

EOLIENNE TRIPALE

Ce sujet concerne l'étude d'une éolienne destinée à assurer la production d'électricité pour alimenter des habitations isolées. Ce type de machine, principalement composée d'un aérogénérateur placé en haut d'un mât, est le plus souvent installé en hauteur, dans les zones ventées de nos régions méridionales ou dans certains pays chauds comme le Maroc dans les endroits où il est parfois délicat d'amener l'électricité. Certaines de ces machines plus puissantes sont également implantées en «off shore», **Photo 1**.

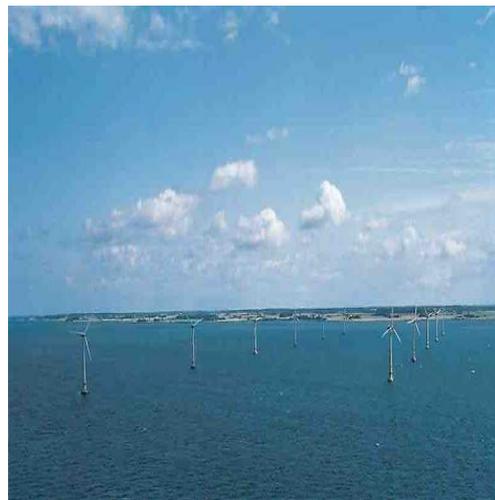


Photo 1: Eoliennes tripale en situation terrestre et off shore.

L'aérogénérateur, dont un plan d'ensemble partiel est fourni **Document 1**, se compose schématiquement de trois sous ensembles fonctionnels SE1, SE2 et SE3, voir **Figure 1**.

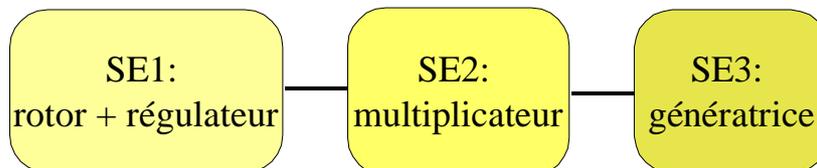


Figure 1: Sous-ensembles fonctionnels

Les objectifs pour cette étude sont :

- l'intégration d'un bloc fonctionnel de freinage d'urgence.
- l'instrumentation de l'éolienne pour permettre sa surveillance.

Pour répondre à ces objectifs, le sujet s'articule autour des trois parties suivantes :

1. compréhension et analyse de l'aérogénérateur existant,
2. étude de l'intégration d'un frein d'urgence,
3. instrumentation de l'éolienne .

Chacune de ces parties pourra être **traitée indépendamment**. Il est conseillé au candidat d'aborder chacune d'entre elles et de répondre aux questions posées avec la plus grande **clarté** et **concision** sans oublier de **justifier** clairement les expressions utilisées et les réponses fournies. Les dimensions nécessaires aux applications numériques seront fournies dans le corps du sujet ou directement relevées sur les figures et les documents fournis.

Première partie : Compréhension et analyse de l'éolienne existante

L'objectif de cette première partie est d'analyser le fonctionnement de l'aérogénérateur à travers les solutions technologiques et les contraintes de conception nécessaires à la réalisation des différents sous-ensembles fonctionnels allant du rotor constitué de trois pales jusqu'à la génération d'électricité. Dans toute cette partie, on supposera que toutes les liaisons sont parfaites.

1 L'ensemble de l'aérogénérateur se compose de 3 sous-ensembles fonctionnels comme décrit sur la **Figure 1**. En vous aidant de cette figure et du plan incomplet fourni **Document 1**,

1.1 Donnez la fonction globale de cet aérogénérateur ainsi que celle des 3 sous-ensembles SE1, SE2, SE3.

1.2 Compte-tenu du nombre de dents de chacun des pignons et des roues du multiplicateur de vitesse, voir sous-ensemble SE2, **Document 1**,

Calculez le rapport de multiplication de vitesse de rotation $\omega_{65/0} / \omega_{6/0}$ de ce sous-ensemble. Faites l'application numérique.

1.3 Sachant que sur l'arbre de sortie 65, tournant à 1200 tr/mn, la puissance utile P_u disponible doit être de 10 kW, et que le rendement entre le sous-ensemble SE1 (rotor et régulateur) et le sous-ensemble SE2 (multiplicateur) est de 0,9.

Déduisez-en le module $C_{1>6}$ du couple transmissible par le carter 1 du rotor sur l'arbre 6 pour fournir la puissance utile souhaitée. Faites l'application numérique.

1.4 Afin d'assurer un fonctionnement correct du mécanisme, la liaison entre l'arbre primaire 6 et le bâti 0 est une liaison pivot partiellement représentée sur le **Document 1**.

