connexion avec ET 220.01.

La soufflerie de l'ET 220 permet de réaliser des essais dans des conditions définies. Cela vous permet d'étudier de manière systématique, et même avec des temps d'essais courts, des caractéristiques de l'installation indépendamment des conditions météorologiques.

Au produit:



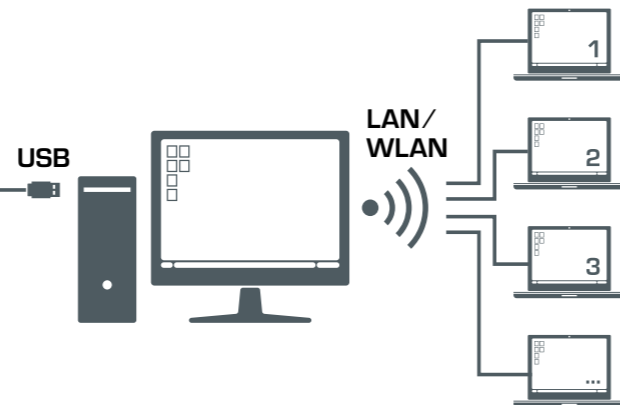
L'ET 220 est utilisée entre autres par l'Université de Leeds (Angleterre) pour la formation des ingénieurs. Des essais bien documentés sont réalisables pour différents besoins de formation, de l'apprentissage des fondements jusqu'à des thématiques plus avancées.

### Features

- essais adaptés pour l'expérimentation à l'échelle du laboratoire
- capacité de mise en réseau: observer, acquérir, évaluer des essais via le réseau propre au client

### Contenu didactique

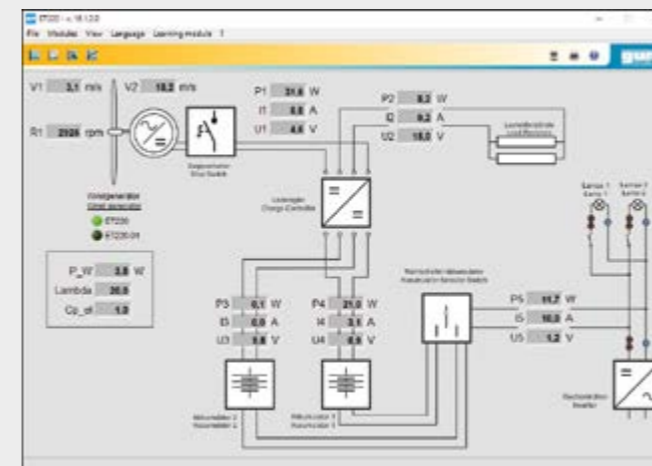
- conversion de l'énergie cinétique en énergie électrique
- fonctionnement et construction d'un système insulaire avec une éolienne
- détermination du coefficient de puissance de l'éolienne en fonction de la vitesse spécifique de la roue (en anglais: tip-speed ratio TSR)
- bilan énergétique d'une éolienne
- détermination du rendement d'une éolienne



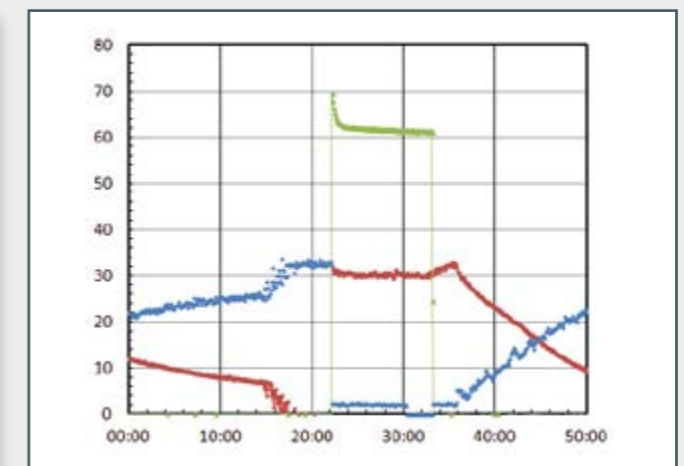
### Software

Le logiciel est utilisé pour enregistrer le courant et la tension à différents points du système en îlot.

Il est possible d'établir des bilans énergétiques pour l'ensemble du système et pour des éléments de ce dernier.



Logiciel GUNT pour l'acquisition de données de mesure via PC



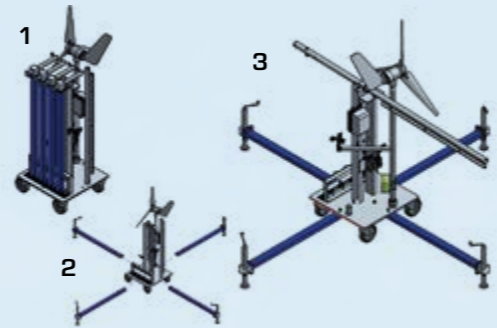
Les courbes de temps mesurées des puissances électriques



ET 220.01  
ET 220.10

Éolienne  
Appareil de commande pour éolienne ET 220.01

Le rendement d'une éolienne dépend des vitesses du vent observées et de l'exploitabilité de l'électricité produite. L'éolienne ET 220.01 est utilisée soit avec l'éolienne ET 220, soit avec l'éolienne ET 220.10.

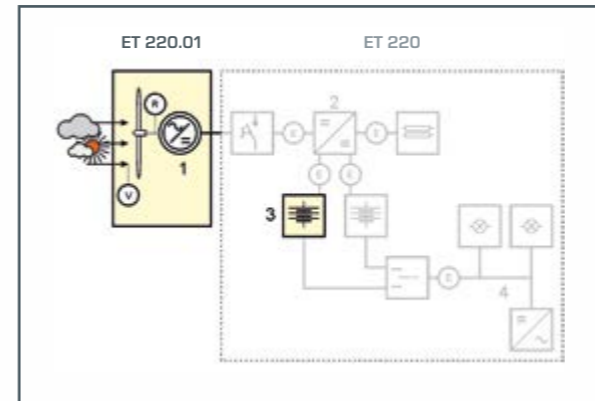


Mise en service de l'ET 220.01

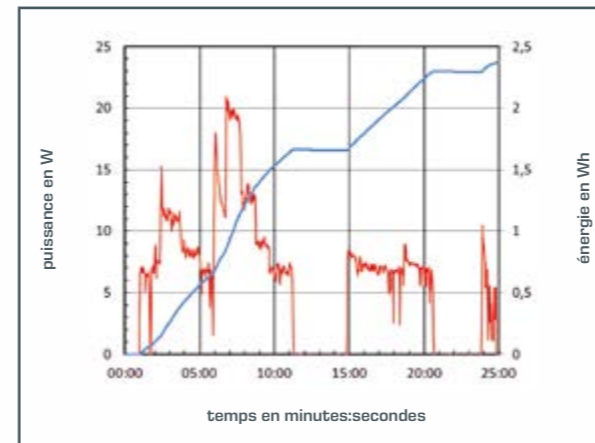
Pliée pour le transport **1** l'éolienne est facile à déplacer jusqu'au lieu prévu pour l'essai. Une fois les appuis montés **2**, l'éolienne est positionnée sur le mât pivotable **3**.



Au produit:



L'énergie électrique produite est transmise à l'appareil de commande de l'ET 220 et peut être utilisée pour charger des accumulateurs ou pour la consommation immédiate.



Comme on peut le voir sur un diagramme typique de l'instruction d'expériences de l'ET 220, on exploite des courbes de puissance dépendant des conditions météorologiques (en rouge) pour calculer les rendements en énergie (en bleu).



ET 220.10  
Appareil de commande pour éolienne ET 220.01

L'énergie électrique de l'éolienne ET 220.01 est stockée dans le système insulaire ET 220.10 qui est indépendant du réseau électrique.

Des capteurs enregistrent la vitesse du vent et la vitesse de rotation du rotor de l'ET 220.01, ainsi que le courant et la tension du système insulaire. Les valeurs mesurées sont transmises vers un PC afin d'y être évaluées à l'aide d'un logiciel fourni. La transmission des données au PC se fait par une interface USB. La vitesse du vent et la vitesse de rotation du rotor sont également indiquées sur des affichages numériques.

