

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Mécanique

Filière : Génie Mécanique

Option : CONCEPTION ET PRODUCTIQUE

Réf:.....

**Mémoire de Fin d'Etudes**

**En vue de l'obtention du diplôme de:**

**MASTER**

*Thème*

**Variation des paramètres mécaniques pour  
l'optimisation du rendement d'une  
éolienne**

Présenté par :

**Samir BENCHARIF**

Proposé et dirigé par :

**Dr. Brahim NINE**

Promotion : Juin 2013

➤ ***Remerciements***

Un grand remerciement à tous les enseignants du département Génie Mécanique et à tous les membres du laboratoire de génie mécanique De l'université de Biskra, notamment :

Le chef de département *Pr.Moummi Nouredine*

Mon encadreur Dr . Nine Brahim

➤ ***Dédicace :***

 A ma famille.

 A mes enseignants.

 A tous les membres du département du génie mécanique ainsi qu'à tous les membres du laboratoire de génie mécanique de l'université Mohamed Khider de Biskra.

## Table de matières

Remerciements et Dédicace.....	1
Table de matières.....	
Liste des figures.....	
Liste des tableaux.....	
Liste des symboles.....	
Introduction générale.....	1
 CHAPITRE I:GENERALITE A L'ENERGIE EOLIENNE  	
I. Généralités sur l'énergie éolienne.....	3
I-1. Historique.....	3
I.2. Qu'est-ce que l'énergie éolienne.....	4
I.3. Classification des éoliennes.....	4
I.3.1 Eoliennes à axe horizontal.....	5
I.3.1.1. Eoliennes à axe horizontal Amont.....	6
I.3.1.2. Eoliennes à axe horizontal Aval.....	6
I.3.2. Eoliennes à axe vertical (Perpendiculaire au vent).....	7
I.4. Le principe de fonctionnement d'une éolienne.....	8
I.5. Les différentes tailles d'éoliennes.....	10
I.5. 1.Les raisons pour choisir une grande éolienne.....	10
I.5. 2.Les raisons pour choisir une éolienne plus petite.....	11
I.6. Principaux organes d'une éolienne.....	11
I.6.1. Le mât.....	11
I.6.2 .Un rotor.....	12
I.6.3.Une nacelle.....	13
I.6.3.1 .Les différents composants d'une nacelle.....	13
I.7. L'éolien dans le monde.....	14
I.8. Aspects économiques de l'énergie éolienne.....	15
I.9. Situation actuelle de L'énergie éolienne dans le monde.....	18
I.9.1 En Europe.....	18
I.9.2 En Amérique.....	19
I.9.3 En Asie.....	19
I.9.4 En Afrique.....	19
I.10. Aspect écologique de l'énergie éolienne.....	22
I.10.1 Destruction et la chute d'éléments composant l'éolienne.....	23
I.10.2 Le bruit.....	23
I.10.3 Risque pour les oiseaux.....	24
I.10.4 Impact visuel.....	24
I.11. Conclusion.....	25
I.12.Le vent.....	25
I.12.1 Origine du vent.....	25
I.12.2 Vitesse du vent.....	26
I.13- Les ressources éoliennes de l'Algérie.....	27

I.13.1 Estimation des ressources éoliennes.....	28
I.13.2 atlas de la vitesse moyenne saisonnière du vent.....	30
I.14. Atlas préliminaire du vent à 10 mètres	34
I.15. Potentiel utile.....	34
I.16. Atlas préliminaire du vent à 25 mètres.....	34
I.17. Potentiel utile.....	36
I.18. Les unités de mesure du Vent.....	37

## CHAPITRE II: ETUDE D'UNE EOLIENNE A AXE HORIZONTAL

II. INTRODUCTION.....	38
II.1. Notions générales de l'aérodynamique.....	39
II.2. Théorie de Betz.....	39
II.2.1. Définition de l'action du moteur éolien sur l'air.....	40
II.2.2. Définition de la vitesse au niveau du moteur éolien.....	41
II.3. La puissance maximale absorbée par le moteur éolien.....	42
II.4. Limite de BETZ .....	43
II.5. Rapport de Vitesse $\lambda$ .....	44
II.6. Etude du multiplicateur.....	45
II.6.1. Principe.....	45
II.6.2. Fréquence de rotation.....	45
II.7. Trains d'engrenages.....	45
II.7.1. Généralités.....	45
II.7.2. Schématisations.....	46
II.7.3 Etude des trains classique.....	47
II.7.4. Etude des trains épicycloïdaux.....	47
II.7.5. Configuration avec Train épicycloïdal simple.....	48
II.7.6. formule de Willis.....	49
II.8. Cas usuels de fonctionnement.....	49
II.9. Trains épicycloïdaux.....	51
II.10. Les trois configurations.....	58
II.11. Conclusion.....	59

## CHAPITRE III CALCUL ET CONCEPTION DU MULTIPLICATEUR

III.1. Introduction.....	60
III.2. Détermination des paramètres aérodynamiques de l'éolienne.....	60
III.3. Calcul préliminaire.....	61
III.3.1. Calcul de la puissance mécanique disponible.....	61
III.4. Conception du multiplicateur.....	62

---

III.4.1- Avant propos.....	62
III.4.2- Les paramètres fonctionnels de départ.....	62
III.4.3- Etude comparative des solutions envisageables.....	62
III.4.4- Le rapport de multiplicateur.....	62
III.4.5- Calculs des caractéristiques du multiplicateur.....	63
III.4.6 -Schéma cinématique du multiplicateur.....	64
III.4.7- Calculs des caractéristiques des roues dentées.....	65
III.4.8- Calcul du rapport de multiplicateur.....	66
III.5. Efforts sur les dentures.....	66
III.5. 1. Efforts de contact.....	67
III.5. 1. 2. Action de contact $F_2$ .....	67
III.5. 2. Calcul de la résistance de la dent.....	69
III.5. 2.1. Méthode de Lewis.....	69
III.5. 2.2.Détermination de la contrainte admissible.....	70
III.5. 2.3.Choix du matériau du pignon arbré (1) .....	71
III.6. Calcul du poids des satellites 2.....	71
III.7. Choix des solutions technologiques.....	71
III.7.1.Choix des roulements.....	71
III.7.2.Choix des coussinets.....	72
III.7.3.Choix des joints d'étanchéité à deux lèvres.....	73
III.7.4.Choix des écrous à encoches.....	73
III.7.5.Choix des cannelures usinées sur les bouts des arbres principales.....	74
Conclusion générale	
Références bibliographique	
Résumé	
Dessin d'ensemble	

## Liste des Figures

<b>Figure</b>	<b>Page</b>
Figure I.1 : Moulins à vent dans la région de la mancha, Espagne.....	3
Figure I.2 : Classification des éoliennes.....	4
Figure I.3: éolienne à axe horizontal.....	5
Figure I.4: Schéma d'une éolienne à axe horizontal en amont.....	6
Figure I.5: Schéma d'une éolienne à axe horizontal en aval.....	6
Figure I.6 : Eolienne de Darrieus.....	7
Figure I.7 : Éolienne types Savonius (à droite) et de type Darrieus (à gauche).....	8
Figure I.8 : Principaux organes d'une éolienne.....	9
Figure I.9 : Tour(Le mât) d'une éolienne.....	12
Figure I.10 : Rotor d'une éolienne en montage.....	12
Figure I.11 : Composants d'une nacelle.....	13
Figure 1.12 : Coût moyen du KWH éolien.....	16
Figure I.13 : Progression de la capacité mondiale de production de l'électricité éolienne.....	17
Figure 1.14 : Directions des vents autour de la Terre.....	27
Figure I.15 : la vitesse moyenne du vent en l'Algérie estimée à 10 m du sol.....	30
Figure 1.16 : Atlas saisonniers de la vitesse moyenne du vent annuelle à 10 m du sol	31
Figure 1.17 : Atlas saisonniers de la vitesse moyenne annuelle du vent à 10 m du sol. (Hiver et automne).....	32
Figure I.18: Tracé de la carte des vents à 25 mètres d'altitude.....	35
Figure II-1 Sous-ensembles fonctionnel.....	38
Figure II-2 Schéma de principe d'un aéromoteur.....	38
Figure II-3: Configuration de Betz pour un moteur éolien.....	39
Figure II-4: Différents types d'engrenages.....	46
Figure II-5: Engrenage simple.....	47
Figure II-6: Train épicycloïdal avec un satellite.....	47
Figure II7: Schéma cinématique du train épicycloïdal.....	48
Figure II-8: Train épicycloïdal simple.....	48
Figure II.9 : Configuration Planétaire (3) bloqué.....	49
Figure II-10 : Configuration Planétaire(1) bloqué.....	50
Figure II-11: Configuration Satellite bloqué.....	50
Figure II-12: Configuration avec trains en série.....	51
Figure II-13: Vue éclatée d'un train épicycloïdal en série.....	52
Figure II-14: Train épicycloïdal en série.....	52
Figure II-15: Schéma d'un train épicycloïdal.....	53
Figure II-16: types de trains épicycloïdaux.....	53
Figure II-17: Schéma d'un train épicycloïdal.....	54
Figure II-18: Porte satellite fixe.....	54
Figure II-19: Planétaire fixe.....	55

Figure II-20: Planétaire fixe.....	55
Figure II-21: Configuration à 1satellites.....	56
Figure II-22: Configuration à 2 satellites.....	57
Figure II-23: Configuration à 3 Satellites.....	57
Figure II-24: Les trois configurations.....	58
Figure III-1 : Montage à 3 satellites.....	63
Figure III.2: Train épicycloïdal en série.....	64
Figure III.3: Efforts sur une denture droite.....	67
Figure III.4: Organigramme de calcul.....	67
Figure III.5: Efforts exercés sur une dent.....	69
Figure III.6 : Roulement à contact oblique.....	71

## Listes des Tableaux

Tableau	page
<i>Tableau I-1 : classification des turbines éoliennes</i>	9
<i>Tableau I-2 : utilisation mondiale des Sources d'énergie</i>	14
Tableau 1.3 : Capacité de la production éolienne en électricité par pays (Mégawatts)	20
Tableau I.4 : Effets du vent en fonction de sa vitesse (Echelle de beaufort).....	26
Tableau I.5: Carte des Vents de l'Algérie (Caractéristiques des sites et stations) * Stations dont les vitesses de vent ont été publiées dans l'Atlas Vent produit par l'O.N.M	31
Tableau I.6 : Les unités de mesure du Vent	35
Tableau II-1 : Vitesse du vent en fonction de l'altitude	
Tableau III-1 : Différents types d'engrenage	
Tableau IV.1 : Nombre des pales d'une éolienne	

Liste des Figures	Page
• <i>Figure I.1 : Moulins à vent dans la région de la mancha, Espagne.....</i>	2
• <i>Figure I.2 : Classification des éoliennes</i>	3
• <i>Figure I.3: éolienne à axe horizontal .....</i>	4
• <i>Figure I.4: Schéma d'une éolienne à_axe horizontal en amont.....</i>	5
• <i>Figure I.5: Schéma d'une éolienne à_axe horizontal en aval.....</i>	5
• <i>Figure I.6 : Eolienne de Darrieus.....</i>	6

• Figure I.7 : Éolienne types Savonius (à droite) et de type Darrieus (à gauche).....	7
• Figure I.8 : Principaux organes d'une éolienne.....	8
• Figure I.9 : Tour(Le mât) d'une éolienne.....	11
• Figure I.10 : Rotor d'une éolienne en montage.....	11
• Figure I.11 : Composants d'une nacelle.....	12
• Figure 1.12 : Coût moyen du KWH éolien .....	15
• Figure I.13 : Progression de la capacité mondiale de production de l'électricité éolienne.....	16
• Figure 1.14 : Directions des vents autour de la Terre .....	25
• Figure I.15 : la vitesse moyenne du vent en l'Algérie estimée à 10 m du sol	27
• Figure 1.16 : Atlas saisonniers de la vitesse moyenne du vent annuelle à 10 m du sol.....	28
• Figure 1.17 : Atlas saisonniers de la vitesse moyenne annuelle du vent à 10 m du sol. (Hiver et automne) .....	29
• Figure I.18: Tracé de la carte des vents à 25 mètres d'altitude.....	33
• FigureII-1 Sous-ensembles fonctionnel.....	
• FigureII-2 Schéma de principe d'un aéromoteur.....	
• Figure II-3: Configuration de Betz pour un moteur éolien.....	
• Figure II-2: Engrenage simple .....	
• Figure II-3: Train épicycloïdal avec un satellite .....	
• Figure II-4: Schéma cinématique du train épicycloïdal .....	
• Figure II4: Train épicycloïdal simple .....	
• Figure II-5: Configuration Planétaire (3) bloqué.....	
• Figure II-6: Configuration Planétaire(1) bloqué.....	
• Figure II-7: Configuration Satellite bloqué .....	
• Figure II-8: Configuration avec trains en série.....	
• Figure II-9: Vue éclatée d'un train épicycloïdal en série.....	
• Figure II-10: Train épicycloïdal en série.....	

- Figure II-11: Schéma d'un train épicycloïdal.....
- Figure II-12: types de trains épicycloïdaux .....
- Figure II-13: Schéma d'un train épicycloïdal .....
- Figure II-14: Porte satellite fixe.....
- Figure II-15: Planétaire fixe.....
- Figure II-16: Planétaire fixe .....
- Figure II-16: Planétaire fixe .....
- Figure II-17: Configuration à 2 satellites.....
- Figure II-17: Configuration à 3 Satellites.....
- Figure II-18: Trains épicycloïdaux en série.....
- Figure II-19: Train épicycloïdal avec satellites à 2 roues.....
- .FigureII.20 Les trois situations du planétaire fixe.....

## Table de matière

Remerciements et Dédicace.....	
Table de matière.....	
Listes des figures.....	
Listes des tableaux.....	
Introduction générale.....	
<b>CHAPITRE I:GENERALITE A L'ENERGIE EOLIENNE</b>	
I. Généralités sur l'énergie éolienne.....	2
I-1. Historique.....	2
I.2. Qu'est-ce que l'énergie éolienne.....	3
I.3. Classification des éoliennes .....	3
I.3.1 Eoliennes à axe horizontal.....	4
I.3.1.1. Eoliennes à axe horizontal Amont.....	5
I.3.1.2. Eoliennes à axe horizontal Aval.....	5
I.3.2. Eoliennes à axe vertical (Perpendiculaire au vent).....	6
I.4. Le principe de fonctionnement d'une éolienne.....	7
I.5. Les différentes tailles d'éoliennes ...	9
I.5. 1.Les raisons pour choisir une grande éolienne	9
I.5. 2.Les raisons pour choisir une éolienne plus petite	9
I.6. Principaux organes d'une éolienne.....	10
I.6.1. Le mât.....	10
I.6.2 .Un rotor.....	11
I.6.3.Une nacelle.....	12
I.6.3.1 .Les différents composants d'une nacelle.....	12
I.7. L'éolien dans le monde.....	13
I.8. Aspects économiques de l'énergie éolienne.....	14
I.9. Situation actuelle de L'énergie éolienne dans le monde.....	17
I.9.1 En Europe.....	17
	18

I.9.2 En Amérique.....	18
I.9.3 En Asie.....	18
I.9.4 En Afrique.....	21
1.10. Aspect écologique de l'énergie éolienne.....	
I.10.1 Destruction et la chute d'éléments composant l'éolienne	21
I.10.2 Le bruit	22
I.10.3 Risque pour les oiseaux	22
I.10.4 Impact visuel	23
I.11. Conclusion	23
I.12. Le vent	23
I.12.1 Origine du vent	24
I.12.2 Vitesse du vent	24
I.13- Les ressources éoliennes de l'Algérie	25
I.13.1 Estimation des ressources éoliennes	26
I.13.2 atlas de la vitesse moyenne saisonnière du vent	28
I.14. Atlas préliminaire du vent à 10 mètres	31
I.15. Potentiel utile	31
I.16. Atlas préliminaire du vent à 25 mètres	31
I.17. Potentiel utile	33
I.18. Les unités de mesure du Vent	35