- Justifiez qualitativement le type de roulements utilisés pour réaliser cette liaison pivot.
- Complétez le dessin de cette liaison sur le **Document 2 à rendre avec votre copie**, sans oublier d'indiquer les ajustements nécessaires.

1.5 D'après le **Document 1**,

- Quel est le type de lubrification utilisé pour le sous-ensemble SE2 (multiplicateur)?
- Expliquez comment est réalisée l'étanchéité entre les sous-ensembles SE2 et SE3. Critiquez la solution retenue.

2 Pour comprendre les effets du vent sur le sous-ensemble SE1, on se propose d'étudier de façon simplifiée les efforts générés par le vent sur le rotor constitué de trois pales. Le **Document 3** illustre le torseur équivalent en C (centre de poussée) de l'action du vent sur une

$$\text{pale} \quad \{T_{\text{vent} \rightarrow \text{pale}}\}_C = \left\{ \begin{array}{c} \vec{R}_x x_v + \vec{R}_z z_v \\ \vec{0} \end{array} \right\}_C, \text{ précisez le paramétrage cinématique nécessaire et}$$

fournit les données géométriques associées à une pale supposée de forme cylindrique et de section droite à profil symétrique. Les bases B_0, B_r, B_p et B_v sont orthonormées directes. Les composantes R_z et R_x désignent respectivement la portance et la traînée qui s'exercent sur la pale. La portance est motrice, la traînée résistante. Leur module respectif s'exprime

$$\text{par: } |R_z| = \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} C_z \|V^{\text{vent} \rightarrow \text{pale}}\|^2 S \text{ et } |R_x| = \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} C_x \|V^{\text{vent} \rightarrow \text{pale}}\|^2 S \text{ en notant: } \rho_{\text{air}} : \text{ la}$$

masse volumique de l'air, C_x : le coefficient de traînée de la pale, C_z : le coefficient de

portance de la pale et $S = L \times l$. La portance et la traînée varient en fonction du carré de la vitesse du vent apparent $V^{apparent}$ (ou vitesse relative du vent par rapport à la pale $V^{vent/pale} = V^{apparent}$), quantité liée à la vitesse de rotation absolue $\Omega_{R/O}$ du rotor R et à la vitesse du vent réel $V^{réel}$ (ou vitesse absolue du vent $V^{vent/O} = V^{réel}$).

2.1 Dessinez les 3 figures de changement de base faisant apparaître les paramètres cinématiques angulaires nécessaires.

2.2 En supposant que l'éolienne est orientée face au vent et que le torseur équivalent, en C , à l'action du vent sur une pale $\{T_{vent > pale}\}_C$ résulte d'un champ de vitesses tel qu'en C :

$$V_C^{apparent} = V_C^{réel} - V_C^{pale/O}$$

Déduisez-en, en C , le module de la vitesse du vent apparent $V_C^{apparent}$ en fonction du module du vent réel et des données nécessaires.

2.3 En vous aidant du **Document 3**,

- Déterminez, en fonction de R_z et des données nécessaires, l'expression littérale de la partie du couple moteur $C_{vent > R} x_0$ (due à la portance R_z seule) que le vent transmet au rotor composé des trois pales.

2.4 Indiquez, à l'aide d'un schéma, la configuration extrême correspondant à un couple transmissible minimum.

3 Le sous-ensemble fonctionnel SE1 (rotor + régulateur) permet notamment de réguler la vitesse de rotation des pales en fonction de la vitesse du vent.

3.1 D'après la direction et le sens de $V^{réel} = V^{vent/O}$ fournis sur le **Document 1**,

Dans quel sens A (indirect) ou B (direct) le rotor tourne-t-il ?

3.2 A partir du plan d'ensemble proposé **Document 1** et du schéma cinématique partiel du sous ensemble SE1 fourni **Document 4**,

- Expliquez le principe de fonctionnement du dispositif de régulation en précisant notamment le rôle des pièces 15, 17, 27.
- Qualifiez et complétez les liaisons $L_{16/11}$, $L_{27/26}$ et $L_{16/18}$ sur le **Document 4 à rendre avec votre copie**.

3.3 Le plan d'ensemble **Document 1** fait apparaître un jeu fonctionnel entre les pièces 20 et 26.

- Justifiez la nécessité de ce jeu.
- Tracez la chaîne de côtes relative à ce jeu sur le **Document 2 à rendre avec votre copie**.