Au produit:



Contenu didactique

- construction et fonctionnement d'une éolienne dans un îlotage
- bilan énergétique d'une éolienne dans des conditions météorologiques réelles



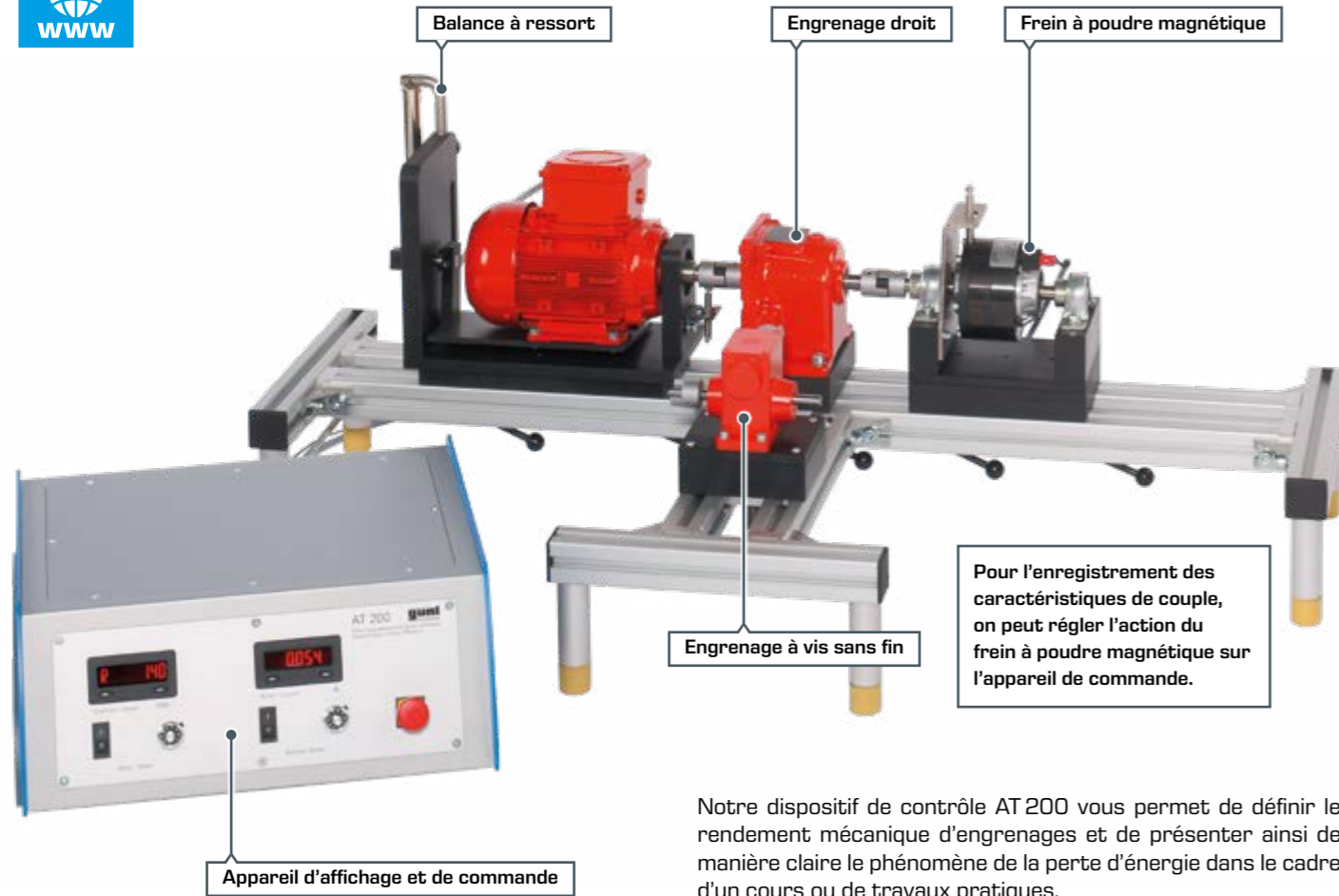
## AT 200

Détermination du  
rendement des engrenages

Les engrenages jouent un rôle très important dans la transformation de l'énergie des éoliennes. La fonction d'un engrenage est de transmettre l'énergie cinétique du rotor au générateur

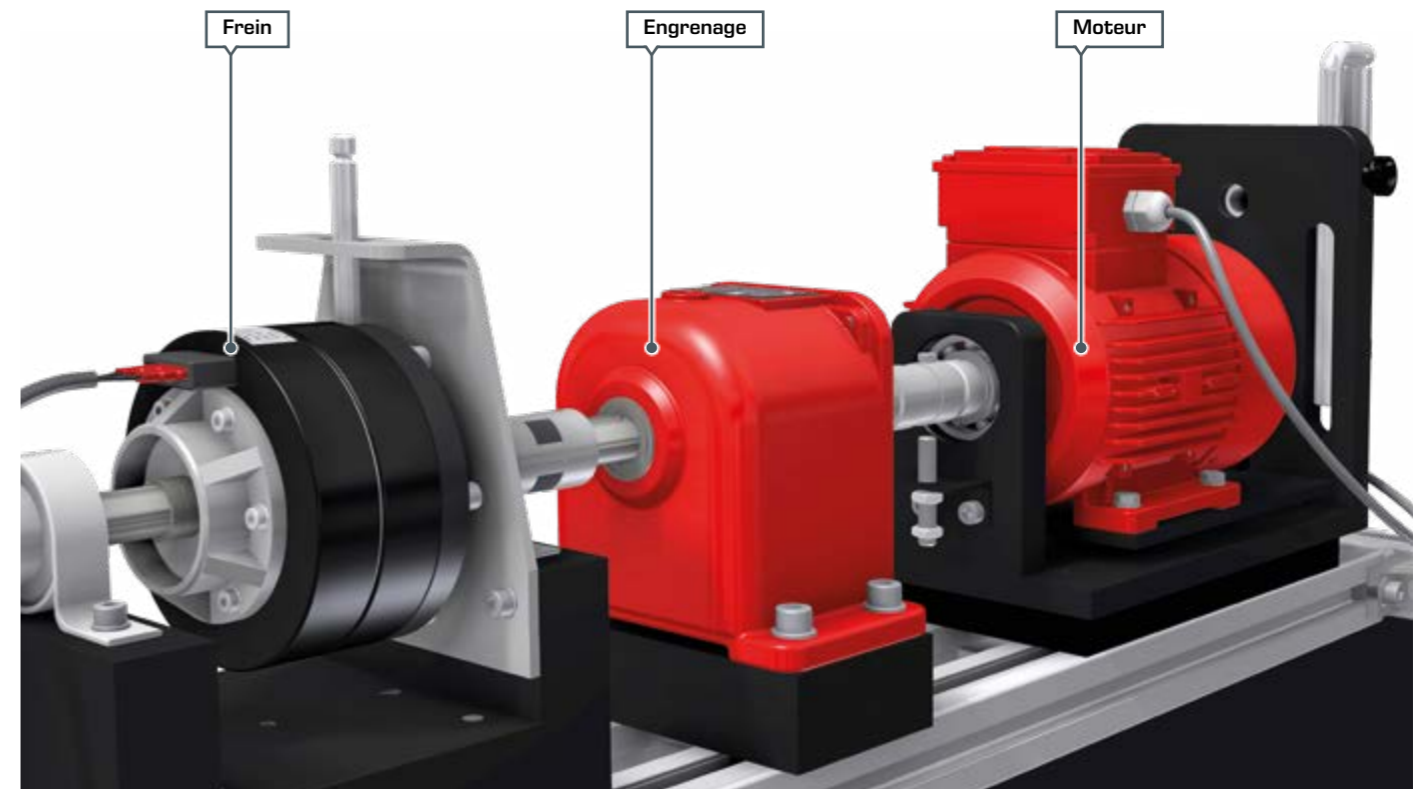
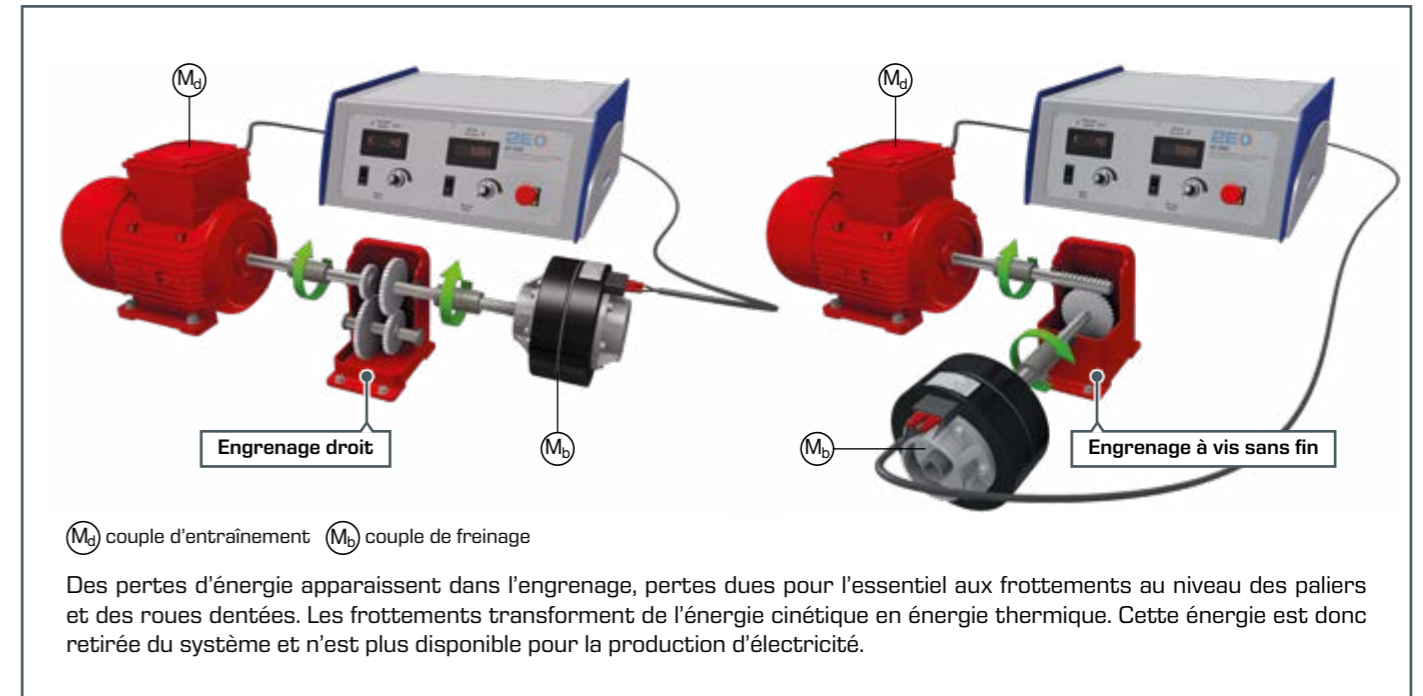
en minimisant les pertes. Dans les applications typiques, la vitesse de rotation comparativement faible du rotor doit être adaptée à celles beaucoup plus élevées du générateur.