## CHAPITRE II: ETUDE D'UNE EOLIENNE A AXE HORIZONTAL

### I. INTRODUCTION

#### II. Notions générales de l'aérodynamique

##### II .1. Théorie de Betz

##### II.2. Définition de l'action du moteur éolien sur l'air

##### II.3. Définition de la vitesse au niveau du moteur éolien

##### II.4. La puissance maximale absorbée par le moteur éolien

##### II.5. Limite de BETZ

##### II.6. Rapport de Vitesse $\lambda$

### III. LE MULTIPLICATEUR

#### III.1. Principe

#### III.2. Fréquence de rotation

### III.3. Trains d'engrenages

#### III.3. 1. Généralités

#### III.3.2. Schématisations

#### III.3.3 Etude des trains classique

#### III.3.4 Etude des trains épicycloïdaux

##### III.3.4.1. Configuration avec Train épicycloïdal simple

##### III.3.4.2. Configuration avec trains en série

##### III.3.4.3. Trains épicycloïdaux avec satellites à deux roues

Les trois animations ci-dessous illustrent ces différentes situations

## CHAPITRE III CALCUL ET CONCEPTION DU MULTIPLICATEUR

### III.1. Introduction

#### III.2. Détermination des paramètres aérodynamiques de l'éolienne:

### III.3. Calcul préliminaire

#### III.3.1. Calcul de la puissance mécanique disponible

#### III.3. Calculs et dimensionnement des éléments du multiplicateur

#### III.4. Détermination des caractéristiques du multiplicateur

**Liste des symboles**

<b>C<sub>p</sub></b>	coefficient d'échange de puissance
<b>ρ</b>	masse volumique de l'air
<b>S</b>	surface balayée par les pales
<b>V</b>	vitesse du vent
<b>R</b>	Longueur de la pale
<b>P<sub>max</sub></b>	puissance maximale récupérable
<b>λ</b>	paramètre de vitesse
<b>n</b>	Le nombre de tours
<b>C</b>	couple délivré par l' éolienne
<b>U</b>	vitesse au bout de la pale
<b>ω</b>	Vitesse de rotation angulaire
<b>m</b>	Module
<b>Z</b>	Nombre de dents
<b>P</b>	Pas ou primitif
<b>h<sub>a</sub></b>	Saillie de denture
<b>h<sub>f</sub></b>	Creux de denture
<b>h</b>	Hauteur de la dent
<b>d</b>	Diamètre primitif

<b>da</b>	Diamètre de tête
<b>df</b>	Diamètre de pied
<b>b</b>	Largeur de dent
<b>a</b>	entraxe
<b>K<sub>v</sub></b>	Coefficient correcteur
<b>α</b>	Angle de pression
<b>F<sub>R</sub></b>	Effort radial
<b>F<sub>T</sub></b>	Effort tangentiel
<b>F</b>	Effort sur la dent

### **Introduction générale:**

L'énergie éolienne est l'une des plus anciennes sources d'énergie utilisée. Son utilisation dans le passé était très répandue dans la production de l'énergie mécanique (pompage d'eau, le meulage des grains ainsi que le sciage du bois etc....)

L'énergie éolienne présente un intérêt certain pour son développement et son utilisation notamment dans les zones steppiques.

Elle est très attractive pour les éleveurs et les agriculteurs ainsi que pour les habitants dans des sites isolés et pour les petites communautés. Source alternative d'énergie, elle contribue à réduire sensiblement la consommation de carburant, de pièces détachées et le recours aux mécaniciens. Sa maîtrise et la connaissance des régimes des vents permettent une meilleure protection des sols contre l'érosion, la progression du désert et la préservation de l'environnement.

Les énergies fossiles (pétrole et gaz) ne vont pas être supplantés de si tôt par les énergies renouvelables (solaire, éolienne) mais, la part de ces dernières ne cesse d'augmenter.

L'existence d'un marché mondial d'éoliennes de plus en plus performantes et dont le coût est plus faible comparé aux moteurs à carburant liquide.

Les références mondiales, principalement dans les zones bien ventées, prouvent que le coût unitaire du kWh fourni par des groupes électrogènes est 2 à 4 fois plus cher que celui fourni par un moteur éolien d'égale puissance.

Des travaux effectués par de nombreux chercheurs nationaux prouvent à l'évidence que le pompage éolien peut être pratiqué partout à travers la steppe, compte tenu des faibles vitesses de démarrage des éoliennes lentes et du potentiel vent disponible.

La filière éolienne est probablement la plus grande réussite parmi les technologies renouvelables, puisque ses coûts sont devenus aujourd'hui compétitifs avec d'autres filières traditionnelles.

Grâce aux améliorations technologiques qui ont permis les réductions des coûts, cette filière occupe actuellement une part de plus en plus importante dans le bilan énergétique de nombreux pays.

Cette source d'énergie a aussi l'avantage d'être écologiquement très propre puisqu'un parc d'aérogénérateurs n'émet ni polluants ni gaz à effet de serre et qu'il ne génère pas de déchets et ne comporte que des risques mineurs sur l'environnement.

En Algérie, les réalisations dans le domaine de l'énergie éolienne sont très limitées en comparaison avec l'actuelle évolution mondiale dans ce domaine, qui a atteint des objectifs très avancés.

La présente étude s'intéresse à une partie de l'éolienne, purement mécanique qui engendre le multiplicateur de vitesse présentant d'autres avantages. Cette proposition est évidemment associée au calcul nécessaire pour la vérification de sa résistance à différentes sollicitations de fonctionnement. Ceci oblige à passer par une phase de conception et de calcul des différentes caractéristiques des engrenages et sollicitations dues au fonctionnement de l'éolienne.

Le présent mémoire est composé de trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à l'historique, aux définitions, ainsi qu'aux avantages et aux inconvénients de l'énergie éolienne. Enfin, il est présenté le potentiel du vent en Algérie.

Le deuxième chapitre Etude de l'aérodynamisme d'une éolienne à axe horizontal et les différents types de transmissions par engrenage ainsi que l'étude de différentes configurations des trains épicycloïdaux.

Le troisième chapitre Calculs et Conception des éléments du multiplicateur avec un dessin d'ensemble de la boîte de vitesse.

# CHAPITRE I

---

*INTRODUCTION A L'ENERGIE EOLIENNE*

---

## I. Généralités sur l'énergie éolienne:

### I.1. Historique:

L'idée d'exploiter l'énergie du vent date depuis l'antiquité, en effet des anciennes civilisations ont connu l'exploitation de l'énergie du vent (les perses, les égyptiens et les chinois).

A partir du 12ème siècle, les moulins à vent firent leur première apparition en Europe et au cours des siècles qui suivirent, cette « technologie » se répandit à travers le monde. Ces moulins à vent (aéromoteurs) étaient économiquement rentables et ils ont contribué la production de l'énergie mécanique (pompage d'eau le meulage des grains ainsi que le sciage du bois etc...)

A partir du 19ème siècle ces applications commencent à



Figure I.1 : *Moulins à vent dans la région de La Mancha, Espagne*

perdre leur intérêt, cela est dû à l'évolution technologique qu'a connue l'Europe pendant la révolution industrielle.

Devant la montée de la combustion du charbon, l'éolien a en pratique disparu de la carte. Après le premier choc pétrolier, des efforts pour développer à nouveau l'énergie éolienne ont été consentis, et le monde occidental se mit une fois de plus à investir dans la ressource éolienne, cette fois-ci dans le but de produire de l'électricité.

Vers le début des années 1980, les budgets de recherche et développement accordé à cette énergie « redécouverte » ont littéralement explosé dans certains pays comme Allemagne, les Etats-Unis, le Danemark et l'Espagne.

Après une période de tâtonnement, il s'est révélé que la bonne stratégie consiste à augmenter progressivement la puissance des aérogénérateurs, en s'appuyant sur la création de marchés subventionnés donnant une base industrielle suffisante pour le développement de ce domaine.

En plus des investissements dans le domaine éolien, certains pays ont adopté une législation incitative visant à promouvoir ce secteur. Dans certains pays, ces mesures étaient assez efficaces pour faire naître une véritable industrie éolienne.

Grâce aux améliorations technologiques qui ont permis des réductions de coûts, cette filière est aujourd'hui compétitive avec d'autres filières traditionnelles et occupe une part de plus en plus importante dans le bilan énergétique de nombreux pays [1].

## I.2. Qu'est-ce que l'énergie éolienne:

L'énergie éolienne qui tire son nom du dieu grecque responsable des vents nommé Eole, est produite par la force exercée par le vent sur les pales d'une hélice. Il est possible ainsi de produire deux sortes d'énergies. Premièrement, l'hélice peut se relier à des systèmes mécaniques servant à mouliner le grain ou à pomper l'eau (il s'agit du principe des moulins à vent). Il est aussi possible de rattacher l'hélice à un générateur transformant l'énergie mécanique en une énergie électrique. La quantité d'énergie produite dépend en premier lieu de la vitesse du vent élevé au carré, puis de la surface balayée par les pales et de la densité de l'air. Il faut pour produire de l'électricité un apport minimal du vent d'environ 12-14 km/h et des vents de 50-60 km/h pour produire à pleine puissance. Afin d'éviter d'abîmer l'équipement, la production doit être interrompue si les vents dépassent les 90 km/h.

Éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en:

Énergie électrique, dans le cas d'un aérogénérateur.

Énergie mécanique, dans le cas d'une éolienne de pompage

## 1.3 Classification des éoliennes:

On classe les éoliennes, en général, selon l'axe de rotation:



Figure I.2 : Classification des éoliennes [2].

### 1.3.1 Éoliennes à axe horizontal:

La plupart des éoliennes modernes utilisent ce principe, avec un nombre de pales variant. On les distingue par le nombre de leurs pales: quadri pale, tripale, bipale,... il existe même des mono pales (avec un contrepoids).

Parmi cette catégorie, on distingue:

#### §Les éoliennes lentes:

Ce type d'éolienne possède un grand nombre de pales, cela facilite évidemment le démarrage grâce à son couple élevé. Mais cela constitue un inconvénient lorsque la vitesse s'accroît à cause des vibrations.

Ces éoliennes ne peuvent pas atteindre des vitesses élevées.

Ces éoliennes sont utilisées comme des aéromoteurs notamment pour le pompage.

#### §Les éoliennes rapides:

A l'inverse des éoliennes lentes, les éoliennes rapides (les mono pales, les bipales, et les tripales) doivent parfois être lancées par un moteur électrique; cependant, une fois lancées, elles rendent l'énergie consommée au démarrage.

Si la vitesse du vent est élevée les vibrations

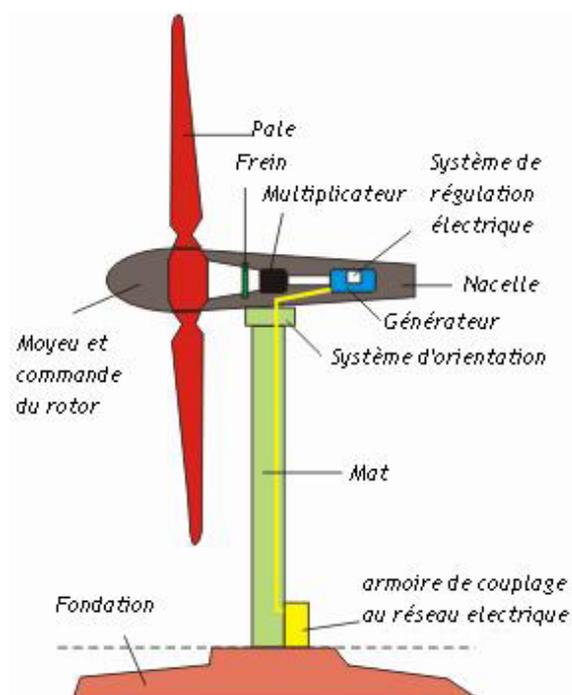


Figure I.3 : éolienne à axe horizontal

sont trop importantes et risquent de briser les pales, pour cela l'éolienne est freinée puis arrêtée à une vitesse de l'ordre de 20 à 25 m/s.

Ces éoliennes rapides conviennent mieux à la production d'électricité.

C'est ce type d'éolienne qui fait l'objet de ce travail, et dont l'objectif est l'étude du multiplicateur du point de vue conception.

### I.3.1.1. Eoliennes à axe horizontal Amont:

Le vent souffle sur le devant des pâles en direction de la nacelle.

Les pâles sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif d'orientation.

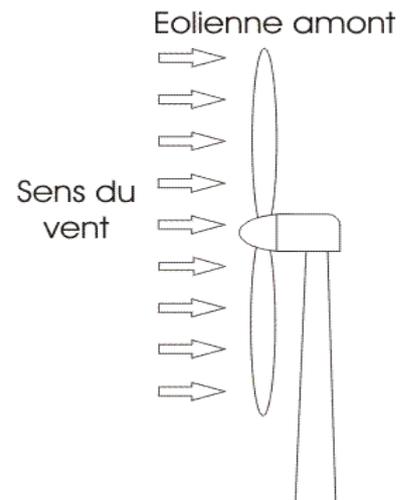


Figure I.4: Schéma d'une éolienne à axe horizontal en amont

### I.3.1.2. Eoliennes à axe horizontal Aval:

Le vent souffle sur l'arrière des pâles en partant de la nacelle. Le rotor est flexible auto orientable. La disposition turbine en amont est la plus utilisée car elle est plus simple et donne de meilleurs résultats pour les fortes puissances : pas de gouverne, les efforts de manœuvre sont moins importants et il y a une meilleure stabilité.

Les pâles des éoliennes à axe horizontal doivent toujours être orientées selon la direction du vent.

Pour cela il existe des dispositifs d'orientation de la nacelle en fonction de cette direction.

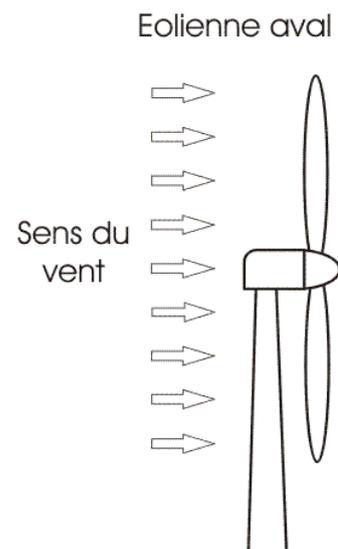


Figure I.5: Schéma d'une éolienne à axe horizontal en aval

Aujourd'hui, l'éolienne à axe horizontal avec un rotor du type hélice, présente un réel intérêt pour la production d'électricité à grande échelle

### I.3.2. Eoliennes à axe vertical (Perpendiculaire au vent):

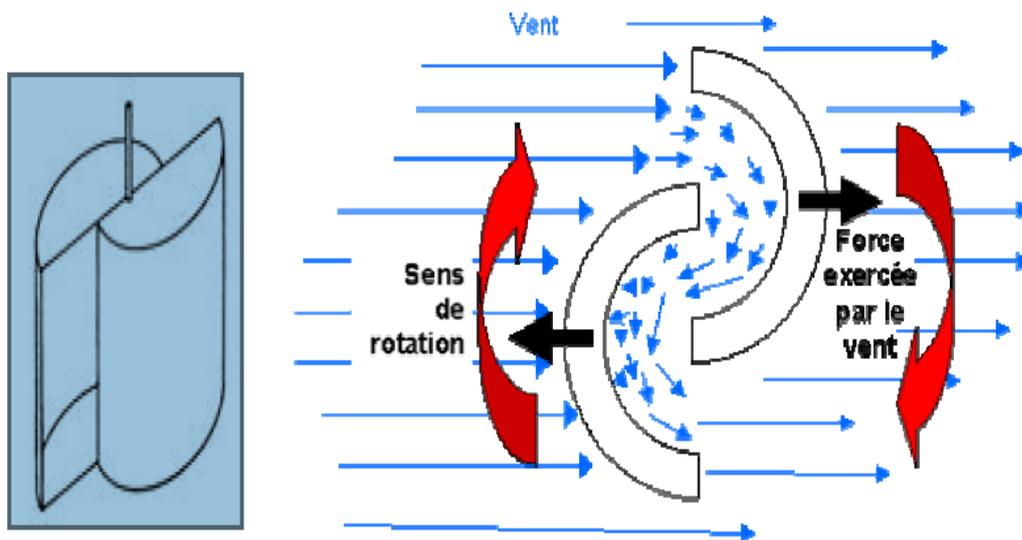
Ce type d'éolienne est caractérisé par son axe vertical. Il utilise le principe de fonctionnement omnidirectionnel, qui a l'avantage de capter les vents d'où qu'ils viennent, sans besoin de mécanisme d'orientation.

Un autre avantage dans ce type d'éolienne est la taille des pales, qui n'est pas aussi contraignante, comparée à celle du type à axe horizontal.