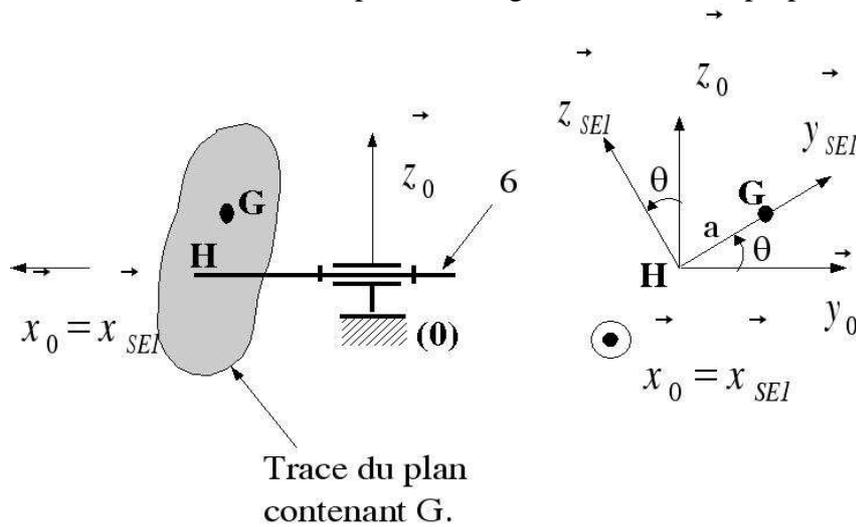
3.4 D'après la configuration de référence représentée sur les **Documents 1 et 4**,

Déterminez, en fonction des paramètres nécessaires, l'expression analytique de la valeur maximale de la variation de l'angle de calage d'une pale $\Delta \beta_{max}$ (rotation relative par rapport à son axe longitudinal) ? Faites l'application numérique à partir des données du **Document 4**.

Deuxième partie : étude de l'intégration d'un frein d'urgence

Pour des raisons de sécurité, on choisit d'intégrer un dispositif de freinage d'urgence. Ce dispositif peut notamment être activé si un corps étranger percute une pale au point de l'endommager et de créer un « balourd ». Par soucis de simplification, on supposera dans cette partie que la génératrice est désaccouplée.

- 1 Avant d'installer le frein, on s'intéresse au risque de balourd du rotor afin d'en quantifier les effets. Le modèle d'étude, représentant le sous-ensemble (SE1) composé des éléments tournants associés au rotor et au dispositif de régulation, est celui proposé **Figure 2**.



- La liaison pivot est supposée parfaite.
- La base $B_0 = (x_0, y_0, z_0)$ est supposée galiléenne.
- La base $B_{SE1} = (x_{SE1}, y_{SE1}, z_{SE1})$ est liée à l'ensemble (SE1) tournant. $B_{SE1} = B_r$
- G, centre d'inertie de (SE1). $HG = a y_{SE1}$
- M_{SE1} , masse équivalente de l'ensemble (SE1).
- θ , angle de rotation paramétrant la position de l'ensemble (SE1) dans son mouvement de rotation par rapport à B_0

Figure 2: Sous-ensemble SE1 avec balourd.

L'action motrice extérieure due au vent sur le rotor du sous-ensemble (SE1) est modélisée, en

H, par le torseur $\{T_{vent > R}\}_H = \begin{Bmatrix} \vec{0} \\ \vec{C}_{vent > R} x_0 \end{Bmatrix}_H$. La liaison pivot 6/0 est supposée parfaite.

On donne $I(H, (SE1)) = \begin{pmatrix} A & -F & -E \\ -F & B & -D \\ -E & -D & C \end{pmatrix}$ la matrice d'inertie du sous-ensemble (SE1)

exprimée en H (intersection du plan contenant G avec l'axe longitudinal de 6), relativement à la base B_{SE1} .

1.1 Exprimez, en H, relativement à la base B_0 , le torseur représentant les actions de la pesanteur sur le sous-ensemble (SE1).

1.2 Exprimez, en H, relativement à la base B_{SE1} , le torseur dynamique de l'ensemble (SE1).

1.3 Etablissez les équations vectorielles traduisant l'équilibre dynamique du sous-ensemble

(SE1) en rotation par rapport à x_0 en notant $\{T_{0>6}\}_H = \begin{Bmatrix} \vec{R}_{0>6} \\ \vec{M}_{0>6} \end{Bmatrix}_H$ le torseur

équivalent en H aux actions transmissibles par la liaison pivot 6/0 telles que

$$\vec{M}_{0>6} \vec{x}_0 = 0 \quad .$$

1.4 Montrez que le torseur $\{T_{0>6}\}_H$ est composé d'un torseur constant et d'un torseur variable (dépendant du temps).

1.5 Quels sont les effets gênants dus à la présence des actions représentées par le torseur variable ? Justifiez votre réponse.