Au produit:



Pour l'enregistrement des caractéristiques de couple, on peut régler l'action du frein à poudre magnétique sur l'appareil de commande.

Notre dispositif de contrôle AT 200 vous permet de définir le rendement mécanique d'engrenages et de présenter ainsi de manière claire le phénomène de la perte d'énergie dans le cadre d'un cours ou de travaux pratiques.



### Contenu didactique

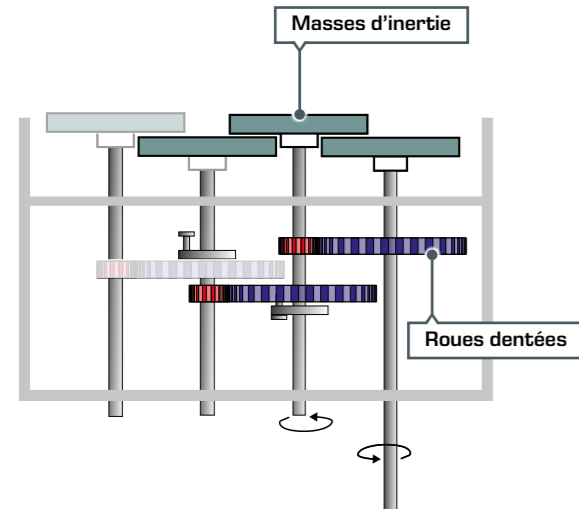
- détermination du rendement mécanique d'engrenages par le biais de la comparaison entre la puissance mécanique d'entraînement et de freinage pour
  - ▶ engrenage droit, à deux étages
  - ▶ engrenage à vis sans fin
- enregistrement de la caractéristique couple-intensité d'un frein à poudre magnétique
- technique d'entraînement et de régulation

## GL 210

### Comportement dynamique des engrenages droits à plusieurs étages

Les bancs d'essai GL 210 et GL 212 vous permettent de présenter de manière claire la construction et le fonctionnement des types d'engrenages fréquemment utilisés dans les éoliennes et d'étudier leur dynamique de rotation.

Au produit:



## GL 212

### Comportement dynamique des engrenages planétaires à plusieurs étages

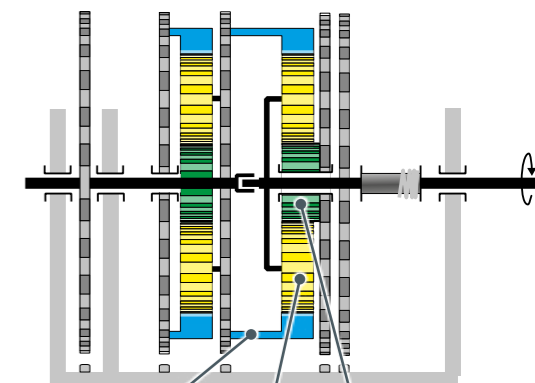
Dans les éoliennes de grande taille, on associe souvent engrenages droits et engrenages planétaires.

Le GL 212 permet la réalisation d'essais sur un engrenage planétaire à deux étages. Des dispositifs d'arrêt rapides permettent l'ajustage de quatre rapports de transmission différents.

Au produit:



Vue en coupe de la disposition des roues dentées sur le GL 212

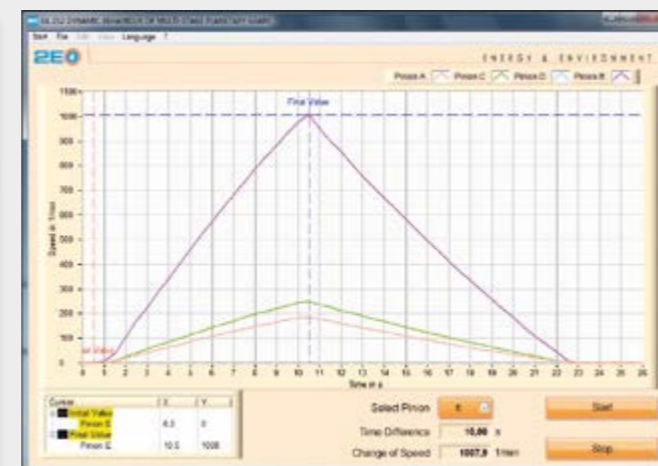
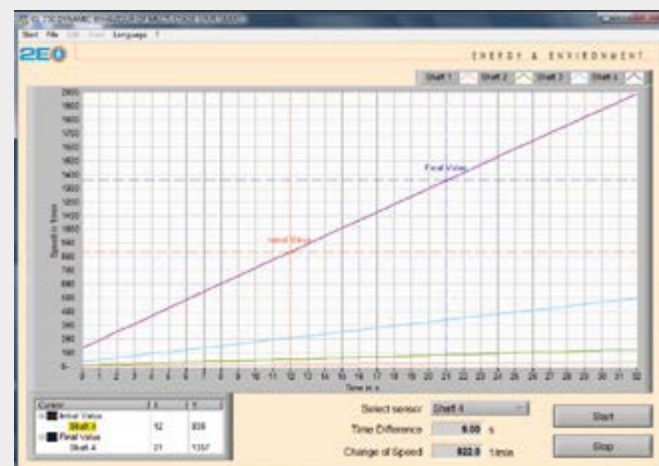


L'engrenage planétaire est un type spécial d'engrenage sur lequel tournent plusieurs roues planétaires autour d'une roue solaire disposée au centre.