Plusieurs modèles d'éoliennes à axe vertical ont été conçus, mais les deux modèles les plus célèbres sont ceux de Darrieus et de Savonius.

Tous les modèles de cette catégorie sont restés au stade du prototype, car elles ne sont pas rentables actuellement, mais tous témoignent d'ingéniosité.

Avec la faillite du dernier fabricant, Flowind (USA), les éoliennes à axe vertical ne sont



pratiquement plus fabriquées aujourd'hui, mais elles feront encore rêver longtemps les ingénieurs car leur simplicité est attrayante [3].

Schéma du rotor de Savonius

Schéma de principe du rotor de Savonius

Figure I.6: Eolienne de Darrieus



Figure I.7:Éolienne types Savonius (à droite) et de type Darrieus (à gauche)

#### **I.4. Le principe de fonctionnement d'une éolienne:**

Sous l'effet du vent, le rotor tourne. Dans la nacelle, l'arbre principal entraîne un alternateur qui produit l'électricité.

La vitesse de rotation du rotor (de 12 à 25 tours/minute) doit être augmentée par un multiplicateur de vitesse jusqu'à environ 1500 tours/minute, vitesse nécessaire au bon fonctionnement de l'alternateur. Des convertisseurs électroniques de puissance ajustent la fréquence du courant produit par l'éolienne à celle du réseau électrique auquel elle est raccordée (50 Hz en Europe), tout en permettant au rotor de l'éolienne de tourner à vitesse variable en fonction du vent.

La tension de l'électricité produite par l'alternateur, de l'ordre de 600 à 1000 volts, est ensuite élevée à travers un transformateur de puissance, situé dans la nacelle ou à l'intérieur du mât, jusqu'à un niveau de 20 ou 30 KV. Ce niveau de tension permet de véhiculer l'électricité produite par chacune des éoliennes d'une centrale éolienne jusqu'au point de raccordement au réseau électrique public (en France, le réseau EDF). La tension de l'électricité produite par la centrale peut alors être de nouveau transformée, en fonction du niveau de tension de raccordement de la centrale au réseau public.

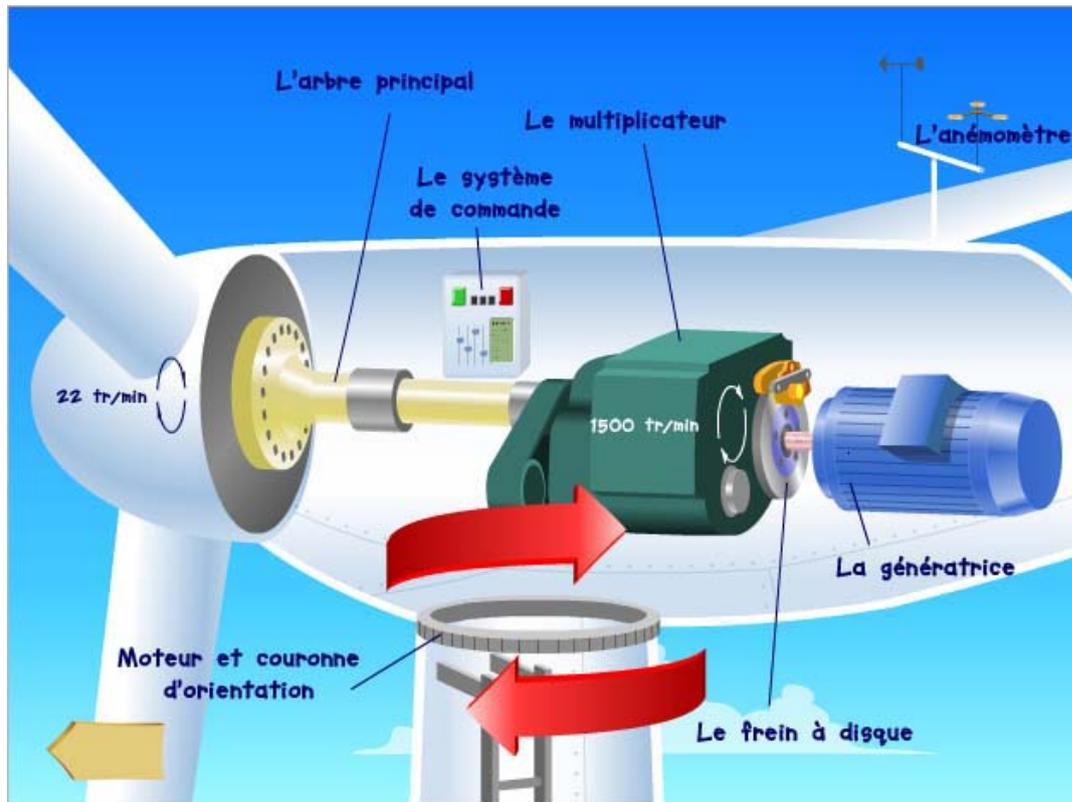


Figure 1.8 : Principaux organes d'une éolienne

Pour les centrales éoliennes de 10 à 15 MW de capacité, le niveau de tension de raccordement est, en France, généralement de 20 KV. Pour les centrales de capacité plus importante, le niveau de tension de raccordement peut aller de 60 à 90 KV, voire même 225 KV.

Pour pouvoir démarrer, une éolienne a besoin d'une vitesse de vent minimale, de l'ordre de 10 à 15 km/h. Et au-delà de 90 km/h, les turbines s'arrêtent de tourner. Tout d'abord, la fréquence d'occurrence des vents d'une vitesse supérieure à 90 km/h est généralement faible (inférieure à 1 %), et si les éoliennes fonctionnaient dans ces conditions, elles subiraient des efforts importants qui entraîneraient une usure prématurée de leurs équipements. Compte tenu du faible gain relatif sur la production que représente un fonctionnement par vent fort, les ingénieurs préfèrent, dans ces conditions, stopper les machines et attendre le retour de vents plus modérés et plus réguliers. Si les éoliennes ne fonctionnent pas au-delà d'une vitesse de vent de 90 km/h, leurs fondations n'en sont pas moins conçues pour résister à des vents beaucoup plus importants... La puissance d'une

éolienne classique est de 1 à 1,5 MW, mais les éoliennes de la nouvelle génération atteignent 2 à 3 MW et des modèles de 5 MW sont d'ores et déjà testés par les constructeurs [4].

### **I.5. Les différentes tailles d'éoliennes:**

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées.

Le tableau I-1 présente une classification des turbines éoliennes [5].

ECHELLE	DIMÉTRE DE L'HÉLICE	PUISSANCE DELIVRÉE
Petite	Moins de 12 m	Moins de 40 KW
Moyenne	12 m à 45 m	De 40 KW à 1 MW
Grande	46 m et plus	1 MW et plus

*Tableau I-1: classification des turbines éoliennes*

#### **I.5. 1. Les raisons pour choisir une grande éolienne:**

1. Le principe des économies d'échelle vaut évidemment également pour les éoliennes.

Ainsi, une grande éolienne produit normalement de l'électricité à un moindre coût qu'une petite. La raison pour cela est que les coûts de fondations, de construction, de raccordement au réseau et d'autres composants de l'éolienne (le système contrôle commande, p.ex.) sont plus ou moins les mêmes, quelque soit la taille de l'éolienne.

2. Les grandes éoliennes sont particulièrement appropriées à l'installation en mer. Le coût des fondations n'augmente pas proportionnellement avec la taille de l'éolienne, et les coûts d'entretien sont dans une large mesure indépendants de la taille.

3. Dans les zones où il est difficile de trouver des sites pour plus qu'une seule éolienne, une grande éolienne avec une tour haute tire mieux partie de la ressource éolienne qu'une petite[2].

### **I.5. 2. Les raisons pour choisir une éolienne plus petite:**

1. Il arrive que le réseau électrique local soit trop faible pour supporter la production électrique d'une grande éolienne. C'est souvent le cas dans les parties les plus extérieures du réseau où la densité de la population et les besoins en électricité est très basse.
2. La production d'électricité est moins fluctuante dans un parc éolien composé de plusieurs petites éoliennes, étant donné que les variations du vent sont aléatoires, ayant donc tendance à s'annuler. Et en plus, comme déjà mentionné, le choix d'éoliennes plutôt petites peut se révéler avantageux dans un réseau électrique faible.
3. Les coûts liés à l'usage de très grandes grues et à la construction de chemins suffisamment robustes pour supporter le transport des composants de l'éolienne constituent un autre facteur qui, dans certains endroits, rend plus économique le choix de petites éoliennes.
4. Avec plusieurs éoliennes d'une moindre puissance, on assure la répartition du risque en cas de défaillance temporaire d'une éolienne (p.ex. par suite d'une foudre).  
Des considérations esthétiques du paysage peuvent parfois dicter le choix d'éoliennes plus petites. Cependant, il faut savoir, que la vitesse de rotation d'un grand rotor est en général beaucoup moins rapide que celles d'un petit, ce qui a pour résultat qu'une seule grande éolienne attire souvent moins l'attention que plusieurs petites.  
On distingue aussi le "grand éolien", qui concerne les machines de plus de 250 KW, de l'éolien de moyenne puissance (entre 36 KW et 250 KW) et du petit éolien (inférieur à 36 KW) [2].

### **I.6. Principaux organes d'une éolienne:**

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes.

Néanmoins, une éolienne classique est généralement constituée de [6]:

**I.6.1. Le mât:** Généralement en métal, supporte l'ensemble des équipements permettant de produire l'électricité (nacelle + rotor). Il est fixé sur une fondation implantée dans le sol, une lourde semelle en béton qui assure l'ancrage et la stabilité de l'éolienne. Le mât des éoliennes atteint aujourd'hui 80 m de haut pour les plus puissantes (exceptionnellement jusqu'à 100 m). Les éoliennes sont haut perchées car le vent souffle plus fort à quelques

dizaines de mètres de hauteur, où il n'est pas perturbé par l'effet des obstacles : relief, arbres, maisons Etc. [6]

La tour doit être suffisamment solide pour supporter non seulement la nacelle et le rotor mais aussi les charges puissantes provoquées par le vent : d'une part la pression exercée par le vent directement sur la tour, et d'autre part dû à la puissance transmise par le rotor[6].

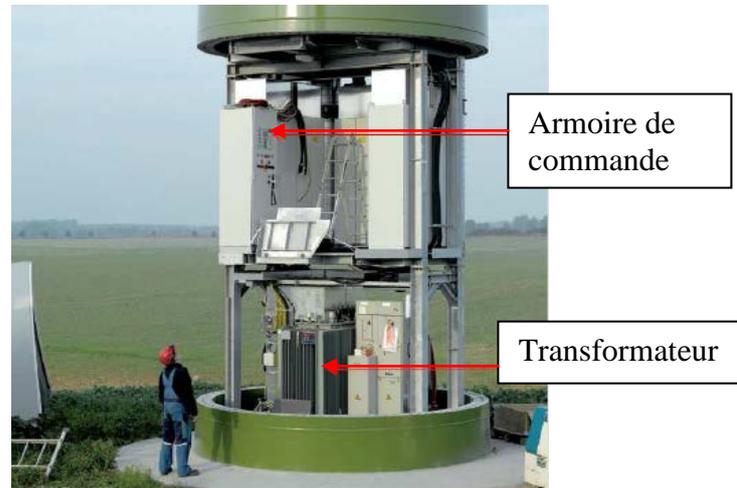


Figure I.9 : Tour(Le mât) d'une éolienne [6]

### I.6.2 .Un rotor:

Composé de plusieurs pales (en général 3) et du nez de l'éolienne. Les pales sont aujourd'hui faites de matériaux composites à la fois légers et assurant une rigidité et une résistance suffisantes. Leur longueur atteinte actuellement entre 30 et 55 mètres, soit un diamètre du rotor compris entre 60 et 110 mètres.

La puissance d'une éolienne est proportionnelle à la surface balayée par ses pales (un cercle) donc au carré du diamètre du rotor



Figure I.10 : Rotor d'une éolienne en montage.

Un rotor balaye un disque circulaire au cours d'une rotation et peut donc récolter l'énergie des molécules d'air traversant ce disque [6].

### I.6.3. Une nacelle:

Montée au sommet du mât et abritant les composants mécaniques et pneumatiques et certains composants électriques et électroniques nécessaires au fonctionnement de la machine [6].

Le transport de l'électricité produite dans la nacelle jusqu'au sol est assuré par des câbles électriques descendant à l'intérieur du mât de l'éolienne.

#### I.6.3.1 .Les différents composants 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.

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 : c'est elle qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.

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 plus nacelle » face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie.

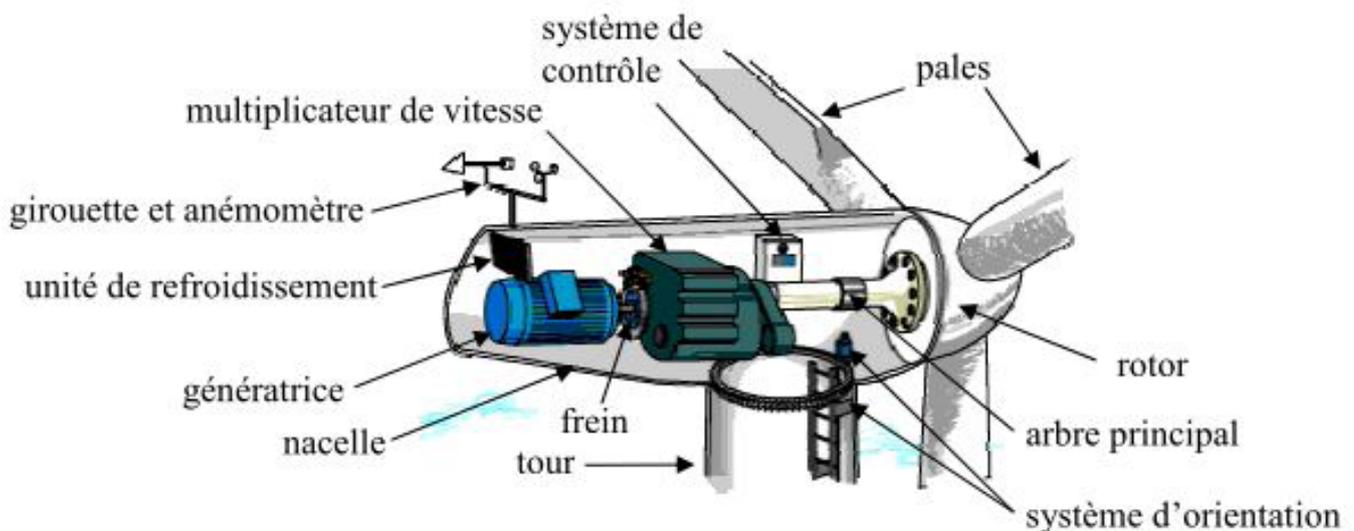


Figure I.11 : Composants d'une nacelle [7].

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.

Grâce à un système de supervision et de contrôle l'éolienne peut être arrêtée automatiquement et très rapidement en cas de nécessité. La sécurité du fonctionnement des éoliennes est ainsi assurée en continu.

Dans le cas des éoliennes produisant de l'électricité, un poste de livraison situé à proximité du parc éolien permet de relier ce parc au réseau électrique pour y être injecté [7].

### **I.7. L'éolien dans le monde:**

L'exploitation de l'énergie éolienne pour produire de l'électricité a eu des hauts et des bas. Les causes de ces fluctuations sont diverses: Guerres, crises d'autres types d'énergie, volonté de préserver l'environnement; évolution de la technologie, changement de politique énergétique etc.

A la suite de la fabrication du premier aérogénérateur. Les ingénieurs danois améliorèrent cette technologie durant la 1e et 2e guerre mondiale pour faire face à la pénurie d'énergie électrique. Malgré certains succès technologiques obtenus à cette époque, l'intérêt pour l'exploitation de l'énergie éolienne à grande échelle déclina à la fin de la 2e guerre mondiale.

C'est avec la crise pétrolière des années 70 que cet intérêt ressurgit. Ainsi plusieurs pays commencèrent à investir de l'argent pour notamment améliorer la technologie des aérogénérateurs ce qui donna naissance aux aérogénérateurs modernes. Le premier marché véritablement significatif fut celui de la Californie, entre 1980 et 1986, où l'industrie de l'énergie éolienne put se développer. Ensuite les aides financières diminuèrent aux EU mais augmentèrent en Europe. Ce qui permit un développement important de cette industrie dans des pays tels que l'Allemagne et le Danemark. Le marché mondial passa de **200MW/an** en 1990 à **5500MW/an** en 2001 et atteint plus que **12000 MW/an** en 2008.

