

## Chapitre2

### Les systèmes de conversion éolienne (SCE)

- Définitions,
- Principe de fonctionnement,
- Types d'éoliennes (Autonomes, connectés aux réseaux),
- Architectures
- Partie mécanique de la turbine

### Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

#### Avantages :

- l'énergie éolienne est une énergie renouvelable contrairement aux énergies fossiles.
- L'énergie éolienne est une énergie propre. Elle n'a aucun impact néfaste sur l'environnement comme les autres sources d'énergie qui ont causé un changement radical du climat par la production énorme et directe du CO<sub>2</sub>.
- L'énergie éolienne ne présente aucun risque et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs contrairement à l'énergie nucléaire.
- Le mode d'exploitation des éoliennes et la possibilité de les arrêter à n'importe quel moment, leur donne l'avantage d'avoir un bon rendement, contrairement aux modes de fonctionnement continus de la plupart des centrales thermiques et nucléaires.

#### Inconvénients :

- la nature stochastique du vent a une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour les gérants des réseaux.
- Le coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classique surtout sur les sites moins ventés .
- Le bruit : il a nettement diminué grâce aux progrès réalisés au niveau des multiplicateurs.

#### Définitions

#### L'énergie éolienne

L'énergie en provenance du vent traverse la turbine éolienne qui est un élément d'interface entre le domaine de la mécanique des fluides et de la mécanique traditionnelle. La turbine éolienne récupère l'énergie cinétique présentée dans le vent et la transforme en énergie mécanique de rotation, Cette énergie mécanique peut être exploitée principalement de deux manières :

- soit directement pour entraîner par exemple une pompe de relevage d'eau.
- soit pour entraîner une génératrice électrique.

Dans le cas de production d'énergie électrique, on peut distinguer deux types de configuration:

- L'énergie est stockée dans des accumulateurs en vue de son utilisation ultérieure.

- L'énergie est utilisée directement par injection sur un réseau de distribution.

Dans la deuxième configuration, le générateur éolien peut fonctionner isolément ou en parallèle avec une autre source d'énergie électrique. Le générateur isolé est, le plus souvent, de puissance assez faible (jusqu'à 20 kW). Pour un fonctionnement en parallèle avec d'autres sources d'énergie électrique, les puissances sont beaucoup plus importantes (100 kW et plus) ; le prix de revient minimal du kilowattheure produit est l'objectif qui imposera le dimensionnement, le choix, et la disposition des différents composants.

Selon la gamme de puissance produite par l'aérogénérateur, on distingue les catégories des éoliennes suivantes :

- Eoliennes de petite puissance : couvre la gamme de puissance de 20W à 50kW réparties en trois catégories : micro éoliennes, 100W maximum, mini éoliennes de 100W à 10kW et petites éoliennes de 10 à 50KW.
- Eoliennes de moyenne puissance : de 50Kw à quelques centaines de kW.
- Eoliennes de forte puissance : supérieure à 1 MW.

### La turbine éolienne

Une turbine éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice.