#### Software pour GL 210 et GL 212

Des capteurs de vitesse de rotation inductifs sur tous les pignons de marche arrière permettent de mesurer la vitesse de rotation. Les valeurs mesurées sont transférées direc-

tement via une interface USB sur un PC, où elles sont présentées sous forme graphique à l'aide du logiciel fourni. Les diagrammes permettent de relever l'accélération angulaire.



#### Contenu didactique

Pour étudier la dynamique des engrenages à plusieurs étages, il faut déterminer les variables suivantes:

- de l'accélération angulaire
- du moment d'inertie de la masse
- du frottement
- du degré d'efficacité



## ET 222

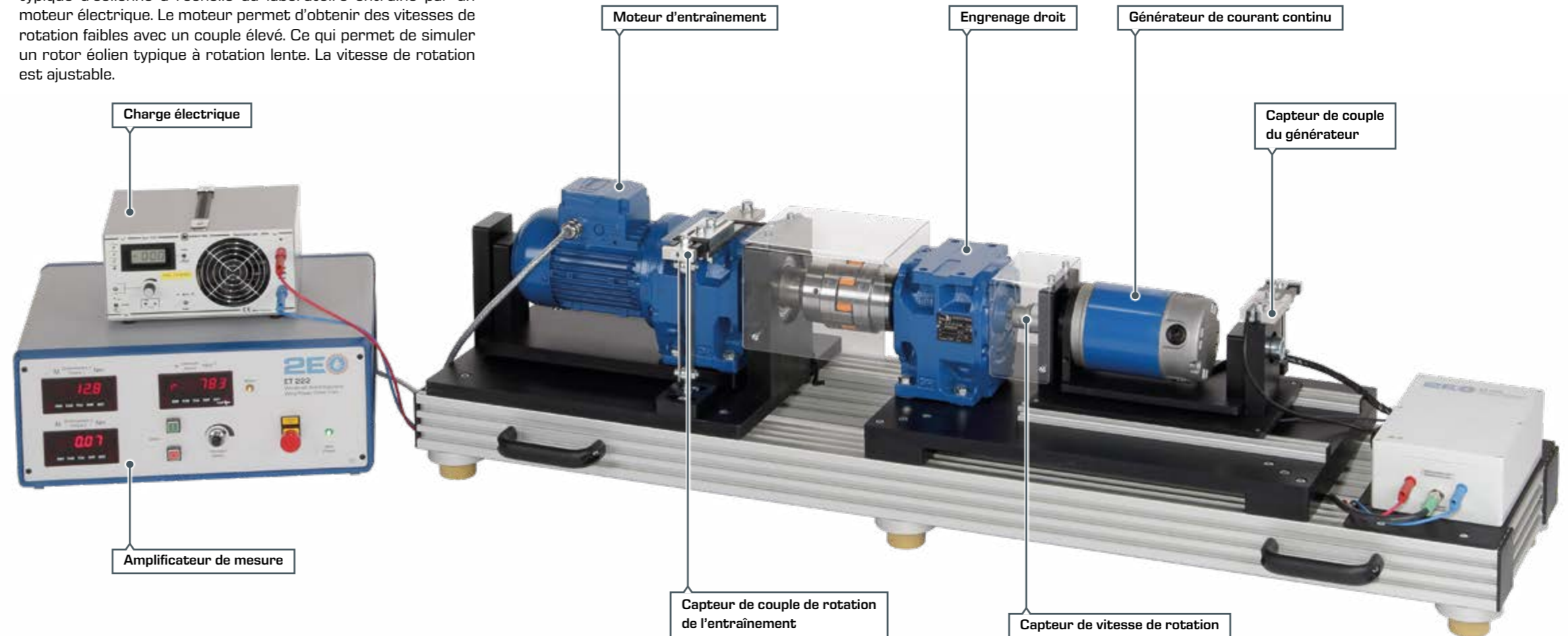
Transmission  
de l'énergie éolienne

Les éoliennes modernes doivent être adaptées au mieux au vent présent sur leur site et permettre des conditions de fonctionnement efficaces. En plus du rotor éolien, les composants du train d'entraînement tels que le multiplicateur et le générateur électrique jouent ici un rôle décisif.

Au produit:



L'appareil d'essai ET 222 comprend un train d'entraînement typique d'éolienne à l'échelle du laboratoire entraîné par un moteur électrique. Le moteur permet d'obtenir des vitesses de rotation faibles avec un couple élevé. Ce qui permet de simuler un rotor éolien typique à rotation lente. La vitesse de rotation est ajustable.

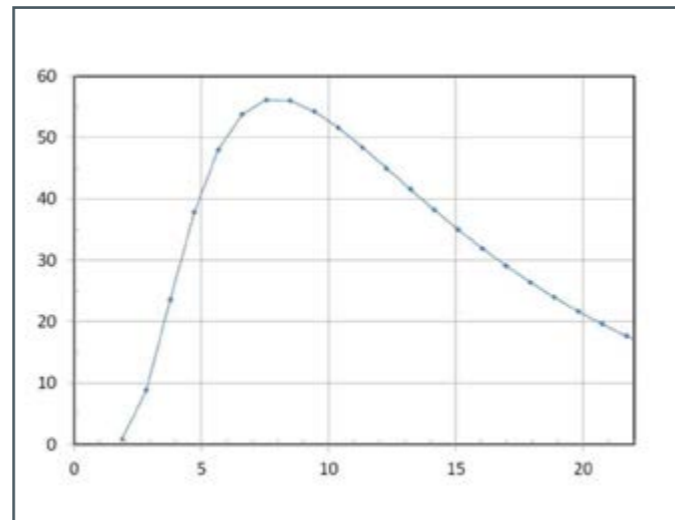


## Features

- moteur électrique à basse vitesse simulant un rotor éolien
- générateur avec charge électrique ajustable
- mesures du couple au niveau de l'entraînement et du générateur

## Contenu didactique

- transformation de l'énergie de rotation en énergie électrique
- influence du couple et de la vitesse de rotation sur le rendement du multiplicateur
- influence du couple et de la vitesse de rotation sur le rendement du générateur
- influence de la caractéristique de couple typique d'un rotor éolien sur le rendement total d'un train d'entraînement



Caractéristique simulée du couple d'un rotor éolien:  
axe x: vitesse de rotation de l'arbre en  $\text{min}^{-1}$   
axe y: couple en Nm

Durant les essais avec l'ET 222, on simule des conditions de fonctionnement typiques d'un train d'entraînement. À cet effet, on module la charge électrique du générateur et la vitesse de rotation du moteur d'entraînement. Cela permet d'accéder à des points de fonctionnement d'une caractéristique de couple typique. La caractéristique calculée est obtenue à partir de la puissance mécanique d'un rotor éolien pour une vitesse du vent donnée.

La vitesse du générateur et les couples du côté entraînement et du côté générateur sont mesurés par des capteurs et affichés numériquement sur un amplificateur de mesure. Les valeurs de mesure sont également disponibles sous forme de signaux analogiques, ce qui permet de les sauvegarder ou de les analyser si souhaité sur un support externe.