L'Eolienne a eu une croissance moyenne annuelle de 40 o/o ces 5 dernières années. Ce développement s'est surtout exprimé en Europe, comme on peut le constater sur Le Graphe 1.14.

L'énergie éolienne est la source d'énergie qui croit le plus vite dans le monde, cette progression est énorme par rapport à d'autres types d'énergies plus traditionnelles.

Telle que l'énergie nucléaire avec une croissance de 1% ou le charbon qui n'a pas du tout augmenté dans les années 90[8].

### 1.8. Aspects économiques de l'énergie éolienne:

L'énergie éolienne réalise aujourd'hui le plus fort taux de croissance de toutes les filières énergétiques au monde. En dix ans, cette énergie a accompli une croissance moyenne de 29% par an. Elle ne représentait que 5000 MW en 1995, aujourd'hui l'électricité produite par cette filière à l'échelle mondiale dépasse les 60 000 MW.

C'est actuellement la source d'énergie la plus coté. Sur la même période, l'utilisation de charbon n'a progressé que de 2,5% /an, le nucléaire de 1,8%, le gaz de 2,5% et le fuel de 1,7%. Le tableau 1.1 donne plus de détails sur le développement des différentes sources énergétiques.

Tableau 1.2 utilisation mondiale des Sources d'énergie [9]

<b>La tendance de l'utilisation mondiale des Sources d'énergie (1995-2005)</b>	
<b>Source d'énergie</b>	<b>Taux annuel de croissance (%)</b>
Eolienne	28,6
Solaire Photovoltaïque	26,2
Géothermique	3,1
Hydroélectrique	1,6
Pétrole	1,7
Gaz Naturel	2,5
Nucléaire	1,8
Charbon	2,5

L'industrie éolienne a vraisemblablement pris son envol, grâce à la sophistication croissante des technologies éoliennes. Aujourd'hui une éolienne moderne produit, par an, 200 fois plus d'électricité que son équivalent il y a 20 ans.

Ces gains technologiques se sont traduits, en gains économiques, le coût du kW a baissé d'un rapport remarquable grâce au progrès des technologies éoliennes. L'électricité éolienne qui coûtait entre 70¢ - 80¢ (US\$) le kWh au début des années 80, coûte actuellement entre 4¢ et 6¢ le kWh, soit une baisse de l'ordre de 90% [9].

Dans certaines régions l'électricité éolienne revient moins cher que la celle produite par des sources traditionnelles.

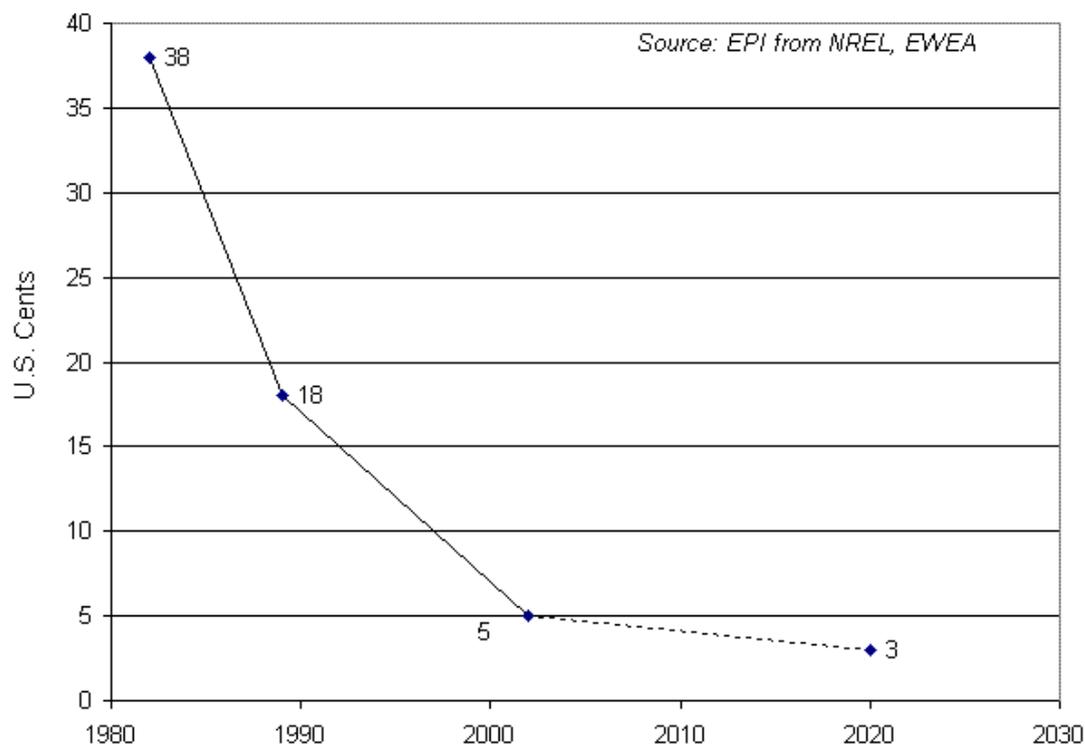


Figure 1.12 : Coût moyen du KWH éolien [9]

L'énergie éolienne offre des avantages économiques certains dans un marché énergétique mondial de plus de mille milliards de dollars par an. Puisque la stabilité des prix de l'électricité éolienne offre une sécurité énergétique, à long terme, que les sources d'énergie fossile ne peuvent pas assurer [10]. Cette énergie joue aussi un rôle positif dans le développement local grâce à l'électrification rurale et à la création de postes de travail.

Si ces coûts environnementaux et sanitaires étaient correctement intégrés à l'équation, il ne fait aucun doute que l'énergie éolienne deviendrait largement compétitive par rapport à l'utilisation des combustibles fossiles [11].

Malgré la domination de la filière éolienne par quelques pays (les trois-quarts de toute la capacité éolienne mondiale sont installés dans cinq pays seulement), l'énergie éolienne se développe très rapidement dans le reste du monde (35% en moyenne par année sur les dix années passées) [12].

Pour les petits systèmes éoliens, il est évident que les aérogénérateurs de petite puissance n'auront pas un impact majeur sur le bilan énergétique national; néanmoins ils correspondent à des besoins spécifiques (comme dans les zones isolées) et peuvent générer des impacts non négligeables localement: sur le développement, l'emploi et l'environnement [13].

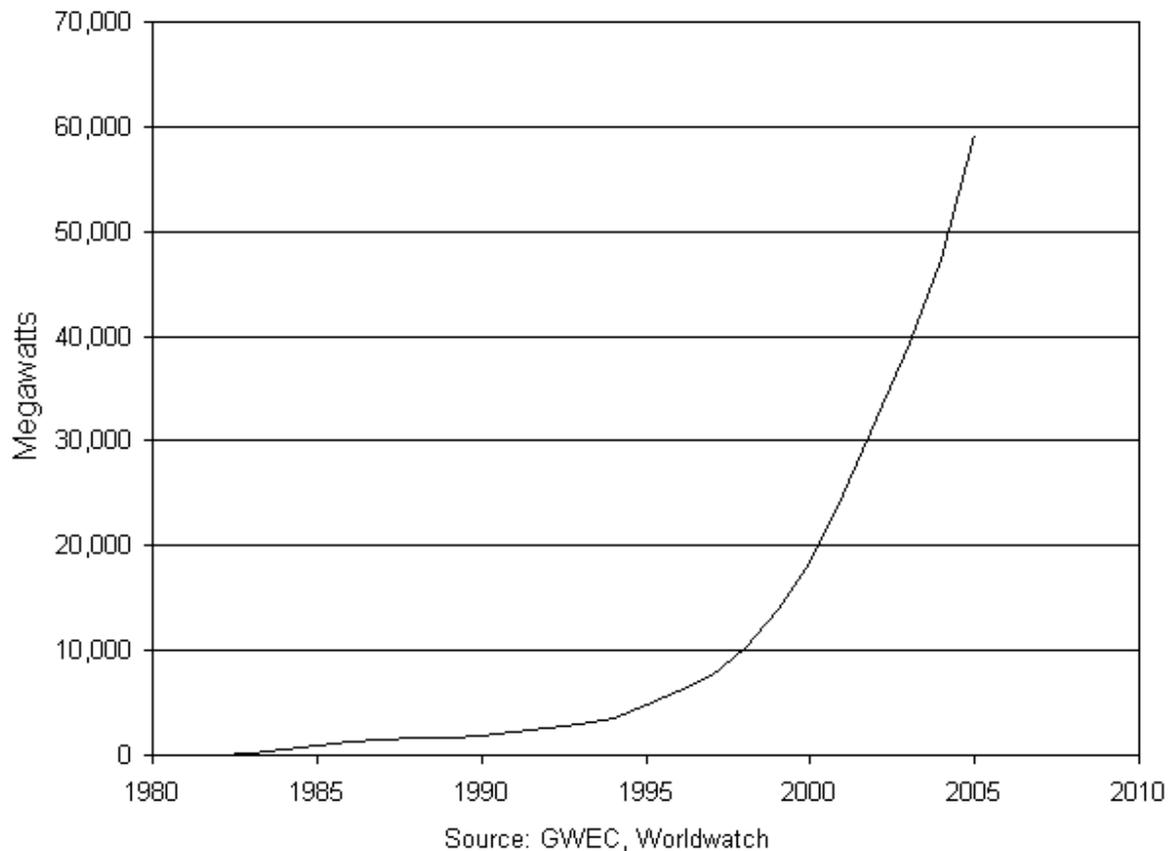


Figure I.13 : Progression de la capacité mondiale de production de l'électricité éolienne [10]

## **1.9 Situation actuelle de L'énergie éolienne dans le monde :**

La situation de l'énergie éolienne dans les différentes régions du monde peut être récapitulée comme suit :

### **1.9.1 En Europe:**

§ **L'Allemagne**, est le premier pays au monde dans ce domaine et qui possède la plus grande capacité installée (18.400 MW), et obtient maintenant 6 pour cent de son électricité de l'énergie du vent. Ce chiffre devrait passer à 20% d'ici 2020.

Selon l'Union fédérale de l'énergie éolienne (BWE), les exportations allemandes de turbines éoliennes ont augmenté de 55% en 2005 par rapport à 2004.

En Allemagne, l'éolien a permis de réduire les émissions de CO2 de 24,6 millions de tonnes.

La R&D dans le domaine de l'énergie éolienne est particulièrement développée, l'Allemagne dispose actuellement de plusieurs Centres de recherche spécialisés.

§ **L'Espagne**, occupe la deuxième place avec plus de 10.000 mégawatts de capacité, elle obtient 8 % de son électricité du vent. Au courant des dernières années, l'industrie éolienne espagnole a connu une croissance remarquable, en combinant des efforts dans le domaine de transfert technologique et achat de licence avec la recherche et développement locale. Les entreprises espagnoles Gamesa et Ecotecnia développent actuellement un grand projet de recherche industriel subventionné par le Gouvernement et dont l'objectif principal est de maintenir l'Espagne à l'avant-garde de la technologie éolienne.

Windlider 2015 est un grand projet de fabrication de nouvelles machines de grande puissance pour dominer le marché éolien à partir de 2015.

§ **Le Danemark** est classé cinquième dans le monde en matière de puissance installée (3.100 mégawatts), mais occupe la première place mondiale dans un classement relatif par rapport à sa production en énergie électrique, car 20% son besoin d'électricité est assuré par les aérogénérateurs. Le Danemark est aussi le leader mondial dans installations éoliennes offshore, avec 400 mégawatts de capacité existante.

Mondialement, plus de 900 mégawatts de puissance éolienne offshore seraient installée vers la fin de 2006, entièrement en Europe.

Grâce à une stratégie claire et efficace, le Danemark ce petit pays scandinave, est devenu aujourd'hui le géant mondial de l'industrie éolienne, occupant 60% du marché mondial.

---

Le chiffre d'affaire global danois, concernant l'industrie éolienne, est de 3 Milliards d'Euros par année. Cinq des dix plus grandes firmes mondiales, productrices de turbines éoliennes, sont danoise.

### **1.9.2 En Amérique :**

§ **Les Etats-Unis** a installé une puissance éolienne d'une capacité de 9.100 mégawatts.

L'industrie éolienne américaine a battu un record en installant en 2005 une puissance éolienne de 2.400 mégawatts comparée à 370 mégawatts installée en 2004 et 1.700 mégawatts en 2003 (voir Table 1.2). Cette augmentation inattendue est due principalement à des mesures fiscales incitatives.

§ **Au Canada** la capacité éolienne installée est de 680 mégawatts à la fin de 2005, elle est supposée augmenter à 1.200 mégawatts vers la fin de 2006. Le gouvernement fédéral de Canada vise l'installation de 4000 mégawatts d'énergie du vent vers 2010.

### **1.9.3 En Asie :**

Les pays asiatiques ont installé une puissance éolienne d'environ 7000 mégawatts pour produire de l'électricité. L'Inde avec 4400 mégawatts de capacité, est classé quatrièmes après l'Allemagne, les États-Unis, et l'Espagne. En Chine, la puissance installée actuellement est de 1260 mégawatts, et commence à se développer grâce à sa nouvelle loi sur les énergies renouvelables. Cette loi offre des incitations fiscales et des subventions à l'industrie éolienne et cible le développement de 30.000 mégawatts de puissance éolienne vers l'an 2010.

### **1.9.4 En Afrique :**

Le Maroc, la Tunisie, l'Algérie, l'Égypte, le Sénégal et la Mauritanie, étudient de près ou réalisent déjà des projets éoliens.

#### **§ L'Algérie:**

Les réalisations dans le domaine des énergies renouvelables, et particulièrement dans la filière éolienne, sont très limitées en comparaison avec l'actuelle évolution mondiale dans ce domaine, qui a atteint des objectifs très avancés.

L'utilisation de cette source d'énergie se limite aux éoliennes (aéromoteurs) installées actuellement à Adrar pour le pompage d'eau [14].

Pour les futures réalisations, un projet d'une ferme éolienne à Tindouf d'une puissance de

---

10 MW a fait récemment l'objet d'un appel d'offres. Ce projet hybride combine le diesel et l'énergie éolienne pour la production de l'électricité (dont 6 MW en éolienne et 4 MW en diesel) [15]. Trois autres projets de centrales éoliennes de 10 MW chacune seront lancés dans le sud du pays.

Ces projets s'inscrivent dans un programme de développement des énergies renouvelables, adopté par la Commission de régulation de l'électricité et du gaz (CREG).

L'objectif est de porter la part des énergies renouvelables dans le bilan électrique national à 5 ou 6 % vers l'horizon 2010-2015. Ce chiffre paraît ambitieux si l'on considère le taux actuel, qui ne représente que 0,02%, soit l'équivalent de moins de 5 GWh. Ce taux est très faible, même par rapport aux pays voisins [16].

Le recours aux énergies renouvelables est indispensable pour tout développement durable, en particulier dans le sud algérien, car la dispersion de la population dans cette région très vaste, rend le raccordement au réseau électrique très coûteux.

La consommation d'électricité en Algérie a augmenté durant les dernières années de 4% par an et la demande en électricité devrait à long terme croître de 7% par année.

La distribution de l'électricité connaît depuis quelques années de fortes perturbations à cause de l'augmentation de cette demande.

Il est évident que les hydrocarbures ne représentent pas une solution à long terme et que le potentiel de l'énergie éolienne ouvre une voie vers une solution sûre et respectueuse de l'environnement, particulièrement après que les études ont montré l'existence d'un gisement éolien important dans certaines régions du pays [17].

### **§ Le Maroc :**

Pour réduire sa dépendance énergétique, le Maroc s'est orienté entre autres vers le développement des sources d'énergies renouvelables notamment l'énergie éolienne. En effet, le Maroc, par sa situation géographique favorable, dispose d'un potentiel éolien important estimé à environ 6 000 MW [18].

Le Maroc a réalisé en collaboration avec des entreprises européennes plusieurs projets éoliens. Parmi eux le parc éolien de A.Torres près de Tétouan qui contient 84 éoliennes avec une puissance totale de 50,4 MW destinées à couvrir la consommation de 400.000 habitants [19] et le projet de Cap Sim Essaouira, dont la production est de 60 MW, qui est opérationnel depuis le début 2006.

Un autre projet à Tanger sera achevé, au courant de l'année 2007, et permettrait la production de 140 MW.

---

ONE (l'office national de l'électricité marocain) et l'entreprise espagnole Iberdrola ont signé un accord pour développer de nouvelles fermes éoliennes au Maroc [20].