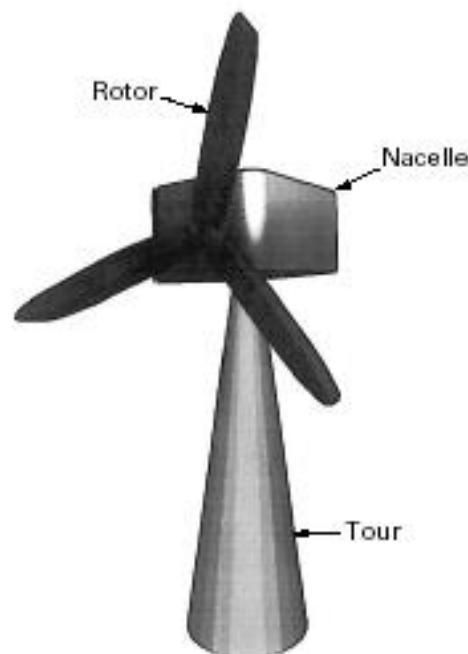


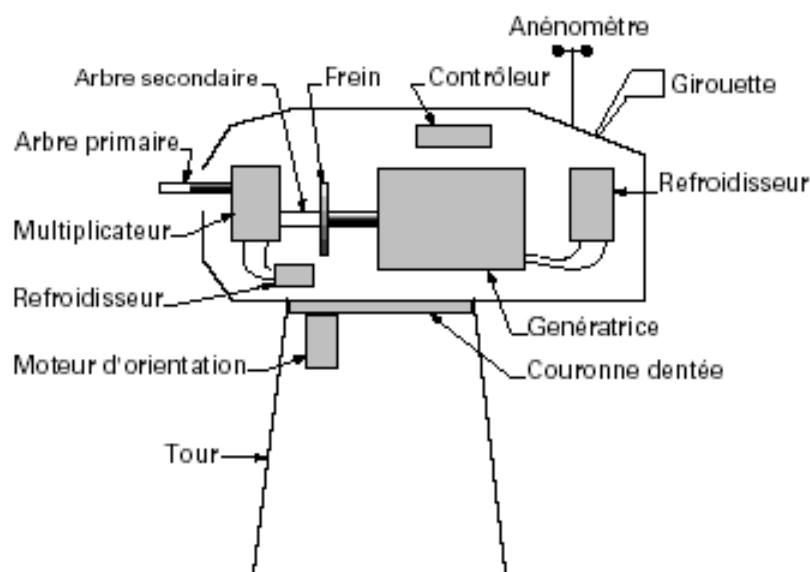
Figure 2-1 : Composants d'une éolienne

### Rotor

C'est le capteur d'énergie qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Le rotor est un ensemble constitué de pales et de l'arbre primaire, la liaison entre ces éléments étant assurée par le moyeu.

### Nacelle

Son rôle est d'abriter l'installation de génération de l'énergie électrique ainsi que ses périphériques. Différentes configurations peuvent être rencontrées suivant le type de la machine. La figure (2-1) présente une coupe d'une nacelle avec ses différents composants :



**Figure 2-2** : Eléments d'une nacelle

- le multiplicateur de vitesse : il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique. En effet, la faible vitesse de rotation de l'éolienne ne permettrait pas de générer du courant électrique dans de bonnes conditions avec les générateurs de courant classiques.
- L'arbre secondaire comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.
- la génératrice: Différents types de génératrices peuvent être rencontrés.
- un contrôleur électronique chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne. Il s'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m/s), gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble rotor, nacelle face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie et réduire les efforts instationnaires sur l'installation. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre (vitesse du vent) et une girouette (direction du vent), habituellement situés à l'arrière de la

nacelle. Enfin, le contrôleur assure également la gestion des différentes pannes éventuelles pouvant survenir

- divers dispositifs de refroidissement (génératrice, multiplicateur) par ventilateurs, radiateurs d'eau, ou d'huile.
- le dispositif d'orientation de la nacelle : Il permet la rotation de la nacelle à l'extrémité supérieure de la tour, autour de l'axe vertical. L'orientation est généralement assurée par des moteurs électriques, par l'intermédiaire d'une couronne dentée. De nombreuses éoliennes comportent un système de blocage mécanique de la position de la nacelle suivant une orientation donnée ; cela évite de solliciter constamment les moteurs et permet aussi de bloquer l'éolienne durant les opérations de maintenance.

### **Tour**

Son rôle est d'une part de supporter l'ensemble rotor, nacelle pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi de placer le rotor à une hauteur suffisante, de manière à sortir autant que possible le rotor du gradient de vent qui existe à proximité du sol, améliorant ainsi le captage de l'énergie. Certains constructeurs proposent ainsi différentes hauteurs de tour pour un même ensemble (rotor, nacelle) de manière à s'adapter au mieux aux différents sites d'implantation.