NOTTINGHAM  
TRENT UNIVERSITY

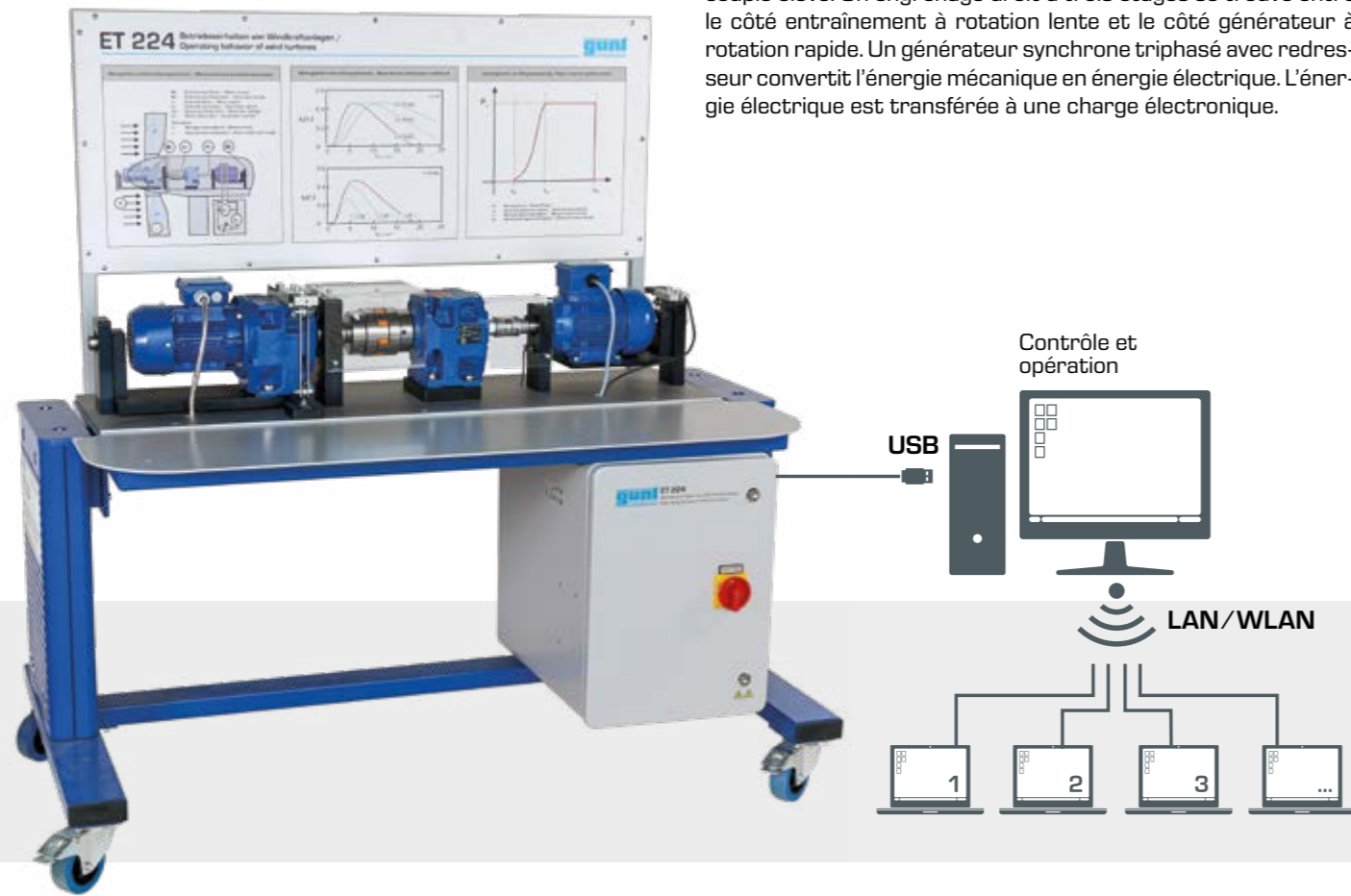
L'ET 222 a été spécialement développé pour la formation à l'énergie éolienne à la NOTTINGHAM TRENT UNIVERSITY (UK).

# ET 224

## Comportement en service des éoliennes

Les performances d'une éolienne dépendent de ses composants mécaniques et électriques ainsi que de l'efficacité de système de commande. L'influence des paramètres effectifs dans toutes les conditions de fonctionnement pertinentes doit donc être connue.

L'ET 224 permet d'observer les composants du train d'entraînement d'une éolienne. Pour faciliter la compréhension, des paramètres importants de l'installation sont étudiés dans le cadre d'essais avec des réseaux de caractéristiques simulés. Un moto-réducteur à vitesse de rotation ajustable reproduit le fonctionnement d'un rotor éolien typique à rotation lente et couple élevé. Un engrenage droit à trois étages se trouve entre le côté entraînement à rotation lente et le côté générateur à rotation rapide. Un générateur synchrone triphasé avec redresseur convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. L'énergie électrique est transférée à une charge électronique.



### Software

La charge électronique peut être commandée soit directement, soit par le module de simulation du logiciel GUNT fourni. Il est possible d'effectuer des mesures individuelles, des enregistrements automatisés de caractéristiques et de réseaux de caractéristiques, ainsi que des mesures en mode autonome de l'installation guidée par le vent.

Mesures automatisées en mode simulation

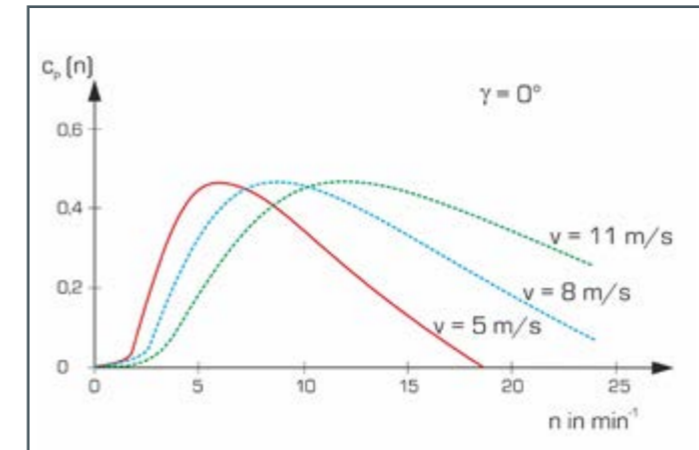
Contrôle des plantes sans simulation

Au produit:

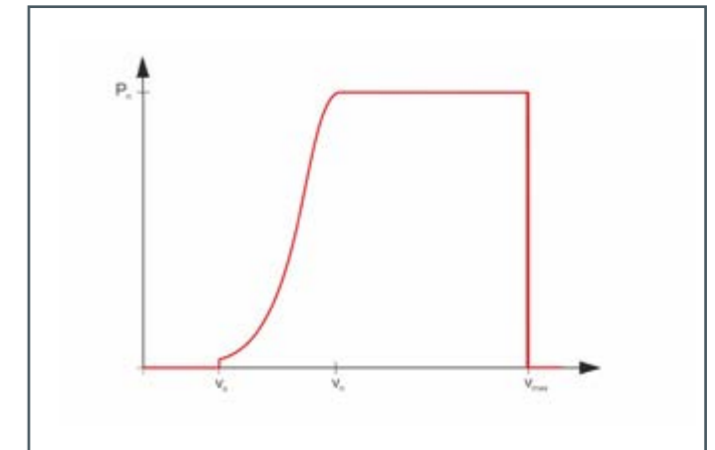


- ### Contenu didactique
- conversion de l'énergie cinétique en énergie électrique
  - coefficient de puissance et vitesse spécifique
  - comportement en service des éoliennes étude de l'influence du couple et de la vitesse de rotation sur le rendement de l'engrenage et du générateur
  - étude de l'influence de la vitesse du vent et de l'angle des pales du rotor sur la caractéristique de couple typique d'un rotor éolien
  - limitation de la puissance par le biais de la commande de la vitesse et de l'angle des pales du rotor
  - familiarisation avec la commande des éoliennes guidées par le vent en mode autonome

- ### Features
- l'unité d'entraînement à basse vitesse simule le rotor éolien
  - logiciel GUNT de mesure et de simulation avec fonction de contrôle de la charge électronique
  - enregistrement automatisé des réseaux de caractéristiques en fonction de la vitesse du vent, de l'angle des pales et de la vitesse du rotor
  - capacité de mise en réseau: observer, acquérir, évaluer des essais via le réseau propre au client



Coefficient de puissance en fonction de la vitesse de rotation du rotor: simulation de réseaux de caractéristiques typiques à différentes vitesses du vent et angles de pales de rotor



Courbe de puissance en mode autonome à une vitesse du vent croissante: la puissance délivrée est limitée par le système de commande de l'installation en ajustant la vitesse du rotor et l'angle des pales du rotor