1.6 L'équilibrage du sous-ensemble (SE1) est satisfait si deux conditions sont vérifiées :

- le centre de gravité G de (SE1) doit être situé sur l'axe de rotation : c'est la condition d'équilibrage statique.
- les composantes $-F$, $-E$ de la matrice d'inertie doivent être nulles : c'est la condition d'équilibrage dynamique.

Indiquez, qualitativement, par quels moyens peut-on réaliser les deux conditions précédentes.

2 Le dispositif de freinage retenu est un frein à disque composé d'un disque (d), représenté **Figure 3** et de deux étriers, **Photo 2**. Par soucis de simplifications, le frein est placé à la sortie de (SE1) et découplé de (SE2). Le freinage est réalisé par pression des garnitures d'usure assurant le serrage de part et d'autre du disque. Chaque étrier supporte 2 garnitures pour lesquelles la surface de contact est représentée **Figure 3**. Le dispositif de freinage comporte deux étriers.

Photo 2 : Etrier de frein
(1 seul représenté)



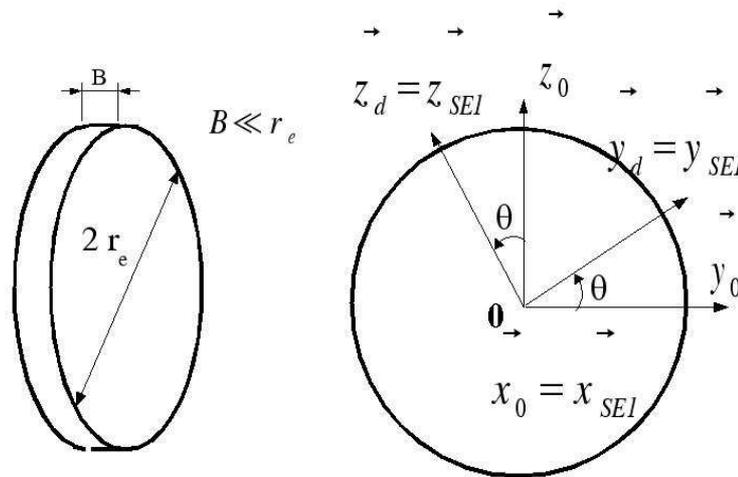
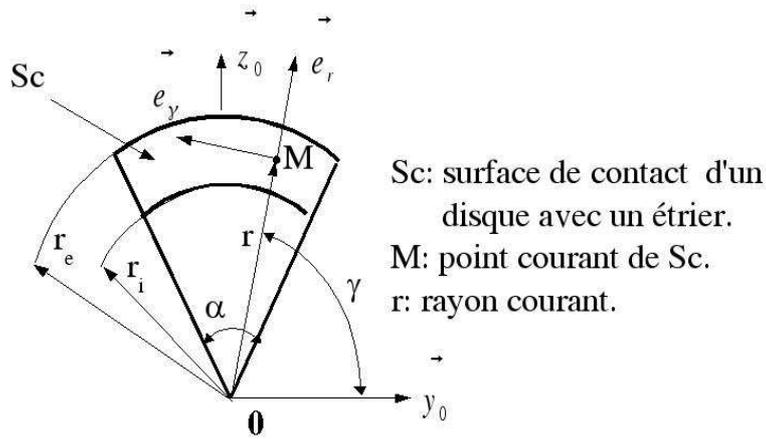


Figure 3: Zone de contact garniture/disque.
Géométrie du disque.

2.1 Justifiez l'emploi de deux étriers pour réaliser ce dispositif de freinage.

- Comment envisagez-vous de disposer ces deux étriers ?
- Faites un schéma du disque représentant la disposition de ces étriers que vous justifierez.

2.2 On note C_{frein} le module du couple de freinage supposé constant nécessaire à l'immobilisation du rotor en un temps raisonnable. Durant cette phase de freinage, on considère que la loi de frottement est la loi de coulomb et que la pression de contact p est uniformément répartie sur chaque garniture. Le coefficient de frottement associé au couple garniture/disque est noté f .

- Etablissez, en fonction des données géométriques et matériau nécessaires, la relation liant le couple de freinage C_{frein} et la pression p exercée pour réaliser ce freinage.