Pour l'heure actuelle, c'est le Maroc qui assure la production la plus importante d'énergie éolienne en Afrique.

#### **§ La Tunisie:**

Le premier site d'éolien a été réalisé en 2000 à Sidi Daoud, au Cap Bon, avec une capacité de 8,7 mégawatts (MW). Une extension de ce site permettra selon les spécialistes d'atteindre, en 2007, la puissance de 34 MW.

La réalisation de trois nouvelles fermes éoliennes est prévue entre 2008 et 2009. Ce projet aura une capacité totale de 120 MW et permettra une économie de 134.000 Tep (tonnes équivalent pétrole), épargnant par la même, l'émission de 330.000 tonnes de gaz polluants. Suite à cette réalisation la Tunisie occupera le deuxième rang en Afrique avec une puissance totale installée de 180 MW [21].

Année	Allemagne	Espagne	U.S.A	Inde	Danemark	Autres pays
1995	1.130	140	1.612	576	637	683
1996	1.548	230	1.614	820	835	1.023
1997	2.080	512	1.611	940	1.120	1.373
1998	2.872	822	1.770	1.015	1.433	2.238
1999	4.445	1.522	2.500	1.077	1.748	2.638
2000	6.113	2.502	2.566	1.167	2.300	3.802
2001	8.754	3.337	4.275	1.407	2.417	4.740
2002	12.00	14.830	4.685	1.702	2.880	5.939
2003	14.609	6.202	6.374	2.110	3.110	7.026
2004	16.629	8.263	6.740	3.000	3.117	9.971
2005	18.428	10.027	9.149	4.430	3.122	13.928

**Tableau 1.3** Capacité de la production éolienne en électricité par pays (Mégawatts) [9]

### 1.10 Aspect écologique de l'énergie éolienne:

L'approvisionnement énergétique est sans aucun doute l'un des enjeux majeurs du 21<sup>ème</sup> siècle. En effet, les sources d'énergie actuellement utilisées présentent de grands risques environnementaux et sociaux. Le nucléaire a montré ses limites et ses dangers et l'utilisation des combustibles fossiles entraîne des changements climatiques. Seul un développement rapide des énergies renouvelables peut nous permettre de relever le défi.

À la suite de la conférence de Kyoto en décembre 1997, la majorité des pays ont décidé de réduire leurs émissions de gaz responsables de l'augmentation de l'effet de serre. Cette décision devrait aboutir à une diminution de la consommation en énergie fossile (pétrole, gaz naturel, charbon...) au profit des énergies renouvelables, dont fait partie l'éolien.

---

L'énergie éolienne, qui est devenue actuellement économiquement rentable, a aussi l'avantage d'être écologiquement très propre puisqu'un parc d'aérogénérateurs n'émet ni polluants ni gaz à effet de serre et ne génère pas de déchets. Enfin les aérogénérateurs en fin de vie peuvent être recyclés aisément et le site peut être remis à l'état naturel ou agricole sans dépenses notables.

Si l'énergie éolienne est considérée comme l'une des sources les plus propres, cette énergie comporte encore des risques mineurs sur l'environnement.

Parmi les aspects négatifs de l'énergie éolienne sur l'environnement, on peut citer [21]:

### **1.10.1 Destruction et la chute d'éléments composant l'éolienne:**

Les risques potentiels d'accident concernent, par ordre de probabilité, le bris de pales et la chute de la tour. Lors de la construction d'éoliennes, la résistance à la fatigue des matériaux ainsi que le comportement dynamique de la structure dans sa globalité sont étudiés avec soins. Les constructeurs conçoivent leurs éoliennes pour résister à des conditions météorologiques extrêmes (vents fort, rafales etc..).

Les composants soumis à des flexions répétées, comme les pales, peuvent développer des faiblesses structurelles si elles ont été mal conçues ou fabriquées.

Si la chute d'une tour est tout à fait rare, la rupture de pales est statistiquement plus importante. Ce fut notamment le cas avec les premières machines installées au début des années 80 équipées de pales métalliques. La mauvaise tenue à la fatigue du métal pouvait engendrer des fissures. Les pales sont aujourd'hui fabriquées en majorité avec des matériaux composites qui ont l'avantage d'être légers et extrêmement résistants.

Malgré ces précautions, il peut arriver qu'une pale soit endommagée ce qui déclenche les systèmes automatiques d'arrêt d'urgence de la machine. Le cas d'un bris de pale et de projection de morceaux reste extrêmement limité selon les statistiques européennes.

### **1.10.2 Le bruit :**

La nuisance causée par le bruit de la turbine est l'une des limitations principales de placer un site éolien près des régions habitées.

C'est en Europe, où la densité de population est forte, qu'est née cette préoccupation. Les fabricants ont maintenant considérablement réduit cette nuisance potentielle en améliorant l'aérodynamisme et en trouvant des moyens pour réduire le bruit des engrenages dans la nacelle.

---

Le niveau acceptable des émissions de bruit dépend fortement de la réglementation locale.

L'une des réglementations les plus strictes en la matière est celle de la Hollande où le niveau maximal toléré à côté des résidences est de 40 dB.

En Europe la distance typique entre l'aérogénérateur et la maison la plus proche est de 150 à 200 mètres.

### **1.10.3 Risque pour les oiseaux:**

Des études scientifiques ont démontré que la plupart des oiseaux identifient et évitent l'hélice qui tourne. Les aigles, et probablement d'autres oiseaux de proie, semblent moins vigilants lorsqu'ils chassent et certains ont été frappés par les pales en mouvement. Enfin, les oiseaux affectionnent se poser sur les structures métalliques, comme les mâts en treillis. Ces derniers ne sont plus utilisés que pour les petites éoliennes domestiques.

Les grandes tours blanches cylindriques empêchent les oiseaux de s'y installer et les éoliennes modernes comportent ainsi beaucoup moins de risques pour eux.

Il est néanmoins essentiel de s'assurer que le lieu d'un projet d'implantation d'éoliennes ne se situe pas dans un couloir de migration d'oiseaux, ni à proximité d'un site de reproduction.

### **1.10.4 Impact visuel:**

C'est la critique la plus fréquemment rencontrée. Il est vrai qu'avec ses 60 mètres de haut, une éolienne est facilement visible, d'autant plus que les parcs se situent en général sur des crêtes ou des sommets de colline.

La couleur blanche peut apparaître comme un choix peu judicieux mais c'est cependant celle qui se remarque le moins lorsque les éoliennes sont vues en contre-plongée avec le ciel en arrière-plan. Impossible à éliminer, l'impact visuel peut cependant être minimisé par des efforts de design des éoliennes et par le respect de certaines règles comme l'enfouissement des lignes à haute tension et l'utilisation de tour tubulaire plutôt qu'en treillis (type pylône électrique à haute tension) [22].

---

## **1.11. Conclusion:**

La filière éolienne est probablement la plus grande réussite parmi les technologies renouvelables, puisque ses coûts sont devenus aujourd'hui compétitifs avec d'autres filières traditionnelles.

Grâce aux améliorations technologiques qui ont permis les réductions des coûts, cette filière occupe actuellement une part de plus en plus importante dans le bilan énergétique de nombreux pays, et elle représente aujourd'hui une production mondiale de 60 000 MW.

Cette source d'énergie a aussi l'avantage d'être écologiquement très propre puisqu'un parc d'aérogénérateurs n'émet ni polluants ni gaz à effet de serre et qu'il ne génère pas de déchets et ne comporte que des risques mineurs sur l'environnement.

En Algérie, les réalisations dans le domaine de l'énergie éolienne sont très limitées en comparaison avec l'actuelle évolution mondiale dans ce domaine, qui a atteint des objectifs très avancés. La part des énergies renouvelable dans le bilan énergétique national est très faible, puisque elle ne représente que 0,02 % de la consommation nationale d'électricité.

## **I.12-Le vent :**

### **I.12.1 Origine du vent :**

Le vent est défini comme étant de l'air en mouvement, dû aux variations de pression et de température de l'atmosphère en divers points de la surface du globe. Le rayonnement solaire est uniforme, mais près du pôle, il se répartit sur une plus grande surface qu'à l'équateur, la composition des couches d'air et le degré d'absorption et de réémission des sols et des mers sont différents, il en résulte des zones de basses pressions (ou dépression), où l'air plus chaud, est moins dense, et des zones de hautes pressions (où anticyclones), où l'air est plus froid, donc plus dense. Pour revenir à une position d'équilibre, un déplacement d'air doit s'opérer des régions de hautes pressions vers les régions de basses pressions, plus ces différences de pressions sont importantes, plus le courant d'air compensateur (le vent) est fort.

Du fait de la rotation de la Terre sur elle-même, la direction du vent est alors modifiée, elle devient parallèle aux isobares au lieu de leurs être perpendiculaire. Dans l'hémisphère Nord, le vent tourne dans le sens trigonométrique autour des aires cycloniques et dans le sens des aiguilles d'une montre autour des aires anticycloniques. L'existence de cette force déviante a été mise en évidence par le mathématicien français Gaspard Gustave CORIOLIS (1792 – 1843).

---

Dans l'hémisphère Sud, les sens sont inversés par rapport au Nord. Cependant, les différents phénomènes agissant sur le globe terrestre engendrent des zones à hautes pressions permanentes d'où l'air arrive (les zones polaires et péri-tropicales Nord et Sud) et de zones à basse pressions permanentes (zones équatoriale et zones arctique et antarctique) où règne un calme relatif vers lesquelles se dirigent les vents [23]

Comme on peut le voir sur la figure 1.17, la Terre est entourée d'anneaux de surpressions et de dépressions (sept en tout) : Aux deux pôles règne un régime de vents dirigés de l'intérieur vers la côte. Au-delà des cercles polaires les vents dominants sont de l'Est. Dans les zones tempérées entre 30° et 60° de latitude soufflent les grandes brises d'Ouest (Sud Ouest dans l'hémisphère Nord et Nord-Ouest dans l'hémisphère Sud).

Enfin la région tropicale de part et d'autre de l'équateur est divisée par la zone des calmes et des basses pressions équatoriales.

Ces mouvements circulaires autour des dépressions et des anticyclones ne sont réellement observés qu'en altitude. Au niveau du sol, les forces de frottement, le relief et les obstacles éventuels (immeubles, arbres, etc.) perturbent les trajectoires du vent, ils se transforment en spirales qui ont tendance à faire dévier l'air des anticyclones vers l'extérieur et à le faire rentrer dans les dépressions [23].

### **I.12.2 Vitesse du vent:**

La vitesse du vent peut s'exprimer en mètres par seconde, en kilomètres par heure, en miles<sup>1</sup> par heure, en noeuds<sup>2</sup> (miles marins par heure) ou en degrés Beaufort qui est une échelle établie en fonction des influences physiques que le vent peut engendrer sur l'entourage.

On remarque que la vitesse du vent peut avoir des valeurs importantes et des conséquences néfastes sur les habitations et l'entourage.

Les vitesses maximales les plus élevées se rencontrent dans les cyclones tropicaux (des vitesses de 150 à 200 km/h ne sont pas exceptionnelles) [23]

### I.13- Les ressources éoliennes de l'Algérie:

L'Algérie est l'un des pays qui se distinguent par les importantes sources d'énergie fossile dont il dispose, permettant la production de l'électricité à des coûts très compétitifs. Dans de telles conditions il semble que l'énergie éolienne ne pourrait pas présenter une option compétitive à court terme pour la production commerciale de l'électricité à grande échelle à moins de considérer les coûts environnementaux [24].

Par ailleurs, l'étude de la rentabilité des systèmes éoliens est étroitement liée à la source elle-même, à savoir, le vent. En ce qui concerne l'Algérie, la ressource éolienne varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et un climat

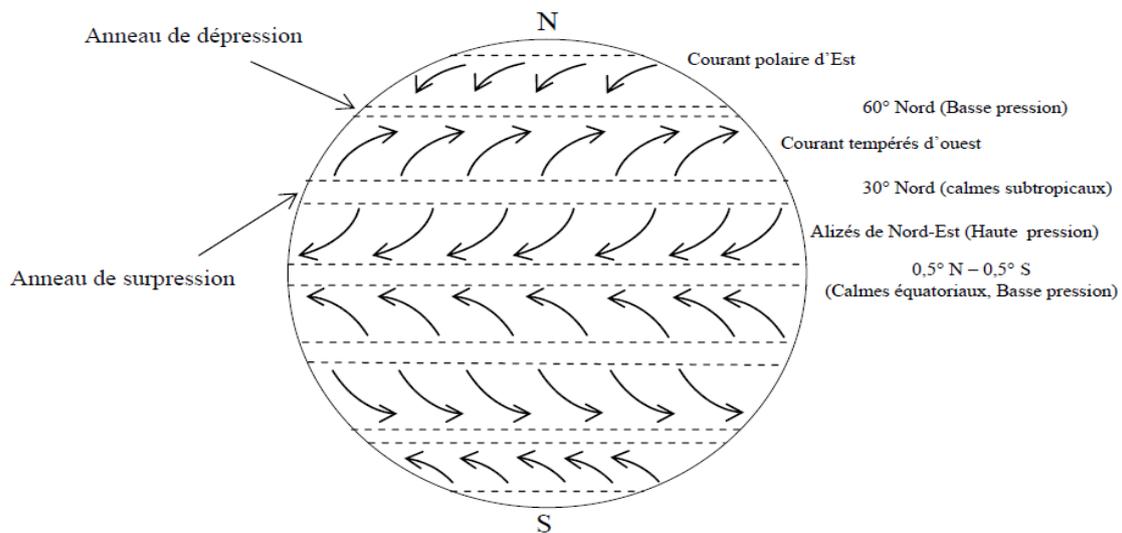


Figure I.14. Directions des vents autour de la Terre [23].

très diversifiés. En effet, notre vaste pays, se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes. Le Nord méditerranéen est caractérisé par un littoral de 1200 km et un relief montagneux, représenté par les deux chaînes de l'Atlas Tellien et l'Atlas Saharien. Entre elles, s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Le Sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien.

**Tableau I.4. Effets du vent en fonction de sa vitesse (Echelle de beaufort) [23].**

Degrés Beaufort	Vitesse (km/h)	Nature du vent	Effet en mer	Effet à terre
0 – 1	0 à 5	Calme	Calme	La fumée s'élève verticalement
2	6 à 11	Légère brise	Vaguelette ne déferlant pas	Perception du souffle du vent sur le visage
3	12 à 19	Petite brise	Les moutons apparaissent	Feuilles agitées
4	20 à 28	Jolie brise	Petites vagues, nombreux moutons	Poussières et papiers soulevés
5	29 à 38	Bonne brise	Vagues modérées, moutons, embruns	Arbustes se balances
6	39 à 49	Vent frais	Grandes vagues, crêtes d'écumes, embruns	Fils électriques qui bougent, usage des parapluies difficile
7 – 8	50 à 74	Grand frais	Lames déferlantes, traînées d'écume	Arbres agités, peine à marcher contre le vent, branches brisées
9	75 à 88	Fort coup de vent	Lame déferlantes, grosse à énorme, les embruns réduisent la visibilité	Légers dégâts aux constructions
10	89 à 102	Tempête	Très hautes vagues déferlantes surface de l'eau toute blanche visibilité très faible	Les arbres sont déracinés, graves dégâts aux constructions
11	103 à 117	Violente tempête		Ravages étendus
12	118 à 133	Ouragan		
13 - 17	134 et plus	Cyclone		

### **I.13.1 Estimation des ressources éoliennes:**

Une étude préliminaire de l'évolution saisonnière et annuelle de la vitesse moyenne du vent a permis de faire une première identification des régions ventées de l'Algérie.

Cette représentation de la vitesse sous forme de carte, à deux objectifs:

- Le premier est d'identifier les vastes régions avec de bonnes promesses d'exploitation de l'énergie éolienne.
- Le second est de mettre en évidence la variation relative des ressources à travers l'Algérie.

La carte des vents de l'Algérie, estimée à 10 m du sol est présentée en figure I.15. Les vitesses moyennes annuelles obtenues varient de 2 à 6.5 m/s. On remarque qu'à l'exception de la région côtière (moins Bejaia et Oran), du Tassili et de Béni Abbés, la vitesse de vent moyenne est supérieure à 3 m/s, [24].

En fait, la région centrale de l'Algérie est caractérisée par des vitesses de vent variant de 3 à 4 m/s, et augmente au fur et à mesure que l'on descend vers le sud-ouest. Le maximum est obtenu pour la région d'Adrar avec une valeur moyenne de 6.5 m/s.