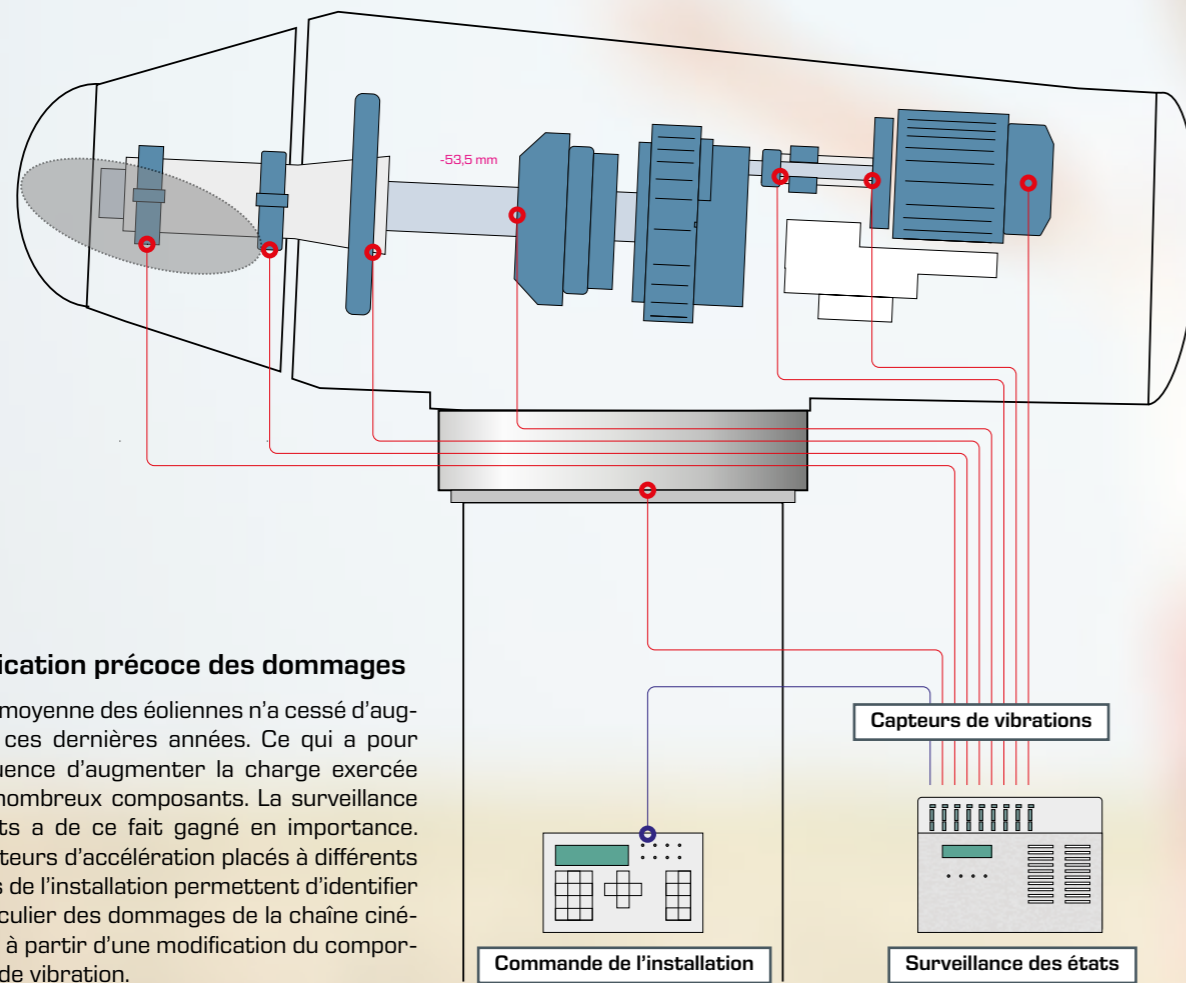


## Connaissances de base Surveillance des états des éoliennes

Afin de réduire les risques techniques et économiques, toutes les éoliennes de grande taille sont désormais équipées de systèmes qui surveillent leurs états (Condition Monitoring Systems ou CMS en anglais).

Outre les données typiques telles que la vitesse du vent, la vitesse de rotation, la puissance électrique et la température, ces systèmes enregistrent entre autres les vibrations à tous les points significatifs de l'installation. L'analyse et la comparaison des données de vibrations avec les valeurs de consigne permet d'identifier très en amont les composants endommagés et de

les remplacer avant qu'ils ne tombent en panne. Du point de vue de la gestion, il est important de pouvoir ajuster les intervalles de maintenance et d'identifier de manière précoce des dommages. L'intégration de systèmes CMS a permis par exemple dans les contrats entre constructeurs, exploitants et sociétés d'assurance des éoliennes de convenir de temps d'arrêt largement inférieurs à 10%.



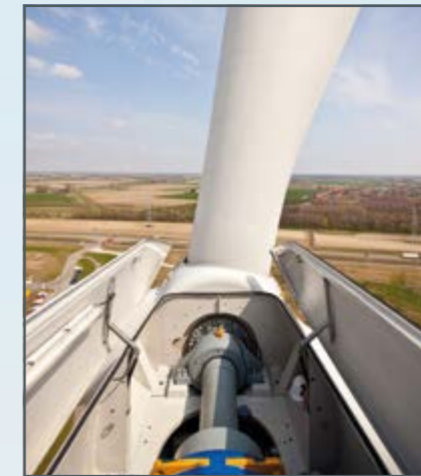
### Identification précoce des dommages

La taille moyenne des éoliennes n'a cessé d'augmenter ces dernières années. Ce qui a pour conséquence d'augmenter la charge exercée sur de nombreux composants. La surveillance des états a de ce fait gagné en importance. Des capteurs d'accélération placés à différents endroits de l'installation permettent d'identifier en particulier des dommages de la chaîne cinématique à partir d'une modification du comportement de vibration.

### Éviter les dangers

Des défauts d'origines différentes peuvent se produire sur des composants sensibles de l'éolienne, comme le palier ou les roues dentées. On peut citer par exemple l'usure normale, les conditions météorologiques extrêmes, les surcharges ainsi que les erreurs de montage et les défauts de fabrication. Si les défauts qui en résultent sont trop longtemps ignorés et que l'on n'y remédie pas à temps, des dommages beaucoup plus conséquents peuvent apparaître, qui sont susceptibles d'entraîner la destruction de l'éolienne.

Bien entendu et en particulier pour les éoliennes de grande taille, il est aussi impératif de surveiller de manière continue leurs états en raison des dangers potentiels pour le voisinage.



### L'expertise pour une surveillance efficace des installations

Les fonctions du système de surveillance incluent en particulier la mesure des vibrations au niveau de différents composants de l'installation dans un domaine fréquentiel adapté. L'analyse du bruit de structure nous donne des informations sur l'état des composants. Il existe d'autres grandeurs de mesure importantes telles que la vitesse de rotation, ou les températures de l'huile et du palier.

Pour être capable de faire la distinction entre les valeurs de mesure liées aux états et celles liées à la gestion, l'intervention d'experts est requise dans de nombreux cas. Nos appareils du domaine de l'énergie éolienne vous proposent des essais essentiels pour l'enseignement des connaissances spécifiques requises.



## PT 500

Système de diagnostic de machines,  
appareil de base

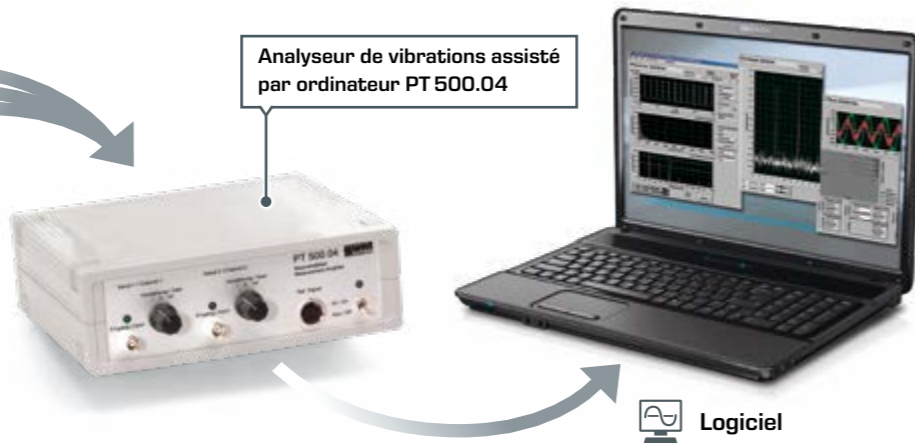
Le système didactique de diagnostic de machines PT 500 permet de simuler, mesurer et analyser de manière ciblée des signaux de vibrations propres à différents dysfonctionnements et défauts typiques. Ce qui permet de bien s'exercer à l'inter-

prétation des signaux de mesure. Des techniques de mesure professionnelles facilitent la transmission des données acquises pour la gestion au quotidien du fonctionnement des éoliennes modernes.