3 Le disque de freinage (d) est désormais associé au sous-ensemble (SE1) précédent supposé maintenant équilibré, **Figure 4**. La matrice d'inertie du disque (d) en 0, relativement à la base

$$B_d = (x_d, y_d, z_d) \text{ est noté } I(0, (d)) .$$

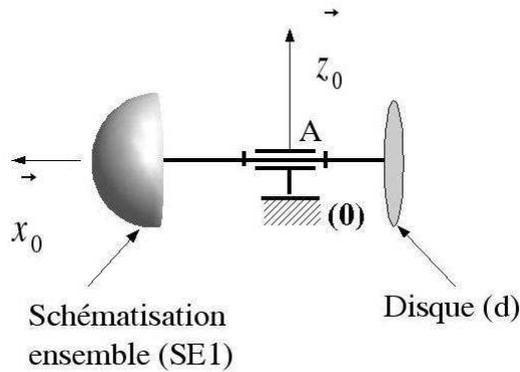


Figure 4: Sous-ensemble (SE1) et (d) en rotation.

3.1 Etablir, dans la base de votre choix, les termes de la matrice d'inertie $I(0,(d))$ du disque, en supposant que celui-ci est parfaitement équilibré. Justifier les simplifications effectuées s'il y a lieu.

3.2 On note A_d le moment d'inertie du disque (d) par rapport à l'axe de x_0 . Lors du dimensionnement du frein, doit-on s'attacher à réaliser $A_d \ll A$ ou $A_d \gg A$? Pourquoi?

Rappel: A désigne le moment d'inertie de (SE1) par rapport à l'axe x_0 .

3.3 Pour simplifier l'étude, on suppose que le torseur des efforts équivalents au chargement

aérodynamique est constant et s'exprime, en A, par: $\{T_{vent > R}\}_A = \begin{Bmatrix} \vec{0} \\ C_{vent > R} \vec{x}_0 \end{Bmatrix}_A$.

L'action de freinage est réduite à un couple pur $C_f = -C_{frein} \vec{x}_0$ avec C_{frein} module du couple de freinage supposé constant lui aussi.

Etablir, par application du principe fondamental de la mécanique à l'ensemble tournant $\{(SE1)+(d)\}$, l'équation du mouvement de cet ensemble.

Nota : le principe fondamental de la mécanique pourra être utilisé sous sa forme classique ou énergétique.

3.4 En supposant que le module du couple $C_{vent > R}$ vaut 450 Nm et que le moment d'inertie $(A + A_d)$ par rapport à l'axe de rotation x_0 vaut 1300 kg.m^2 .

- Quelle doit être la valeur du module du couple de freinage C_{frein} constant à exercer pour immobiliser le rotor en 10s lorsque celui-ci tourne à la vitesse de rotation $\omega_{6/0}$? Faites l'application numérique.
- Déduisez-en la valeur numérique de la pression p nécessaire. On prendra $f = 0.25$, $r_e = 50 \text{ cm}$, $r_i = 40 \text{ cm}$, $\alpha = 20^\circ$.

3.5 Quel(s) avantage(s) a-t-on à placer le dispositif de freinage après le sous-ensemble (SE2)? Justifiez votre réponse.

Troisième partie : Instrumentation de l'éolienne

On s'intéresse dans cette partie à l'instrumentation à mettre en oeuvre pour surveiller l'éolienne à distance, afin de ne pas risquer de détérioration prématurée de tout ou partie de la machine.

- 1 Pour vérifier l'intégrité du mât (0) de l'éolienne, on souhaite vérifier qu'en service les sollicitations mécaniques qu'il subit n'atteignent pas des valeurs trop importantes préjudiciables à son intégrité.

- 1.1 En vous aidant du **Document 5**,

expliquez comment est sollicité le mât (traction, flexion, torsion, etc...), précisez dans quel plan. Illustrez votre réponse à l'aide d'un schéma.

- 1.2 Le mât est fabriqué en tôle d'acier roulée mécanosoudée, d'épaisseur e constante, comme illustré sur le **Document 5**. Le matériau sera supposé homogène isotrope à comportement élastique linéaire de module d'Young $E=200$ GPa et de coefficient de Poisson $\nu=0,3$.

Pour étudier ce mât, nous considérons un modèle de poutre régi par les hypothèses de Navier-Bernoulli (une section droite reste droite et perpendiculaire à la ligne moyenne). Le torseur équivalent aux efforts extérieurs, dus à l'aérogénérateur, appliqués au mât est donné par ses éléments de réduction en P (centre géométrique de la section droite au

sommet du mât):
$$\left\{ T_{ext > mât} \right\}_P = \left\{ \begin{array}{l} X_{ext > mât} \vec{x}_0 + Z_{ext > mât} \vec{z}_0 \\ Mf_{x_0, ext > mât} \vec{x}_0 \end{array} \right\}_P$$

- *Etablissez l'équation différentielle permettant de calculer la déformée du mât sous l'effet du moment $Mf_{x_0, ext > mât}$ seul, dans deux cas:*
 - a) *en tenant compte de la variation linéaire du diamètre D le long du mât.*
 - b) *en supposant que le diamètre D est constant le long du mât.*
- *Résolvez cette équation dans ce dernier cas ($D=constante$).*