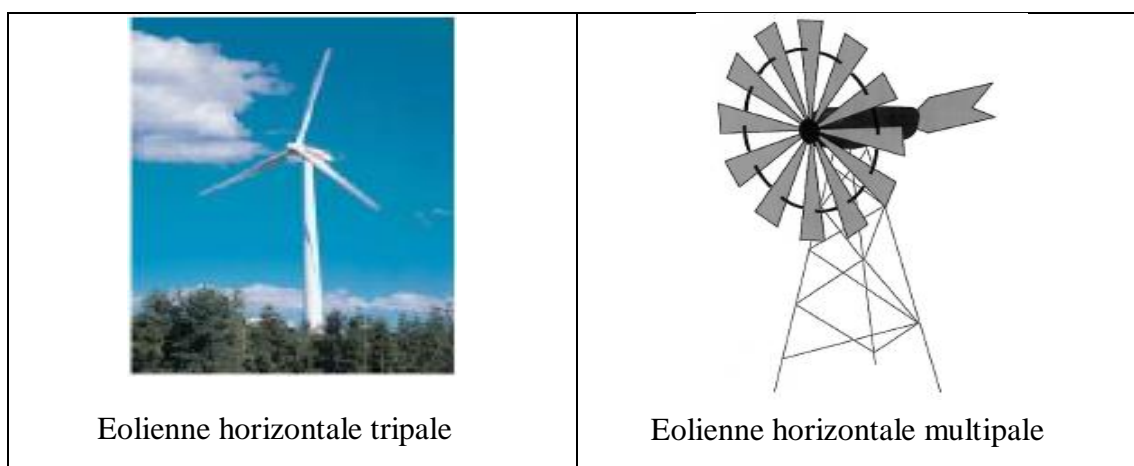
### **Différents types d'éoliennes**

On classe les éoliennes suivant la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice. Il existe principalement deux types de turbines éoliennes:

- Turbines à axe horizontal.
- Turbines à axe vertical.

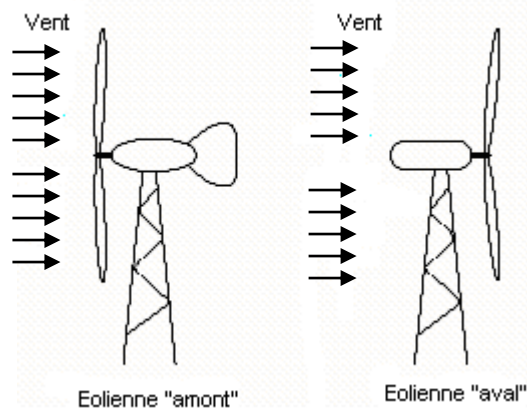
### **Turbines à axe horizontal**

La plupart des éoliennes actuellement installées utilisent des turbines à axe horizontal. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent les voilures à deux, trois pales (les plus courantes) et les multipales figure (2-3).



**Figure 2-3 :** Eoliennes tripales et multipales

La voilure peut être placée avant la nacelle (Eolienne « amont ») et alors un système mécanique d'orientation de la surface active de l'éolienne « face au vent » est nécessaire. Une autre solution qui permet d'alléger la construction par la suppression de tout dispositif mécanique d'orientation est l'emplacement de la turbine derrière la nacelle (Eolienne « aval »). Dans ce cas la turbine se place automatiquement face au vent. Les éoliennes de ce type sont assez rares car des vibrations importantes sont à noter qui sont dues au passage des pales derrière le mat.