Au produit:



Analyseur de vibrations assisté  
par ordinateur PT 500.04



L'appareil de base PT 500 associé à l'analyseur de vibrations assisté par ordinateur PT 500.04 permet la réalisation d'une série d'exercices sur le thème du diagnostic et de la surveillance de machines. Le logiciel GUNT offre de nombreuses possibilités d'analyse pour l'exploitation. Quelques exemples:

- oscilloscope
- spectre de fréquences
- intensité des vibrations
- analyse d'enveloppe
- analyse des dommages sur des paliers à roulement et des engrenages par le biais de spectres d'enveloppe

#### Informations détaillées sur le système PT 500

Vous trouverez une vue d'ensemble de toutes les options du système modulaire dans notre brochure PT 500 que vous pouvez télécharger à partir de [www.gunt.de](http://www.gunt.de)



#### Références

De nombreux clients à travers le monde utilisent avec succès notre système de formation PT 500.

Voici quelques-unes de nos références:

- HAW Hochschule für angewandte Wissenschaften, Hamburg, Allemagne
- HTW Hochschule für Technik und Wirtschaft, Dresden, Allemagne
- Reinhold-Würth-Hochschule, Künzelsau, Allemagne
- Warsaw University, Varsovie, Pologne
- RFPC Training Center, Bandar Iman, Iran
- INTECAP Instituto Technica de Capacitación y Productividad, Guatemala

#### Accessoires pour le système PT 500

- PT 500.01 Chariot mobile
- PT 500.04 Analyseur de vibrations assisté par ordinateur
- PT 500.05 Dispositif de freinage et de charge
- PT 500.10 Jeu d'accessoires: arbre élastique
- PT 500.11 Jeu d'accessoires: arbre fissuré
- PT 500.12 Jeu d'accessoires: dommages sur les paliers à roulement
- PT 500.13 Jeu d'accessoires: accouplements
- PT 500.14 Jeu d'accessoires: courroie d'entraînement
- PT 500.15 Jeu d'accessoires: dommages aux engrenages
- PT 500.16 Jeu d'accessoires: système bielle-manivelle
- PT 500.17 Jeu d'accessoires: cavitation dans les pompes
- PT 500.18 Jeu d'accessoires: vibrations dans les ventilateurs
- PT 500.19 Jeu d'accessoires: vibrations électromécaniques
- PT 500.41 Deux capteurs de déplacement

#### Contenu didactique

- introduction à la technique de mesure des vibrations sur des systèmes de machines en rotation
  - ▶ fondements de la mesure de vibrations d'arbres et de paliers
  - ▶ grandeurs de base et paramètres
  - ▶ capteurs et instruments de mesure
  - ▶ influences de la vitesse de rotation et de la disposition des arbres
  - ▶ influence de la position des capteurs
- compréhension et interprétation des spectres de fréquences
- maniement d'un analyseur de vibrations assisté par ordinateur



L'appareil de base comprend un support de fixation à faibles vibrations, un moteur d'entraînement à régulation de vitesse de rotation avec tachymètre, un arbre avec deux volants et deux paliers, un accouple-

ment et des masses d'équilibrage. Une vaste gamme d'accessoires permet de traiter pratiquement tous les thèmes touchant au diagnostic de machines.



## PT 500.11

Jeu d'accessoires:  
arbre fissuré

L'arbre de rotor d'une éolienne transmet l'énergie mécanique du rotor en direction de l'engrenage. La détection précoce de fissures dans l'arbre minimise le risque d'arrêt coûteux et de destruction de l'installation.

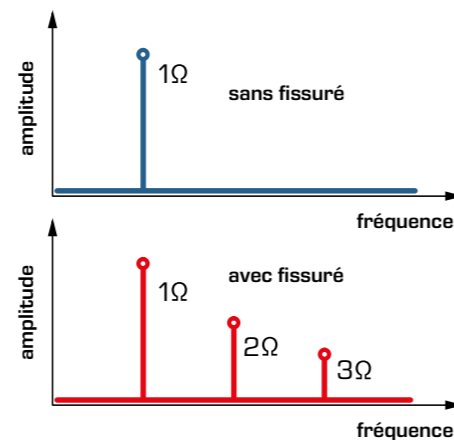
Notre accessoire PT 500.11 permet de réaliser des analyses de vibrations sur des arbres défectueux. Plusieurs arbres sont à votre disposition permettant de simuler différentes tailles de fissures.

Au produit:



#### Contenu didactique

- modification du comportement caractéristique en vibrations (fréquence propre, vitesse de résonance, amplitude et phase des vibrations) induit par une fissure
- identification de la fissure à partir de la modification du spectre de vibrations
- fissure dans l'arbre pour l'extrémité d'arbre en porte-à-faux
- compréhension et interprétation des spectres de fréquences
- manipulation d'un analyseur de vibrations assisté par ordinateur



Lorsque l'arbre défectueux tourne, l'ouverture et la fermeture d'une fissure entraîne l'apparition de composantes de fréquence supplémentaires. Les harmoniques de second ordre en particulier augmentent fortement par rapport à celles de l'arbre non endommagé.

## PT 500.12

Jeu d'accessoires:  
dommages sur les paliers à roulement

Des forces dynamiques avec des charges de pointe et des charges minimales extrêmes, des changements de charge soudains et de fortes variations de température, telles sont les exigences posées par les techniques de palier modernes destinées à l'équipement des éoliennes. Aussi bien pour l'arbre de rotor que pour les engrenages et le générateur, de nouveaux matériaux de palier et de nouvelles constructions sont développés en permanence afin de répondre aux exigences toujours plus élevées des installations de grande taille.

Avec le PT 500.12, vous avez la possibilité d'étudier les méthodes modernes de diagnostic des paliers en vous servant de paliers à roulement réels.

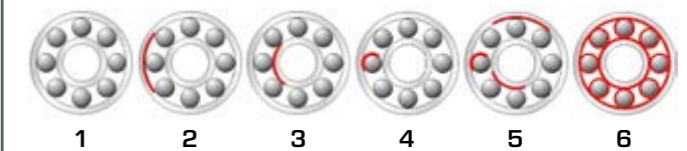
Au produit:



La modification progressive du spectre des vibrations est un critère d'évaluation de la durée de vie restante d'un palier et de son remplacement à venir. La distribution spectrale permet de tirer des conclusions très précises sur le type et l'endroit du dommage.

#### Contenu didactique

- composition spectrale des vibrations de paliers à roulement
- influence sur le spectre de détériorations au niveau de la bague extérieure, bague intérieure ou du corps de roulement
- estimation de la durée de vie de paliers à roulement
- influence du lubrifiant sur le spectre des vibrations
- détection de paliers à roulement défectueux
- compréhension et interprétation des spectres de fréquences
- manipulation d'un analyseur de vibrations assisté par ordinateur



Les paliers suivants ont été préparés pour les essais:

- 1 palier non endommagé
- 3 palier avec endommagement de la bague extérieure
- 3 palier avec endommagement de la bague intérieure
- 4 palier avec endommagement d'un corps de roulement
- 5 palier avec endommagement d'un corps de roulement, de la bague extérieure et de la bague intérieure
- 6 palier avec forte usure

Pour la surveillance des états, on fait la distinction entre la surveillance simple des valeurs caractéristiques et l'analyse plus complexe dans le domaine fréquentiel.