- 1.3 Toujours dans le cas où le diamètre extérieur D est constant tout comme l'épaisseur e le long du mât,

- *Déterminez littéralement l'expression de l'épaisseur e du mât pour que la contrainte normale σ_{zz} due au moment de flexion seul ne dépasse par la limite d'élasticité Re avec un coefficient de sécurité Cs .*
- *Faites l'application numérique en considérant : $|Mf_{x_0, ext > mât}| = 1343$ Nm, $Re=150$ MPa, $D=200$ mm, $Cs=6$.*
- *Déduisez-en la valeur numérique de la flèche (due à $Mf_{x_0, ext > mât}$ seul) au sommet du mât.*

- 1.4 *Quel type de capteur installeriez-vous au sommet du mât pour vérifier que la flèche ne dépasse pas la valeur précédemment calculée ? Justifiez votre solution ?*

- 2 Afin de vérifier le bon fonctionnement de l'éolienne on peut, par exemple, chercher à déterminer expérimentalement son rendement en temps réel. En supposant que vous sachiez mesurer la puissance électrique instantanée délivrée par la génératrice de l'éolienne,

- 2.1 *Comment feriez-vous pour déterminer par des mesures la puissance transmise par le vent au rotor ?*

- 2.2 *Justifiez le ou les types de capteurs retenus et précisez leur emplacement (l'utilisation de schémas est recommandée).*

Liste des documents joints

Photographies dans le corps du sujet

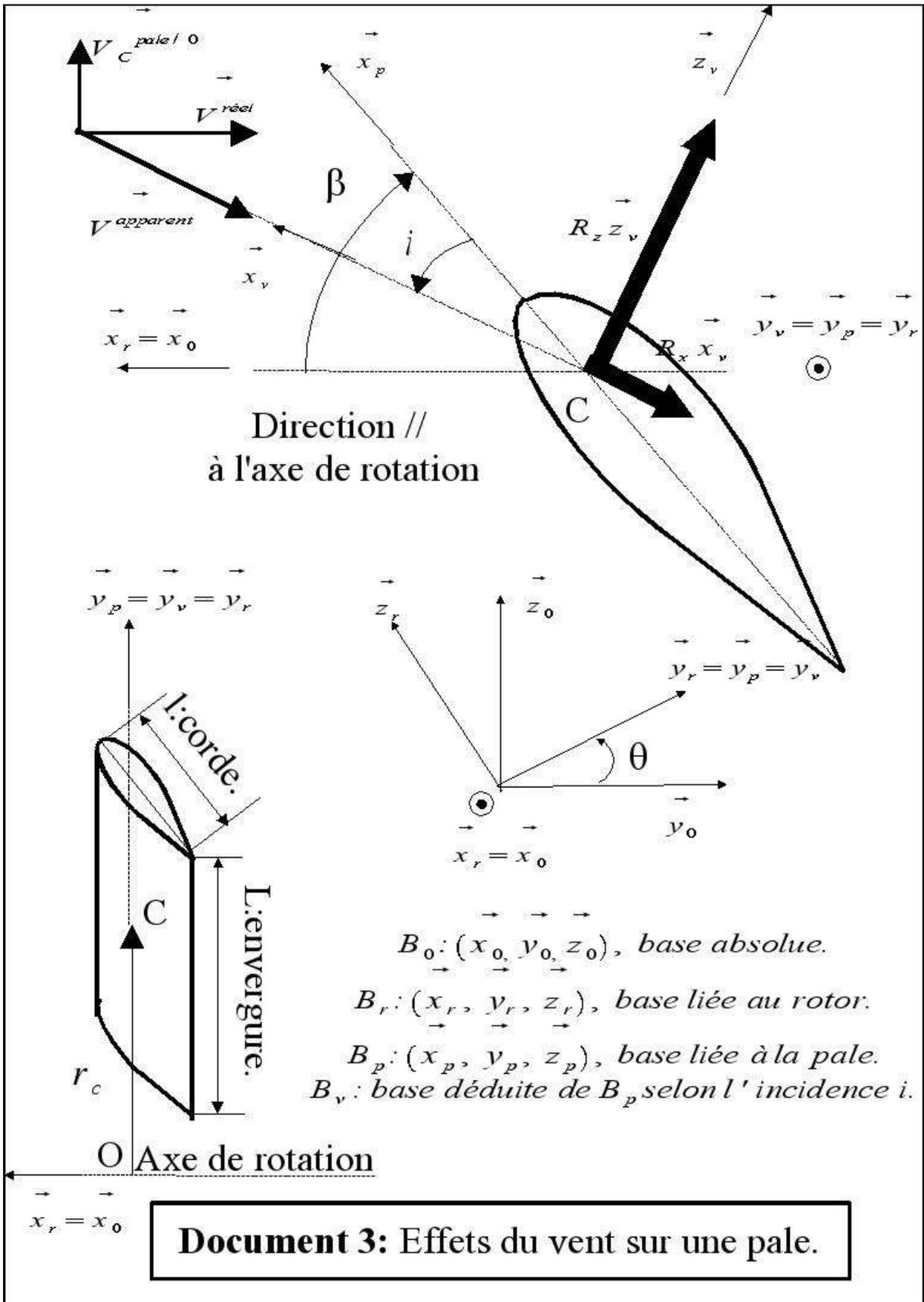
- Photo 1 : Eoliennes tripales en situation terrestre et off shore.
- Photo 2 : Etrier de frein (1 seul représenté).