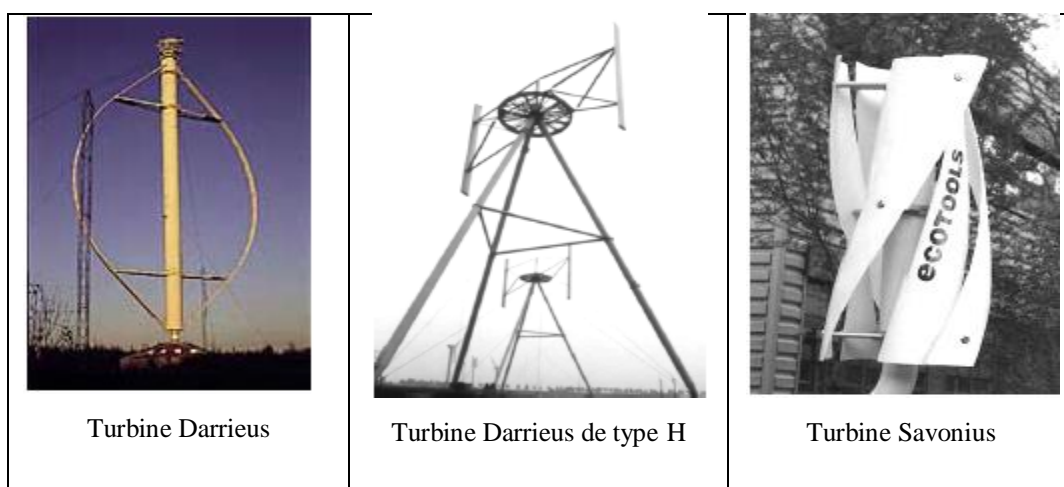
**Figure 2-4:** Configurations à axe horizontal

### Turbines à axe vertical

Elles présentent certains avantages : machineries au sol, pas besoin d'orientation en fonction de la direction du vent, construction souvent simple. Elles tournent à faible vitesse et sont de ce fait peu bruyantes. Elles présentent par contre des difficultés pour leur guidage mécanique, le palier bas devant supporter le poids de l'ensemble de la turbine.

Il existe principalement trois technologies de ce type d'éoliennes :

- Les turbines Darrieus classiques.
- Les turbines Darrieus à pales droites (type-H).
- Les turbines Savonius.