Cependant, nous pouvons observer l'existence de plusieurs microclimats où la vitesse excède les 5 m/s comme dans les régions de Tiaret, Tindouf et Oran.

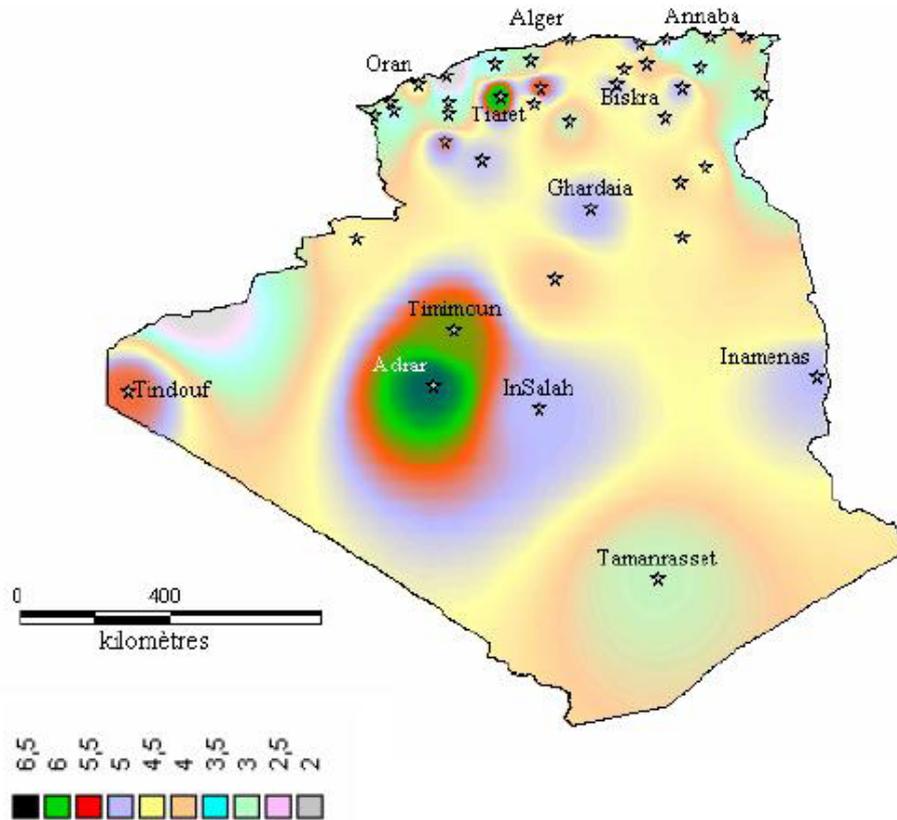


Figure I.15 : La vitesse moyenne du vent en Algérie estimée à 10 m du sol [24]

### I.13.2 atlas de la vitesse moyenne saisonnière du vent:

En utilisant la même gamme de couleurs, les atlas vents saisonniers de l'Algérie sont représentés en figures I.16 (Eté et Printemps) et I.20 (Hiver et Automne). On remarque qu'en général, les périodes estivales et printanières sont plus ventées que le reste de l'année, [24].

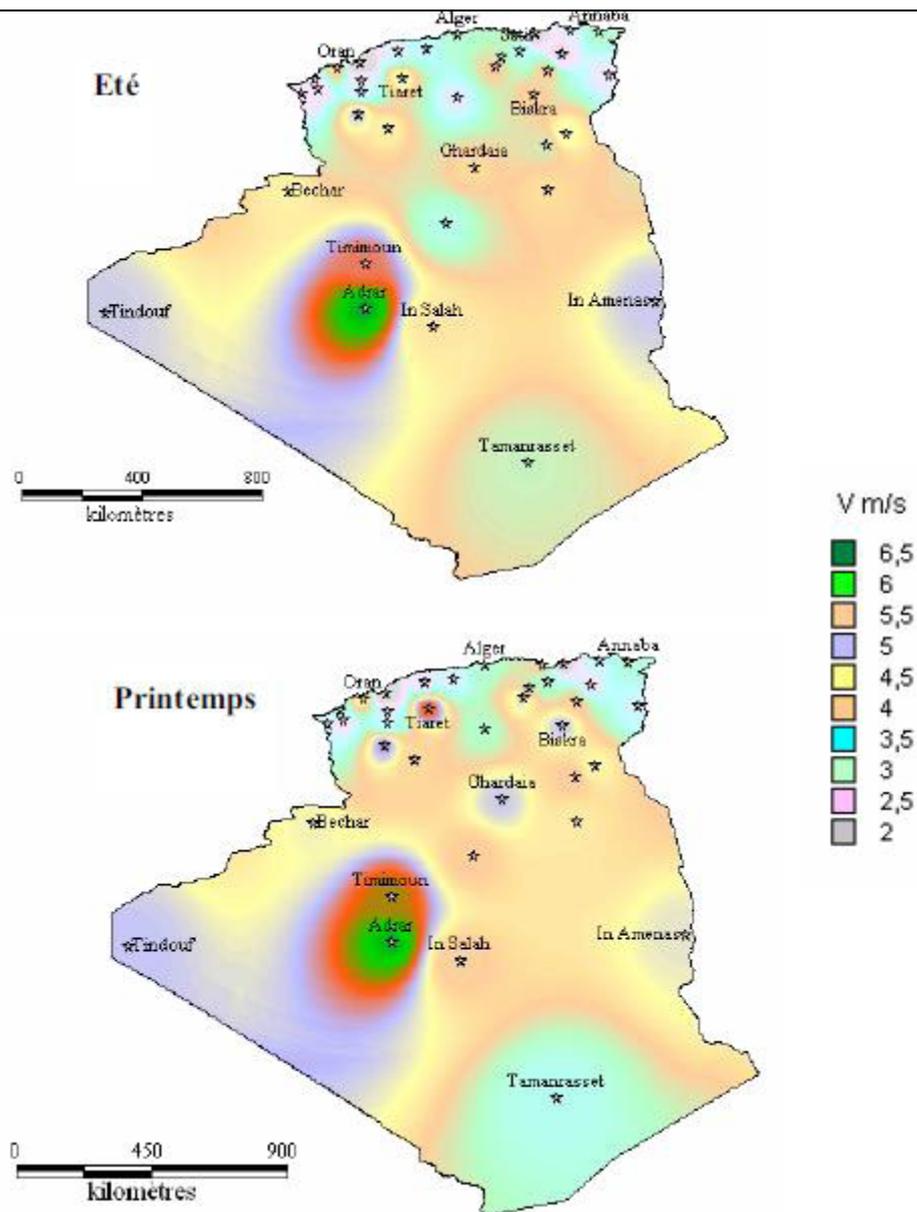


Figure 1.16 : Atlas saisonniers de la vitesse moyenne du vent annuelle à 10 m du sol [24]

Tous les atlas établis présentent la région sud ouest, à savoir Adrar, Timimoune et In-Salah comme la zone les plus ventée, à l'exception de l'atlas hivernal qui se distingue par le microclimat de Tiaret qui présente les vitesses de vent les plus élevées [24].

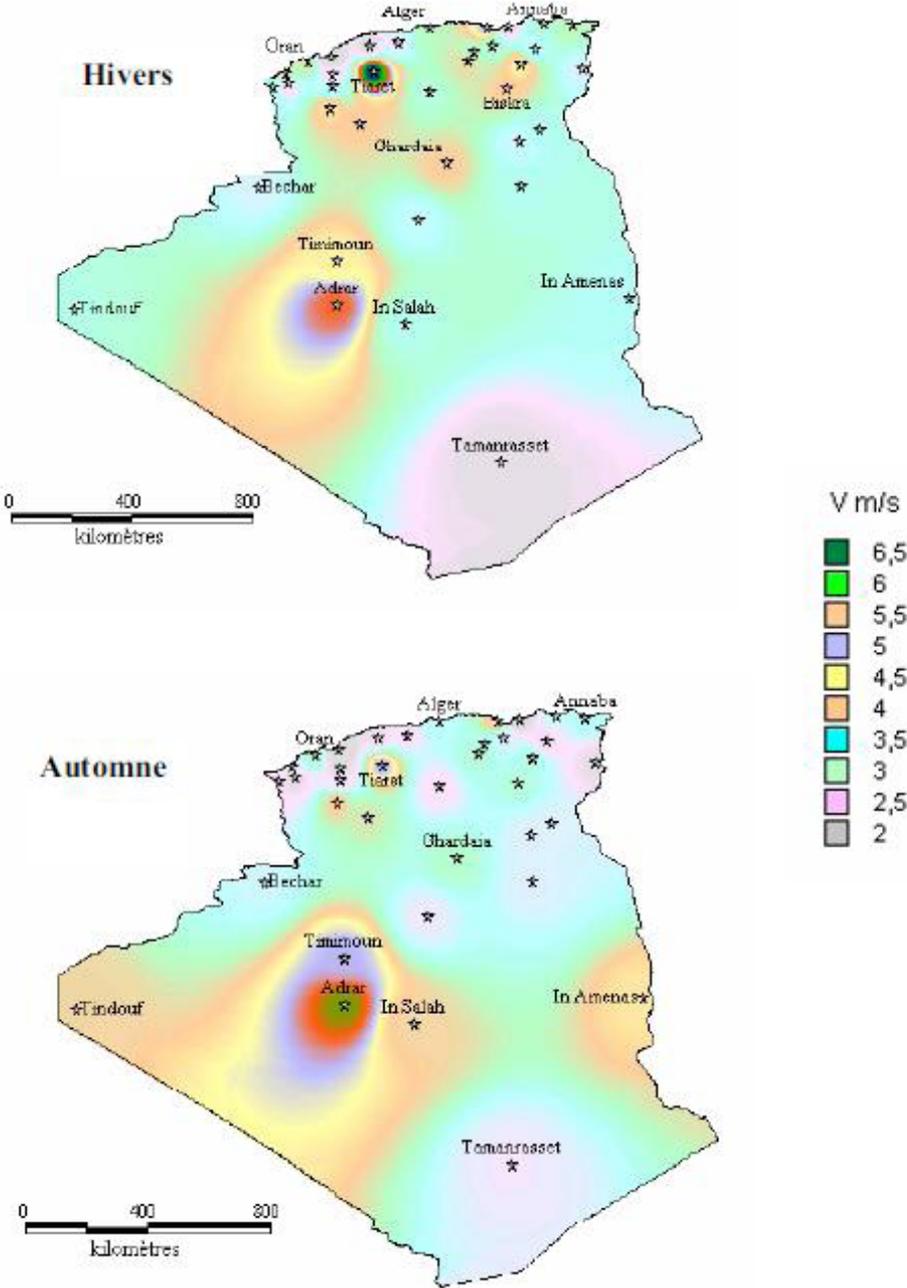


Figure 1.17 : Atlas saisonniers de la vitesse moyenne annuelle du vent à 10 m du sol. (Hiver et automne)[24].

N°	Nom	Longitude (deg)	Latitude (deg)	Rugosité (m)	V (m/s)
1	Adrar *	0.28	27.82	0.01	5.9
2	Alger	3.25	36.72	0.01	3.2
3	Annaba *	7.82	36.82	0.01	2.4
4	Batna *	6.18	35.55	0.01	4.2
5	Béchar *	-2.23	31.62	0.03	3.6
6	Béjaia *	5.6	36.72	0.03	4.2
7	Beni Abbès	-2.10	30.08	/	1.7
8	Ben Saf *	-1.35	35.3	0.02	2.8
9	Biskra *	5.73	34.8	0.02	4.1
10	Bordj Bou Arreridj	4.67	36.07	0.01	3.4
11	Chlef	1.33	36.10	0.01	2.8
12	Constantine	6.62	36.10	0.01	2.6
13	Djanet	9.28	24.33	/	2.3
14	Djelfa	3.25	34.68	0.08	2.7
15	El Bayadh	1.00	33.67	0.01	3.9
16	El Goléa	2.87	30.57	/	3.0
17	El Kheiter *	4.70	34.15	0.08	4.6
18	El Oued	6.78	33.50	0.01	3.7
19	Ghardaia *	3.80	32.40	0.03	4.6
20	Guelma	7.43	36.47	/	1.8
21	Hassi Messaoud *	6.15	31.67	0.00	4.1
22	In Amenas	9.63	28.05	/	4.3
23	In Oussera	2.52	35.55	0.08	3.0
24	In Salah	2.47	27.20	/	4.4
25	In Sefra	-0.60	32.75	/	3.0
26	Ksar El Chellala	2.32	35.17	0.08	3.4
27	Maghnia *	-1.78	34.82	0.01	2.7
28	Mascara	0.15	35.22	0.05	2.4
29	Mechria	-0.27	33.55	/	3.8
30	Miliana	2.23	36.30	0.5	2.6
31	Mostaganem *	0.12	35.83	0.01	1.0
32	M Sila *	4.50	35.67	0.03	4.1
33	Oran	-0.62	35.63	0.01	4.1
34	Oum El Bouaghi	7.11	35.87	/	2.1
35	Saida *	0.15	34.87	0.01	2.6
36	Sétif	5.25	36.18	0.01	3.1
37	Skikda	6.90	36.88	0.01	2.9
38	Tamanrasset *	5.52	22.78	0.10	2.9
39	Tébessa	8.12	35.42	0.03	2.8
40	Tiaret	1.47	35.37	0.02	4.7
41	Timimoun *	0.28	29.25	0.01	5.1
42	Tindouf *	-8.10	27.67	0.00	4.6
43	Tlemcen	-1.28	34.95	0.01	2.3
44	Touggourt *	6.13	33.12	0.04	3.3

Tableau I.5: Carte des Vents de l'Algérie (Caractéristiques des sites et stations)

\* Stations dont les vitesses de vent ont été publiées  
dans l'Atlas Vent produit par l'O.N.M. [25]

---

### **I.14. Atlas préliminaire du vent à 10 mètres:**

Les vitesses moyennes annuelles du vent estimées à une altitude de 10 mètres au-dessus du sol. Les vitesses obtenues à l'aide de l'interpolation varient de 1 à 6 m/s.

Si on veut définir des classes, suivant leur importance on distingue quatre classes, à savoir:

- $V < 3.0$  m/s classe 1
- $3.0 < V < 4.0$  m/s classe 2
- $4.0 < V < 5.0$  m/s classe 3
- $5.0 < V$  classe 4

On remarque que la majorité du territoire se trouve classé dans la gamme de vitesses allant de 3 à 4 m/s, (région des Hauts Plateaux et le Sahara). Les vitesses du vent augmentent et sont maximales dans les régions situées au centre du grand Sahara (Adrar, In Salah et Timimoune).

On distingue plusieurs microclimats, à savoir autour d'Oran, Tiaret, In Amenas, ainsi que les environs de

Biskra, où les vitesses de vent enregistrées sont supérieures 4 m/s.

Enfin, la côte Ouest de la méditerranéenne, le Hoggar, ainsi que la région de Béni Abbés présentent les vitesses moyennes annuelles les plus faibles ( $< 3$  m/s).

### **I.15. Potentiel utile:**

Au vu de la carte des vents données Figure I.18 les sites susceptibles d'être exploités à des fins énergétiques, sont rares. En effet, bien que cela varie en fonction des types d'éoliennes, il faut un minimum de vent pour que cette dernière se mette à tourner.

La vitesse d'amorçage se situe généralement autour de 4.5 m/s. Toutefois, les éoliennes sont généralement installées à des hauteurs supérieures ou égales à 25 mètres du sol. C'est pour cela qu'une étude permettant la détermination de la carte des vents de l'Algérie à 25 mètres a été établie.

### **I.16. Atlas préliminaire du vent à 25 mètres:**

Les vitesses du vent, dont la rugosité du lieu est disponible, ont été extrapolées de la hauteur de 10 mètres à une altitude de 25 mètres, en utilisant la méthodologie présentée.

Après interpolation, à l'aide du Logiciel Surfer, les vitesses du vent obtenues, varient 1.5 et 7 m/s. En figure I.18, est représentée la carte des vents de l'Algérie à 25 mètres du sol.

La prédominance de la quatrième classe, ( $V \Rightarrow 5$  m/s), telle que définie précédemment se voit nettement sur la figure.