Figures dans le corps du sujet

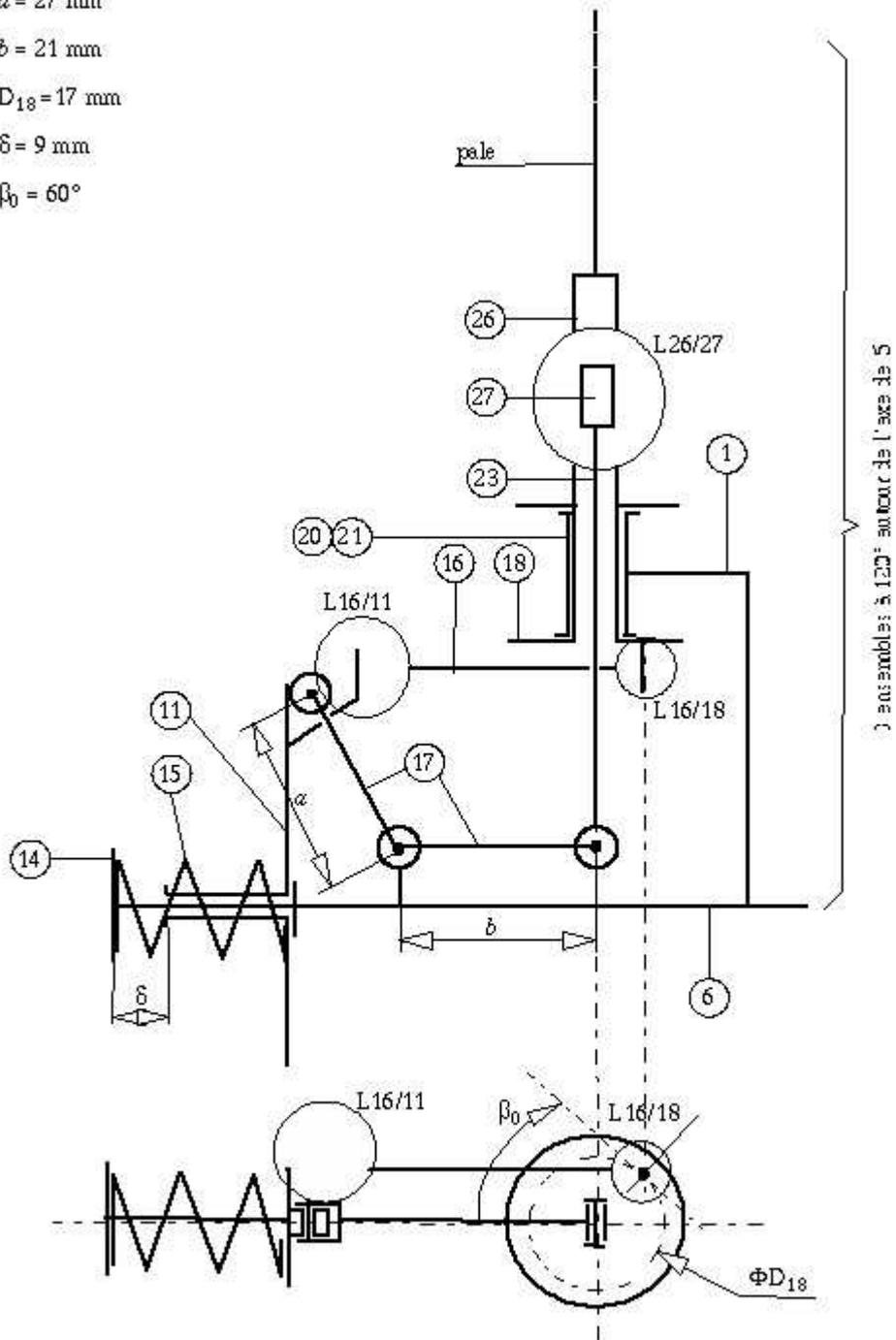
- Figure 1 : Sous-ensembles fonctionnels.
- Figure 2 : Sous-ensemble (SE1) avec balourd.
- Figure 3 : Zone de contact garniture/disque – Géométrie du disque.
- Figure 4: Sous-ensemble (SE1) et (d) en rotation.