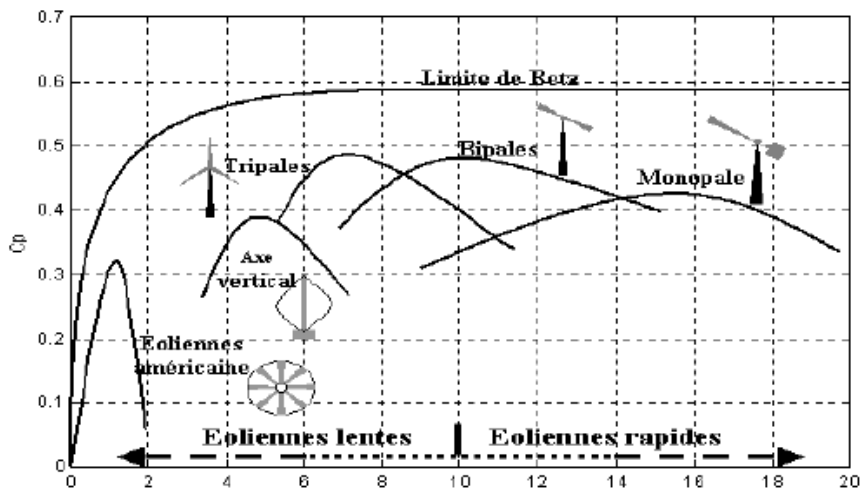


**Figure 2-5 :** Eoliennes à axe vertical

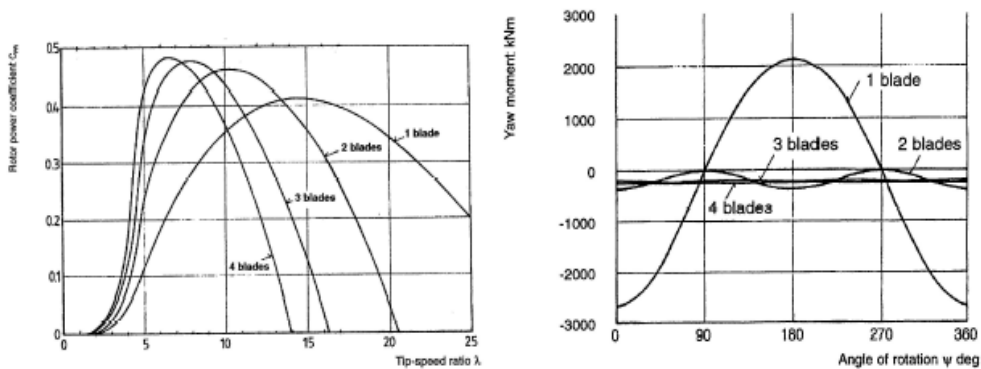
**Conception des pales**

Les éoliennes à axe horizontal sont les plus répandues grâce à leur rendement élevé. Les ingénieurs évitent aujourd’hui de construire de grandes éoliennes avec un nombre pair de pales, surtout pour des raisons de stabilité. Dans le cas d’une éolienne à structure rigide, il y’aura des problèmes de stabilité si le rotor a un nombre pair de pales : au moment où la pale supérieure fléchit légèrement vers l’arrière, atteignant le point le plus extrême et captant ainsi la puissance maximale du vent, la pale inférieure traverse la zone d’abri créée juste devant la tour .

Les éoliennes à marche lente sont munies d’un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8m. Leurs coefficients de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues dans la production de l’énergie électrique et possèdent généralement entre 1 et 3 pales.



**Figure 2-6 : Courbes des aérogénérateurs**



**Figure 2-7 : Allure des coefficients de puissance et de couple**

### A- Conception tripale

L'utilisation de rotor à trois pales est prédominante dans l'ensemble des machines de moyennes et grandes puissances, exploitées ou construites dans le monde soit environ 80 % du marché. Ce-ci à cause de leur stabilité dynamique et impact visuel, de plus, leur coefficient de puissance atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente.

### B- Conception bipale

Les éoliennes bipales ont certains inconvénients, entre autres parce qu'il leur faudra une vitesse de rotation bien plus élevée pour produire la même quantité d'énergie qu'une éolienne tripales, ainsi, les vibrations cycliques importantes qui peuvent apparaître lorsque la nacelle cherche à suivre le vent et que les pales sont à l'horizontale, ce qui exige une conception très complexe vu qu'elle doit être muni d'un rotor basculant pour éviter ces chocs.

### C- Conception monopale

Les éoliennes monopales sont assez rares, les problèmes étant encore plus prononcés que dans le cas des éoliennes bipales. Outre une vitesse de rotation plus élevée, et des problèmes de bruit et d'impact visuel, l'inconvénient de ce type d'éolienne est le couple de torsion important appliqué sur l'arbre, ainsi pour équilibrer le rotor, il faudra munir l'éolienne d'un balancier du côté du moyeu opposé à la pale .

### Matériaux de la pale

La plupart des pales modernes des grandes éoliennes sont fabriquées en plastique (polyester ou époxy) renforcé par des fibres de verre. L'utilisation de fibres de carbone ou d'aramide comme matériaux de renforcement est une autre possibilité, mais en général, une telle solution s'avérera trop chère pour les grandes éoliennes.

Les matériaux composites de bois, bois-époxy ou bois-fibres-époxy n'ont pas encore pénétré le marché des pales, bien qu'on explore toujours les possibilités de leur utilisation pour la fabrication des pales. Les alliages d'acier et d'aluminium posent des problèmes de poids et de fatigue du métal, respectivement. Par conséquent, ces alliages sont actuellement seulement utilisés pour les pales très petites.