## PT 500.15

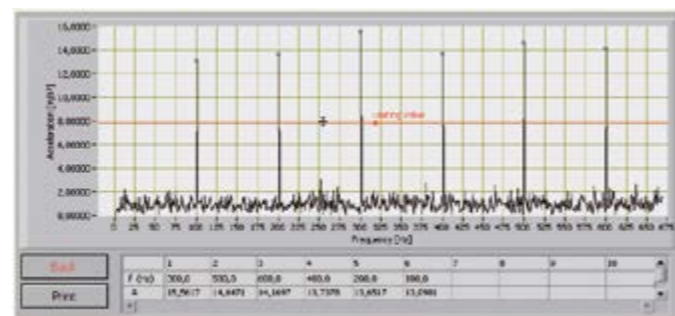
### Jeu d'accessoires: dommages aux engrenages



Le jeu d'accessoires PT 500.15 vous permet de disposer de différents jeux de roues avec différents dommages des dents. Des roues non endommagées sont également incluses à la liste de livraison pour permettre des mesures comparatives. PT 500.15

permet la réalisation d'essais ciblés pour analyser les vibrations dues aux dommages de denture et localiser les dégâts sur les engrenages.

Au produit:



Spectre d'un engrenage à dents droites à 1800min<sup>-1</sup> et fréquence d'engrènement de 752Hz

#### Contenu didactique

- identification de dommages sur engrenages à l'aide du comportement en vibration
- influence du type de denture
- localisation du dommage
- influence de la lubrification
- influence de l'entraxe et du jeu de roues dentées
- compréhension et interprétation des spectres de fréquences
- manipulation d'un analyseur de vibrations assisté par ordinateur

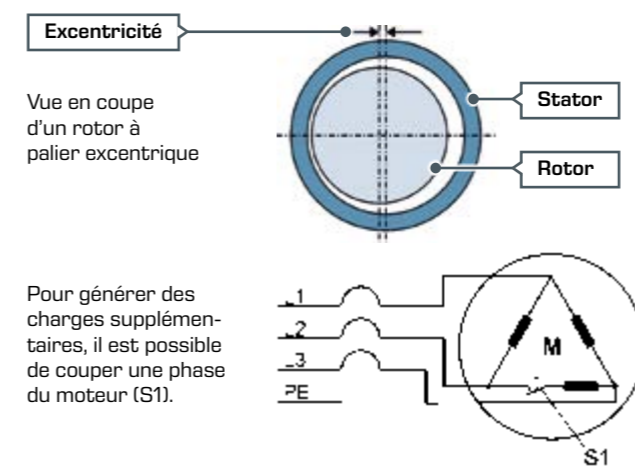
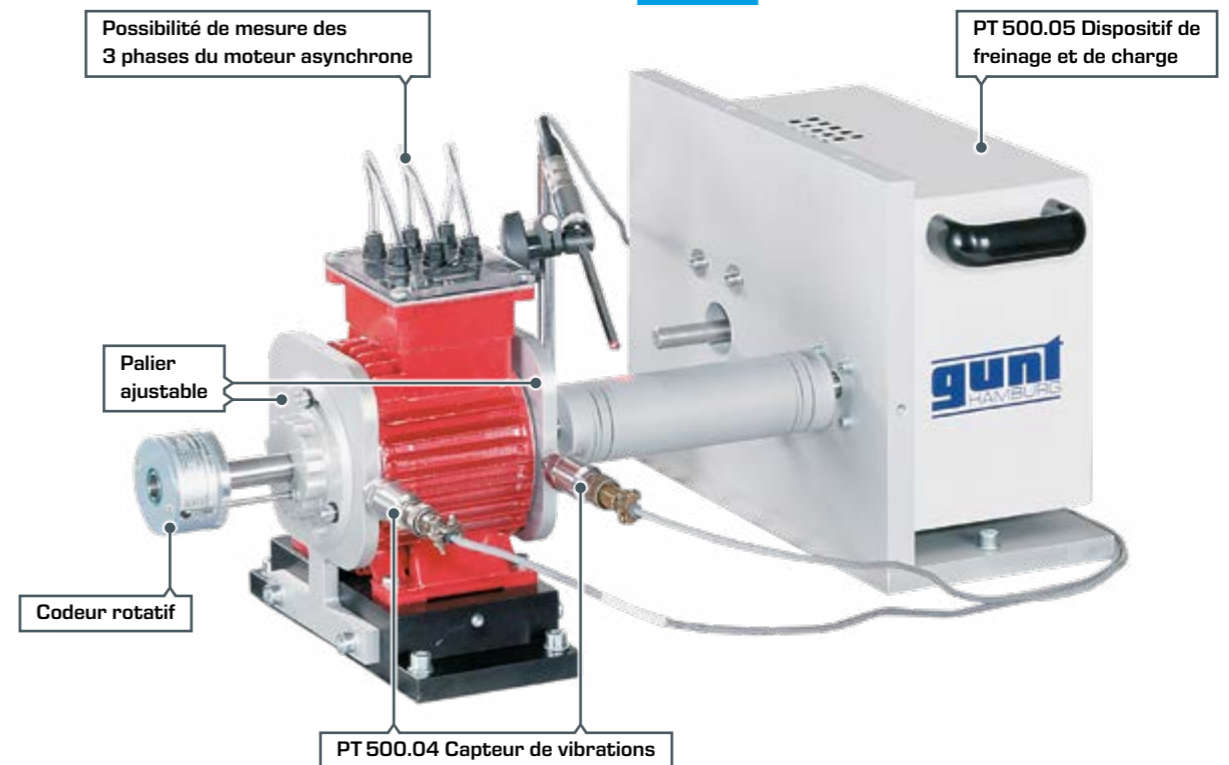
## PT 500.19

### Jeu d'accessoires: vibrations électromécaniques

L'apparition de vibrations électromagnétiques peut affecter fortement les systèmes du moteur et du générateur. Ces effets sont particulièrement importants sur les générateurs des éoliennes, étant donné les contraintes extrêmes qui s'exercent sur le site où ils se trouvent.

Avec le PT 500.19, vous disposez d'une extension idéale du système PT 500 pour l'étude ciblée des vibrations électromagnétiques.

Au produit:



Pour générer des charges supplémentaires, il est possible de couper une phase du moteur (S1).

#### Contenu didactique

- influence de l'entrefer sur le comportement en vibration
- influence de l'asymétrie électromagnétique sur le comportement en vibration
- influence de la charge sur l'amplitude de vibration
- influence de l'entrefer sur les pertes électromagnétiques et le rendement
- influence de la vitesse de rotation sur les vibrations
- compréhension et interprétation des spectres de fréquences
- manipulation d'un analyseur de vibrations assisté par ordinateur



## Le programme complet GUNT



### Mécanique appliquée et conception mécanique

- statique
- résistance des matériaux
- dynamique
- dynamique des machines
- conception mécanique
- essai des matériaux



### Mécatronique

- dessin industriel
- modèles en coupe
- métrologie
- technique d'assemblage et d'ajustage
- techniques de production
- kits d'assemblage
- maintenance
- diagnostic de machines
- automatisation et conduit de procédés



### Génie thermique et énergie

- principes de base de la thermodynamique
- échangeurs de chaleur
- machines à fluide thermique
- moteurs à combustion interne
- génie frigorifique
- technique du bâtiment (CVCS)



### Mécanique des fluides

- écoulement stationnaire
- écoulement non stationnaire
- écoulement autour de corps
- éléments de construction de tuyauteries et d'installations industrielles
- turbomachines
- machines volumétriques
- génie hydraulique



### Génie de procédés

- génie des procédés mécaniques
- génie des procédés thermiques
- génie des procédés chimiques
- génie des procédés biologiques
- traitement de l'eau



### 2E Energy & Environment

- | Energy                                  | Environnement |
|---|---------------|
| ■ énergie solaire                       | ■ eau         |
| ■ énergie hydraulique et énergie marine | ■ air         |
| ■ énergie éolienne                      | ■ sol         |
| ■ biomasse                              | ■ déchets     |
| ■ géothermie                            |               |
| ■ systèmes énergétiques                 |               |
| ■ efficacité énergétique en bâtiments   |               |

## Contact

GSDE 181 rue Franz Liszt  
F 73000 CHAMBERY

Tél : 04 56 42 80 70 Fax : 04 56 42 80 71  
[xavier.granjon@systemes-didactiques.fr](mailto:xavier.granjon@systemes-didactiques.fr)



Consultez notre page d'accueil  
[www.gunt.de](http://www.gunt.de)