On remarque au centre du Sahara de l'Algérie une ellipse entourant les sites d'Adrar, In Salah et Timimoune, où les vitesses enregistrées sont supérieures ou égales à 6 m/s. Cette ellipse est entourée par une large bande, qui domine le territoire, englobant l'essentiel du sud du pays et en particulier les régions de Ghardaïa, Biskra et Tindouf. Par ailleurs, on distingue un couloir présentant des vitesses variant de 4 à 5 m/s, allant de Tamanrasset jusqu'à Béchar en passant par la côte d'Alger. Enfin, on remarque, un micro climat, où la vitesse est supérieure à 5 m/s, autour de la région de Tiaret et s'étirant jusqu'à Ténès.

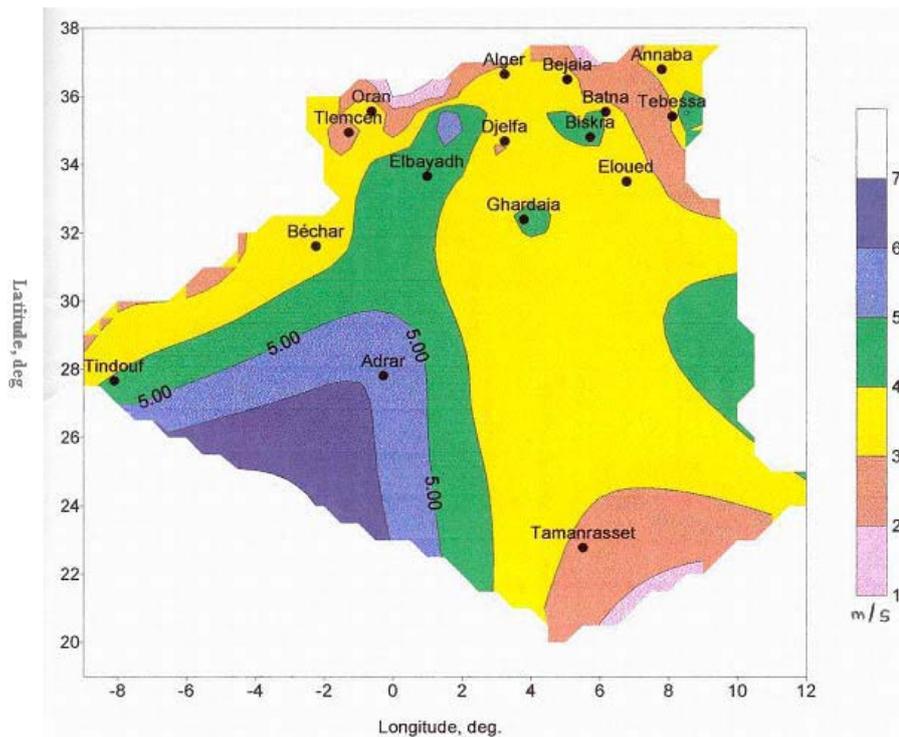


Figure I.18 : Tracé de la carte des vents à 25 mètres d'altitude

---

**I.17.Potentiel utile:**

Au vu de la carte des vents, tracée à l'altitude de 25 mètres du sol, il est clair que les possibilités d'utilisation du vent à des fins énergétiques deviennent prometteuses.

En effet, plus de 80 % du territoire national bénéficie d'une vitesse du vent supérieure ou égale à 4 m/s, vitesse moyenne à partir de laquelle une éolienne démarre. Toutefois ceci reste valable pour de petites applications nécessitant de faibles puissances.

La région d'Adrar offre bien sûr de plus grandes possibilités.

En conclusion, les cartes de la vitesse du vent établies, permettent l'identification des régions prometteuses en matière d'énergie éolienne.

Pour qu'un site soit jugé exploitable avec une petite éolienne, il faut disposer au minimum d'une vitesse de l'ordre de 6 m/s.

En Algérie, il est clair que ceci devient possible, lorsque les éoliennes sont installées à des altitudes supérieures ou égales à 25 mètres.

Toutefois, une fois les zones ventées identifiées, il est nécessaire de procéder à des études plus détaillées, telles que la détermination des évolutions journalières, mensuelles et saisonnières.

Par ailleurs, étant donné que généralement les différentes mesures prélevées, se font à 10 mètres du sol et que les formules empiriques d'extrapolations ont été établies pour des climats différents du notre, une étude expérimentale détaillée, doit être établie pour la correction de ces dernières.

## I.18. Les unités de mesure du Vent

Vitesse à 10 m d'hauteur			Echelle de Beaufort	Nature du vent
m/s	km/h	nœud		
0 à 0,4	0 à 1,4	0 à 0,9	0	calme
0,4 à 1,8	1,4 à 6,5	0,9 à 3,5	1	
1,8 à 3,6	6,5 à 13	3,5 à 7	2	léger
3,6 à 5,8	13 à 21	7 à 11	3	
5,8 à 8,5	21 à 31	11 à 17	4	modéré
8,5 à 11	31 à 40	17 à 22	5	frais
11 à 14	40 à 50	22 à 28	6	fort
14 à 17	50 à 61	28 à 34	7	
17 à 21	61 à 76	34 à 41	8	tempête
21 à 25	76 à 90	41 à 48	9	
25 à 29	90 à 104	48 à 56	10	tourmente
29 à 34	104 à 122	56 à 65	11	
> 34	> 122	> 65	12	ouragan

Tableau I.6: Les unités de mesure du Vent

# CHAPITRE II

---

*ETUDE D'UNE EOLIENNE A AXE  
HORIZONTAL*

---

## II. Introduction:

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



Figure II-1: Sous-ensembles fonctionnels

Le rotor, (plus exactement les pales) est l'organe le plus important dans la capture de l'énergie du vent. On s'est toujours mis à bien étudier et même modéliser tous les phénomènes liés à l'écoulement de l'air à travers le rotor. Cela conduit à des concepts, très complexe parfois, mais qui mènent vers une optimisation en terme de rendement en puissance, en couple et en poussée. Donc, l'aérodynamique des pâles demeure une partie très importante dans la conception éolienne rajoutée au dimensionnement des pâles et l'étude de la dynamique des structures des matériaux utilisés dans l'industrie éolienne. Notre travail se focalisera, alors, sur l'étude du multiplicateur en vue d'optimiser sa vitesse de sortie vers le générateur pour améliorer le rendement de l'éolienne en productivité électrique.

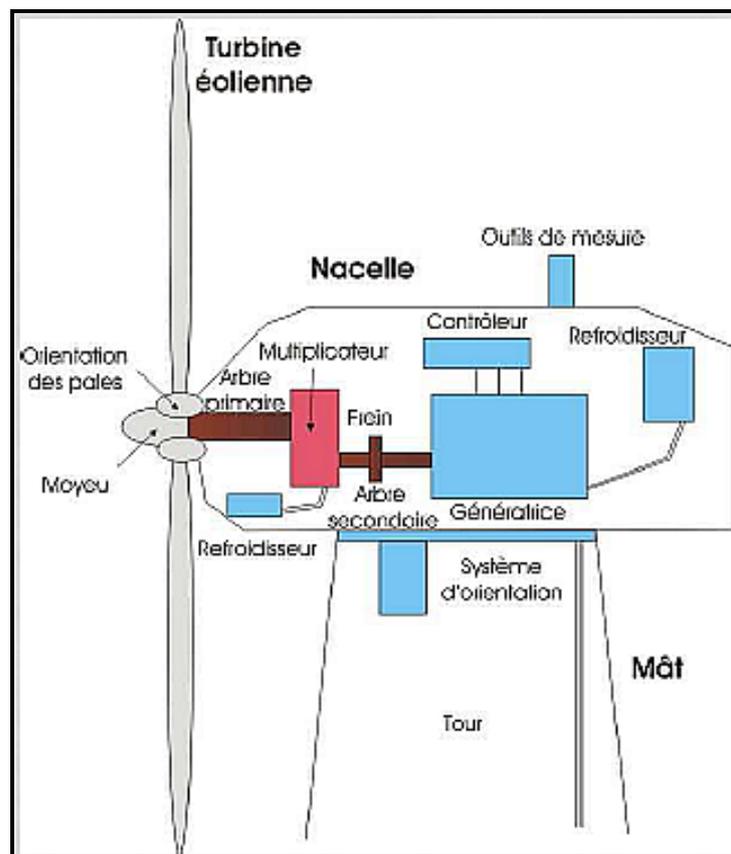
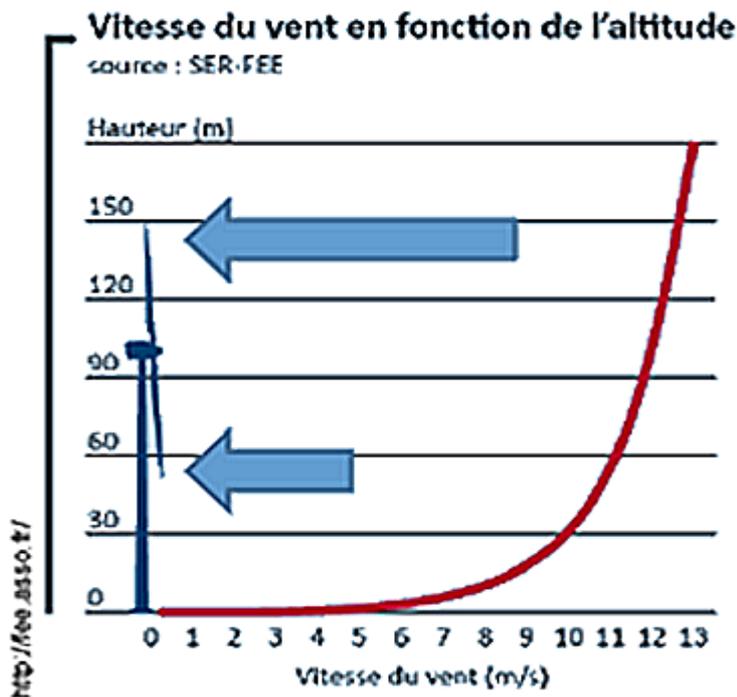


Figure II-2: Schéma de principe d'un aéromoteur

## II.1. Notions générales de l'aérodynamique:

Nous avons vu, précédemment (chapitre I), que le rotor muni de pales montées sur le moyeu, est placé en amont de la nacelle et même de la tour c'est-à-dire qu'on assiste à une configuration face au vent, et cela est dans le but d'isoler la zone de turbulence et d'écoulement irrégulier qui se crée derrière la tour (à cause de l'effet d'obstacle).



- Contraintes plus élevées en haut qu'en bas du rotor
- Meilleures répartitions des contraintes avec trois pales que les mono ou bipales.

Tableau II-1: Vitesse du vent en fonction de l'altitude

## II .2. Théorie de Betz:

La théorie globale du moteur éolien à axe horizontal a été établie par Betz

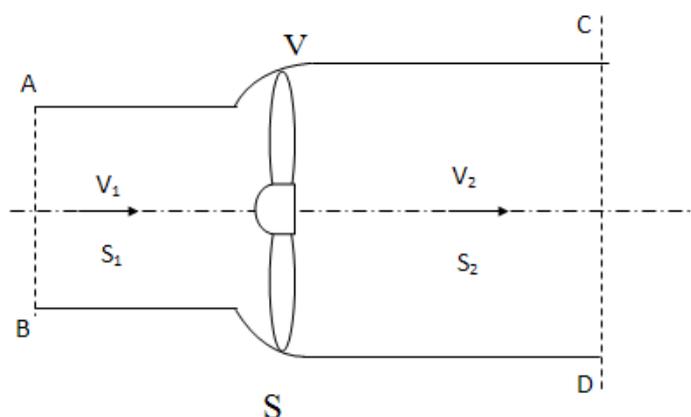


Figure II-3: Configuration de Betz pour un moteur éolien.

Betz suppose que le moteur éolien est placé dans un air animé à l'infini en amont d'une vitesse  $V_1$  et à l'infini en aval d'une vitesse  $V_2$  [26].

La production d'énergie ne pouvant se faire qu'au préjudice de l'énergie cinétique de l'air, la vitesse  $V_2$  est nécessairement inférieure à  $V_1$ . Il en résulte que la veine fluide traverse le moteur éolien en s'élargissant voir figure II.1 [27].

- $V_1$ : vitesse du vent à l'entrée de l'éolienne (en amont du disque)
- $V_2$ : vitesse du vent après prélèvement de l'énergie par l'éolienne (en aval du disque)
- $V$  : La vitesse du vent à la traversée de l'éolienne. (au niveau de l'éolienne)
- $S_1$ : section en amont.
- $S_2$ : sections en aval [27].

La production d'énergie ne pouvant se faire qu'au préjudice de l'énergie cinétique contenu dans le vent.

Pour déterminer les variations à travers le disque on applique les lois suivantes :

- Loi de conservation de la masse.
- Loi de variation de la quantité de mouvement.
- Loi de variation d'énergie cinétique.

L'incompressibilité de l'air et la permanence d'écoulement (Loi de conservation de la masse) donne:

$$S_1 V_1 = S V = S_2 V_2 \quad [14] \text{ (III.1)}$$

### II.2.1. Définition de l'action du moteur éolien sur l'air:

D'après le théorème d'Euler la force exercée par le moteur éolien sur l'air en mouvement  $F$  est dirigée vers l'avant et égale en valeur absolue à la variation de la quantité de mouvement (Loi de variation de la quantité de mouvement) [28]:

$$F = \Delta Q_m / \Delta t \quad \text{(III.2)}$$

Avec  $\Delta Q_m$  : variation de quantité de mouvement

$$\Delta Q_m = mV_1 - mV_2 \quad \text{(III.3)}$$

$$F = \Delta Q_m = mV_1 - mV_2 = m (V_1 - V_2) \quad \text{(III.4)}$$

$$F = \rho S V (V_1 - V_2) \quad \text{(III.6)}$$

Évaluons la puissance absorbée par l'éolienne, c'est-à-dire dû à la force  $F$ :

$$P = F V = \rho S V (V_1 - V_2) V \quad \text{(III.7)}$$

$$P = \rho S V^2 (V_1 - V_2)$$

## II.2.2 Définition de la vitesse au niveau du moteur éolien:

D'après la loi de conservation de l'énergie, la variation de l'énergie cinétique de la masse autour du système est [28]:

$$E_{C1} = E_C + E_{C2}$$

$E_{C1}$ : Énergie cinétique à l'amant.

$E_C$ : Énergie cinétique transformée.

$E_{C2}$ : Énergie cinétique à l'aval.

$$P = E_{C1} - E_{C2} = \frac{1}{2}mV_1^2 - \frac{1}{2}mV_2^2 \quad (\text{III.10})$$

$$m = \rho SV \quad (\text{III.11})$$

$$P = \frac{1}{2}\rho SV(V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{III.12})$$

Par égalisation de (III.7) et (III.12) on obtient :

$$\rho SVV^2(V_1 - V_2) = \frac{1}{2}\rho SV(V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{III.13})$$

$$\rho SVV^2(V_1 - V_2) = \frac{1}{2}\rho SV(V_1 + V_2)(V_1 - V_2) \quad (\text{III.14})$$

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (\text{III.15})$$

Remplaçant l'équation trouvée dans les équations (III.6) et (III.7) :

$$F = \frac{1}{2}\rho S(V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{III.16})$$

$$P = \frac{1}{4}\rho S(V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{III.17})$$

### II.3. La puissance maximale absorbée par le moteur éolien:

Étudions la variation de la puissance absorbée par le moteur éolien (équation III.17), on suppose que la vitesse  $V_1$  du vent en amont est constante, et on dérive par rapport à  $V_2$

$$\frac{dP}{dV_2} = \frac{1}{4} \rho S [V_1^2 - 2V_1V_2 - 3V_2^2] \quad (\text{III.18})$$

Le maximum de la fonction P correspond à la condition suivante :

$$\frac{dP}{dV_2} = 0 \Rightarrow V_1^2 - 2V_1V_2 - 3V_2^2 = 0 \quad (\text{III.19})$$

Équation de 2ème degrés admettant deux solutions qui sont :

$V_2 = -V_1$  qui n'a aucun sens physique, donc la solution acceptable est :

$$V_2 = \frac{V_1}{3}$$

Rapportant cette valeur dans l'équation (III.17), on obtient :

$$P_{max} = \frac{1}{4} \rho S \left( V_1 + \frac{V_1}{3} \right) \left( V^2 - \left( \frac{V_1}{3} \right)^2 \right) \quad (\text{III.20})$$

$$P_{max} = \frac{8}{27} \rho S V_1^3 \quad (\text{III.21})$$

$$V_{max} = \frac{V_1 + \frac{V_1}{3}}{2} = \frac{4V_1}{3 \cdot 2} = \frac{2V_1}{3} \quad (\text{III.22})$$

De l'équation (III.1) on à  $S_1 V_1 = S V = S_2 V_2 \quad (\text{III.23})$

$$S V_{max} = S \frac{2V_1}{3} = S_1 V_1 \Rightarrow S_1 = \frac{2}{3} S \text{ et } S = \frac{3}{2} S_1 \quad (\text{III.24})$$

Injectant l'équation (III.24) dans l'équation (III.21), la puissance maximale devient :

$$P_{max} = \frac{16}{27} \left( \frac{1}{2} \rho \frac{3}{2} S_1 V_1^3 \right) \quad (\text{III.25})$$

$$P_{max} = \frac{8}{9} \left( \frac{1}{2} \rho S_1 V_1^3 \right) \quad (\text{III.26})$$

Sous cette forme, la formule de *Betz* montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un moteur éolien ne peut dépasser en aucun cas les 8/9 de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse.