### Stratégies de fonctionnement d'une éolienne

#### Bilan des forces sur une pale

Les modes de fonctionnement d'une hélice peuvent être représentés de la façon suivante/  
La vitesse du vent arrivant face à un élément de pale, situé à un rayon de  $r$  est représentée par le vecteur  $\vec{V}_a$ . Le vecteur  $\vec{V}_r$  représente la composante de vent due à la rotation de l'aérogénérateur. La résultante de ces deux vecteurs est appelée vent apparent ou vent relatif  $\vec{W}$ . Celui-ci engendre un

moment  $M$  et une force résultante  $\vec{R}$ . Cette force peut se décomposer en une force de traction  $\vec{F}_{ax}$  suivant l'axe de l'hélice directement compensée par la résistance mécanique du mat, et une force dans le plan rotor  $\vec{F}_{rot}$ , responsable d'un couple

$$C = F_{rot} \cdot r \tag{2-1}$$

Le domaine (A) correspond à celui d'une hélice tractrice où l'énergie est fournie au fluide par l'élément de pale (avion).

Lorsque la résultante  $\vec{R}$  se situe dans le domaine (C), c'est le fluide qui fournit de l'énergie à la pale; on se trouve alors dans le cas d'un fonctionnement aéromoteur caractéristique des éoliennes.

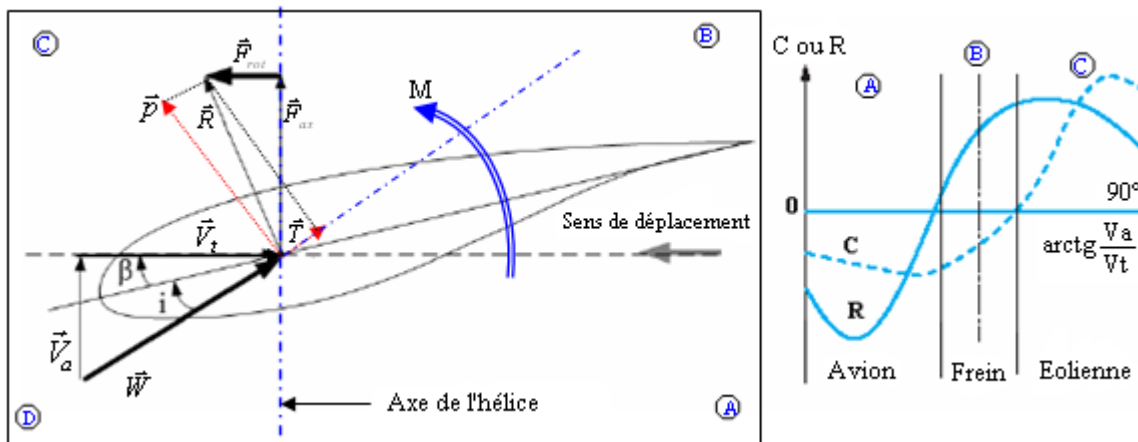


Figure 2-8 : Comportement d'une pale dans un flux

On définit les angles suivants:

- l'angle d'incidence «  $i$  » celui que fait la surface de la pale avec la direction du vent apparent.
- L'angle de calage «  $\beta$  » est l'angle formé par la pale et le plan de rotation.

**Décomposition de la résultante de l'action du vent : traînée et poussée**

La résultante  $R$  des actions de l'air sur l'élément de la pale peut être décomposée en 2 forces  $P$ , et  $T$   
 $P$  (*Poussée*) : perpendiculaire à la direction du vent.

$T$  (*Traînée*) : Dans la même direction du vent.

Les forces  $P$  et  $T$  peuvent s'exprimer selon le théorème de la variation de la quantité de mouvement sous la forme :

$$P = C_{rot} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot S \cdot W^2 \tag{2-2}$$

$$T = C_{ax} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot S \cdot W^2 \tag{2-3}$$



$C_{ax}$  et  $C_{rot}$  sont déterminés en soufflerie et donnés sous forme de diagramme polaire en fonction de l'angle d'incidence figure (2-9) .

$\rho$  : la masse volumique de l'air.

$S$  : surface de la portion de pale au vent apparent.

$W$  : vent apparent.