Documents séparés

- Document 1 : Aérogénérateur (dessin partiel).
- Document 2 : Liaison pivot (6) / (0) et chaîne de cotes (**A RENDRE AVEC VOTRE COPIE**).
- Document 3 : Effets du vent sur une pale.
- Document 4 : Schéma cinématique partiel du sous-ensemble SE1 : « rotor et régulateur » (**A RENDRE AVEC VOTRE COPIE**)
- Document 5 : Mât de l'éolienne.

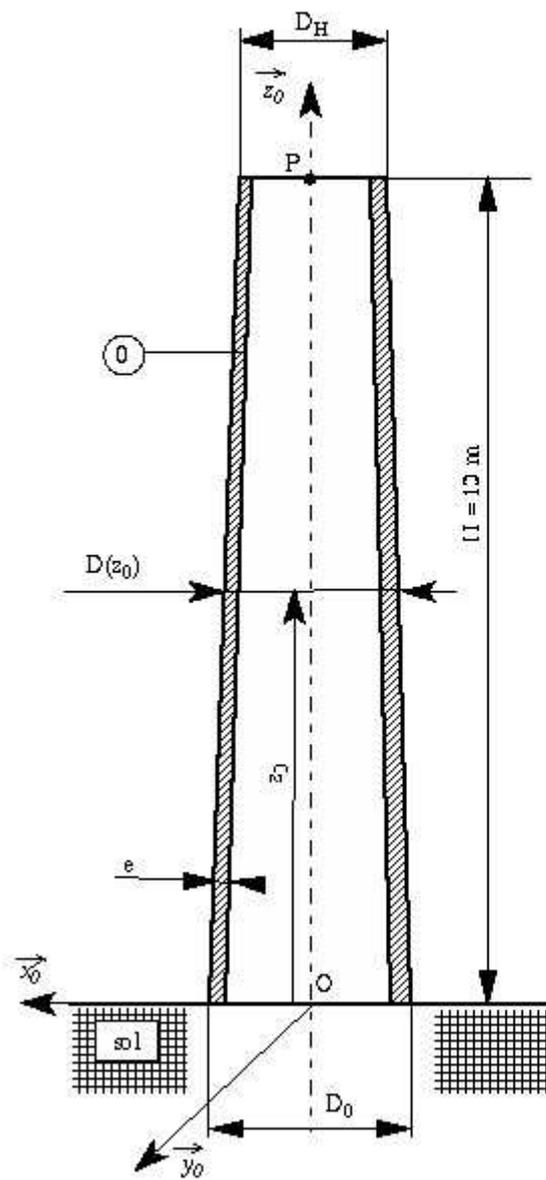


$\alpha = 27 \text{ mm}$
 $b = 21 \text{ mm}$
 $D_{18} = 17 \text{ mm}$
 $\delta = 9 \text{ mm}$
 $\beta_0 = 60^\circ$

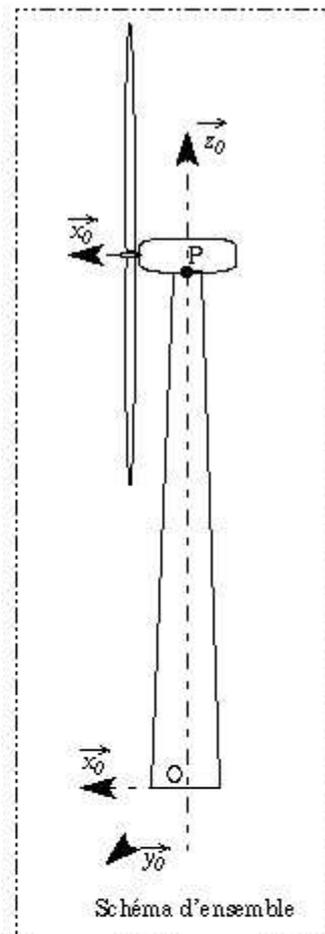


DOCUMENT 4 : Schéma cinématique partiel du sous-ensemble SE1 : "rotor et régulation"

A RENDRE AVEC VOTRE COPIE



Repère et notation de s dimensions du mât



Nota : $D(z_0)$ représente le diamètre extérieur à la cote z_0

DOCUMENT 5 : Mât de l'éolienne