Connaissant  $P$  et  $T$ , il est possible d'exprimer  $F_{rot}$ , et  $F_{ax}$  en fonction des angles  $\beta$  et  $i$  pour un régime de fonctionnement donné figure (2-8).

$$F_{rot} = P \sin(\beta + i) - T \cos(\beta + i) \tag{2-4}$$

$$F_{ax} = P \cos(\beta + i) + T \sin(\beta + i) \tag{2-5}$$

$$\beta + i = \Phi \tag{2-6}$$

Le couple moteur pour la portion de pales considérée est égal à :

$$C = r [ P \sin(\beta + i) - T \cos(\beta + i) ] \tag{2-7}$$

Le couple moteur total est égale à la somme de tous les couples élémentaires le long de la pale compte tenu du fait que «  $i$  » varie de l'origine à l'extrémité de la pale.

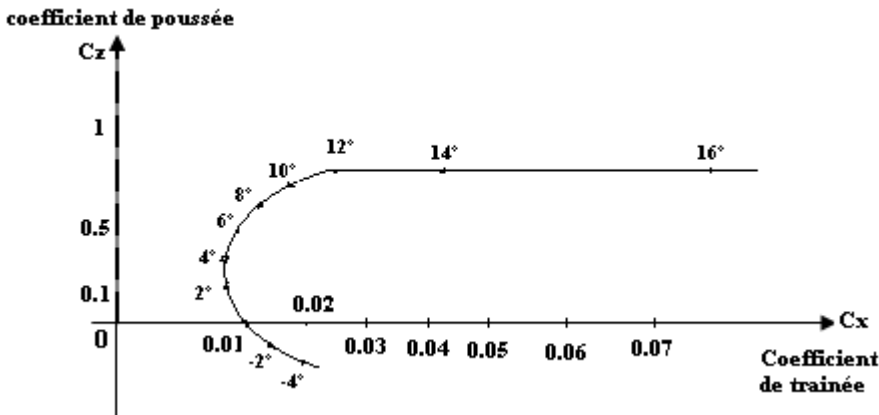
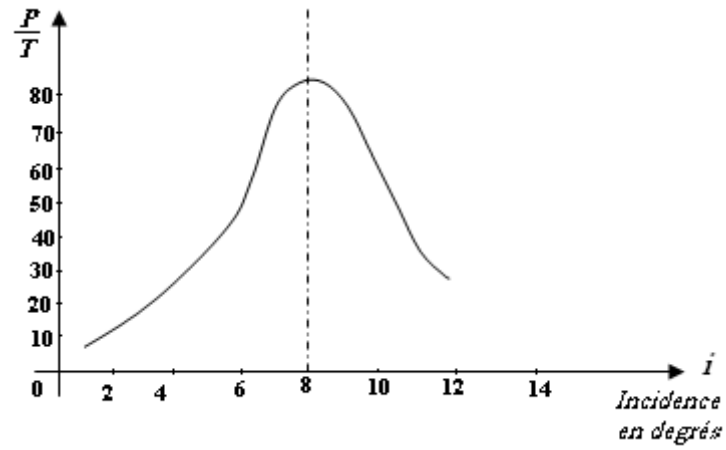


Figure 2-9: Polaire de profil –  $i$  en fonction de  $C_z$  et  $C_x$

En mettant  $x = \frac{P}{T}$ , on démontre que le rendement de la portion de la pale qui est égal au rapport

de la puissance récupérée sur la puissance fournie par le vent est fonction du rapport  $\frac{C_z}{C_x}$  fonction  $i$ .

Le graphe (2-9) représente la variation du rapport  $\frac{P}{T}$  c'est-à-dire  $\frac{C_z}{C_x}$  en fonction de  $i$  [9].



**Figure 2-10:** Angle d'incidence optimum d'un profil obtenu à partir de la polaire

Il existera donc pour chaque portion de pale un angle d'incidence optimal. Ce qui explique que pour améliorer le rendement d'une hélice il sera possible de faire varier le calage de chaque portion de pale. Cette propriété sera utilisée pour la régulation.