#### II.4. Limite de Betz :

En réalité, le profil des pales de l'éolienne ne peut pas récupérer la totalité de l'énergie cinétique du vent. Chaque pale possède donc ce que l'on appelle un coefficient d'échange de puissance  $C_p$  qui dépend du profil ainsi que de l'inclinaison de la pale.

La valeur de la puissance mécanique récupérable par les pales de l'éolienne est déduite par la relation suivante:

$$P = \frac{1}{2} C_p \cdot \rho \cdot S \cdot V^3$$

Le coefficient de puissance  $C_p$  est défini comme étant le rapport entre la puissance disponible du vent et la puissance extraite [4]:

Avec :

- $C_p$  : coefficient d'échange de puissance
- $\rho$  : masse volumique de l'air 1,225 kg/m<sup>3</sup>
- $S$  : surface balayée par les pales
- $V$  : vitesse du vent en m/s

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho S V^3}$$

La valeur maximale théorique du coefficient de puissance  $C_p$ , connue sous le nom de limite de Betz est donnée par la relation suivante:

$$C_p = \frac{16}{27} = 0.59259$$

## II.5. Rapport de Vitesse $\lambda$ :

On définit  $\lambda$  le rapport d'avance, dit aussi paramètre de rapidité ou vitesse spécifique, ou encore rapport de vitesse en bout de la pale:

R: rayon de la pale

$\Omega$ : vitesse de la pale en rd/s et V: vitesse du vent

$$\lambda = \frac{R\Omega}{V}$$

Pour tout ordre de grandeur si  $\lambda < 3$ , l'éolienne est dite lente, et  $\lambda > 3$ , l'éolienne est dite rapide

En pratique, le nombre de pales dépend de la vitesse spécifique comme rapporté dans le tableau

IV.1 :

Vitesse spécifique	Nombre des pales
$\lambda_0 = 1$	8 à 24
$\lambda_0 = 2$	6 à 12
$\lambda_0 = 3$	3 à 6
$\lambda_0 = 4$	2 à 4
$\lambda_0 \geq 5$	2 à 3

Tableau II-2: Nombre des pales d'une éolienne.

## II.6 Etude du multiplicateur:

### II.6.1. Principe:

Le multiplicateur permet de transformer la puissance à vitesse lente et à un couple élevé produite par le rotor de l'éolienne, en une puissance à grande vitesse et à un couple faible utilisée par la génératrice.

### II.6.2. Fréquence de rotation:

La fréquence de rotation est liée au diamètre du rotor et elle diminue lorsque le diamètre augmente. Les pales tournent à une vitesse relativement lente, de l'ordre de 5 à 15 tours par minute, d'autant plus lente que l'éolienne est grande.

La plupart des générateurs ont besoin de tourner à une certaine vitesse (de 1000 à 3000 tours/min), pour garder un bon rendement au générateur électrique il est nécessaire d'augmenter la fréquence de rotation obtenue avec l'aéromoteur avant d'entraîner un générateur électrique classique. Cette augmentation est réalisée à l'aide du multiplicateur, aussi appelé boîte de vitesse qui est un train d'engrenages. Dans le cas de la boîte de vitesse d'un aérogénérateur, on utilise généralement un système d'engrenages composé de roues dentées de différents diamètres avec un nombre de dents différents. Le rapport des vitesses de rotation ( $\omega$ ) des arbres d'entrée et de sortie est égal au rapport des diamètres des roues

Le rendement est variable suivant la puissance transmise mais en moyenne 97%

Il s'agit d'une composante lourde et coûteuse mais elle permet d'avoir un rotor relié par l'arbre lent au multiplicateur tournant lentement (30 à 40 tours/min) et de se coupler à un générateur donc peu cher, qui tourne 40 à 50 fois plus vite étant relié au multiplicateur par l'arbre rapide.

## II.7 Trains d'engrenages:

### II.7.1. Généralité:

Les trains d'engrenages sont utilisés dans une grande quantité de machines et mécanismes divers.

Les engrenages cylindriques sont les plus courants, les engrenages coniques réalisent la transmission entre arbres concourants. Les engrenages roue et vis permettent l'irréversibilité et une grande réduction avec un seul couple de roues (leur faible rendement les écarte des grandes puissances).

Dans la plupart des applications, les trains d'engrenages fonctionnent en multiplicateur (ou réducteur) augmentant la vitesse et réduisent le couple.

**II.7. 2.Schématisation:**

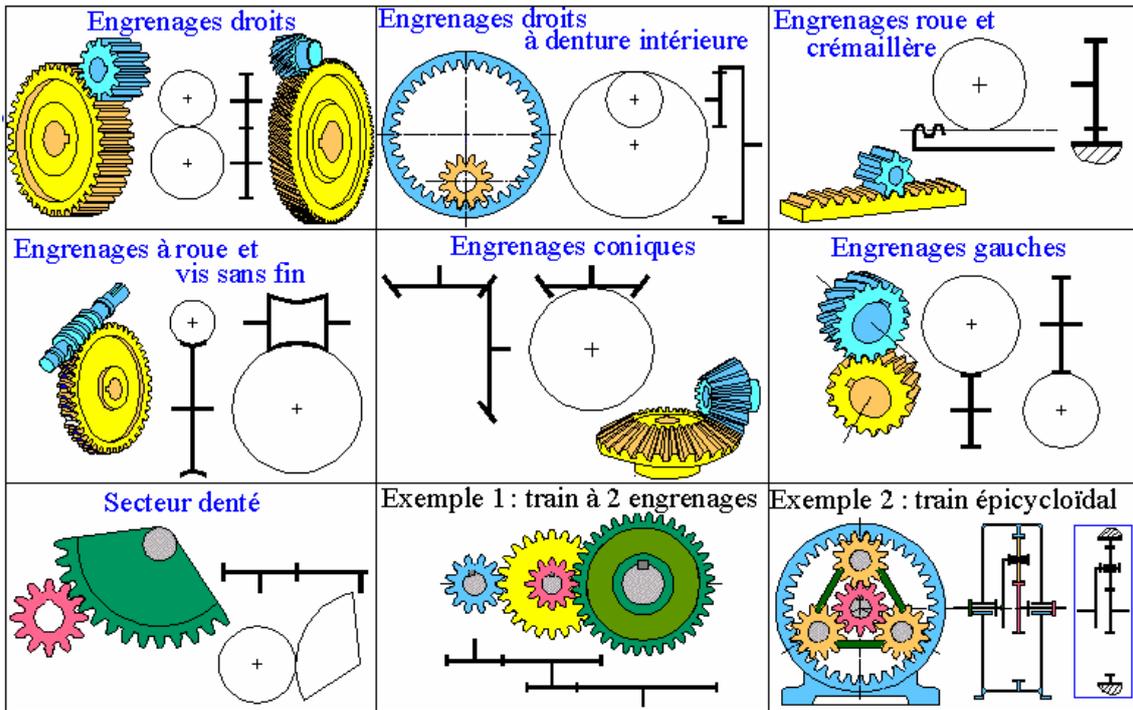
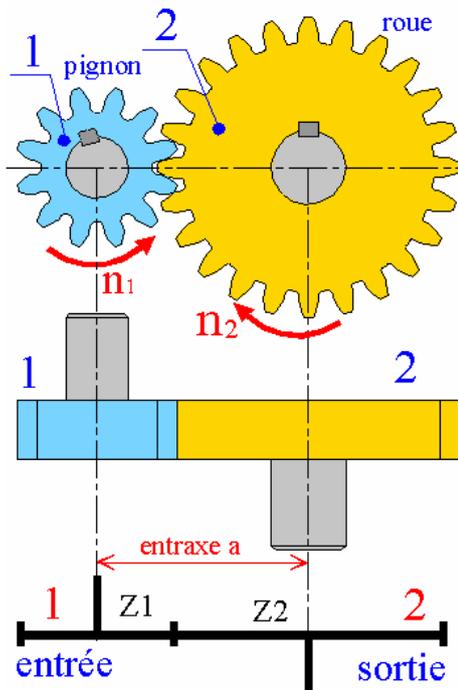


Figure II-4: Différents types d'engrenages

### II.7. 3. Etude des trains classiques:

- **Train à un engrenage:**



#### Trains à un engrenage

Un couple de roue, si  $Z_a$  est le nombre de dents de la roue (a) et de son diamètre primitif, le rapport de transmission est:

$$R_{2/1} = \frac{n_2}{n_1} = - \frac{Z_1}{Z_2} = - \frac{d_1}{d_2}$$

remarque:

le signe - indique une inversion du sens de rotation entre l'entrée 1 et la sortie 2.

Le rapport des couples transmis, en supposant un rendement  $\eta$  est:

$$\eta \cdot \frac{C_1}{C_2} = R_{2/1} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\omega_2}{\omega_1}$$

C1: couple sur la roue 1 ("moteur")

C2: couple sur la roue 2 ("récepteur")

remarque:  $\eta \leq 1$

Figure II-5: Engrenage simple

### II.7. 4. Etude des trains épicycloïdaux:

Un train d'engrenage est dit "train épicycloïdal" lorsque, au cours du fonctionnement une ou plusieurs roues dentées tournent autour d'un arbre mobile en rotation.

Ces roues dentées possèdent donc un mouvement relatif de rotation autour de leur axe et un mouvement d'entraînement de rotation autour de l'axe de l'arbre.

Ils autorisent de grands rapports de vitesse sous un faible encombrement.

- Un train épicycloïdal est constitué:

- d'un pignon central appelé planétaire
- d'un ou plusieurs pignons appelés satellites engrenant avec le planétaire et la couronne.

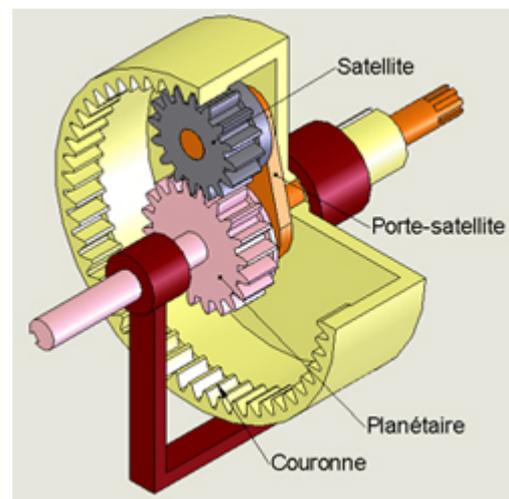


Figure II-6: Train épicycloïdal avec un satellite

Les satellites sont portés par un porte-satellite animé d'un mouvement de rotation.

Il y a le plus souvent deux ou trois satellites ce qui permet équilibrage et répartition des efforts - d'une roue à denture intérieure appelée couronne

On observe donc qu'il y a trois entrées/sorties de mouvements possibles dans un train de ce type. La technique consiste à bloquer un de ces mouvements par une liaison au bâti et de conserver, une entrée et une sortie au train épicycloïdal.

### II.7.5. Configuration avec trains épicycloïdaux simples:

La configuration ci-contre est la plus utilisée. On peut avoir 2,3 ou 4 satellites. Leur nombre est sans influence sur le rapport de transmission.

Le fonctionnement n'est possible que si l'un des trois éléments principaux, planétaire **1**, planétaire couronne **3** ou porte satellites **PS**, soit bloqué ou entraîné par un autre dispositif.

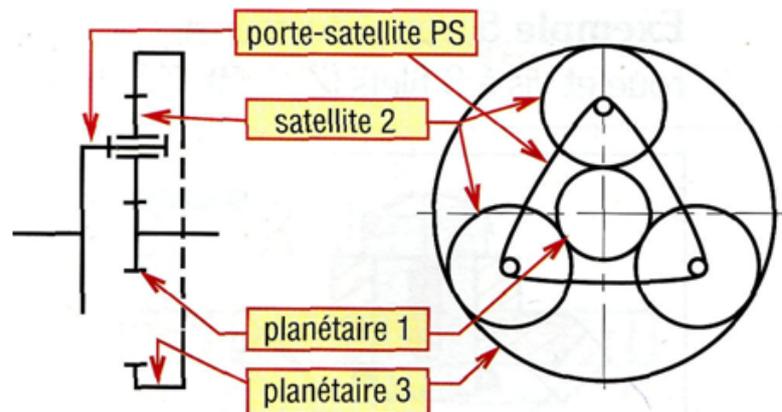


Figure II-7: Schéma cinématique du train épicycloïdal

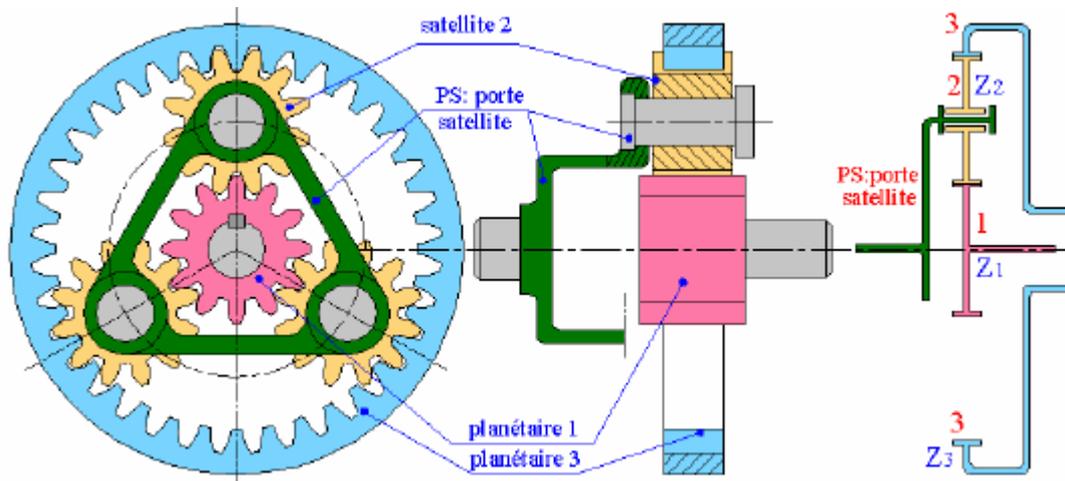


Figure II-8: Train épicycloïdal simple

**II.7. 6. Formule de Willis donne la relation suivante:**

$$\frac{n_1 - n_{PS}}{n_3 - n_{PS}} = (-1)^y \cdot \frac{Z_3}{Z_1} = (-1)^y \cdot \frac{\omega_1 - \omega_{PS}}{\omega_3 - \omega_{PS}}$$

- y : nombre de contacts entre les dents extérieures
- $n_1$  : vitesse de rotation en tr/mn du planétaire 1
- $n_3$  : vitesse de rotation en tr/mn du planétaire 3
- $\omega_1$  : vitesse de rotation en rd/s du planétaire 1
- $\omega_3$  : vitesse de rotation en rd/s du planétaire 3
- $\omega_{ps}$  : vitesse de rotation en rd/s du porte satellite 3
- Z : nombre de dents relatif aux roues dentées (1 - 2 et 3)

Cette configuration (Figure III-4), est la plus répandue, utilise un satellite triplé à une seule roue dentée.

**II.8. Cas usuels de fonctionnement:**

- **Planétaire 3 bloqué:** C'est le mode de fonctionnement le plus courant avec  $n_3 = 0$

- $n_1$  : vitesse de rotation en tr/mn de la roue planétaire 1
- $C_1$  : couple sur la roue planétaire 1
- $C_{PS}$  : couple sur le porte satellite
- Z : nombre de dents relatif aux roues dentées (1 et 3)

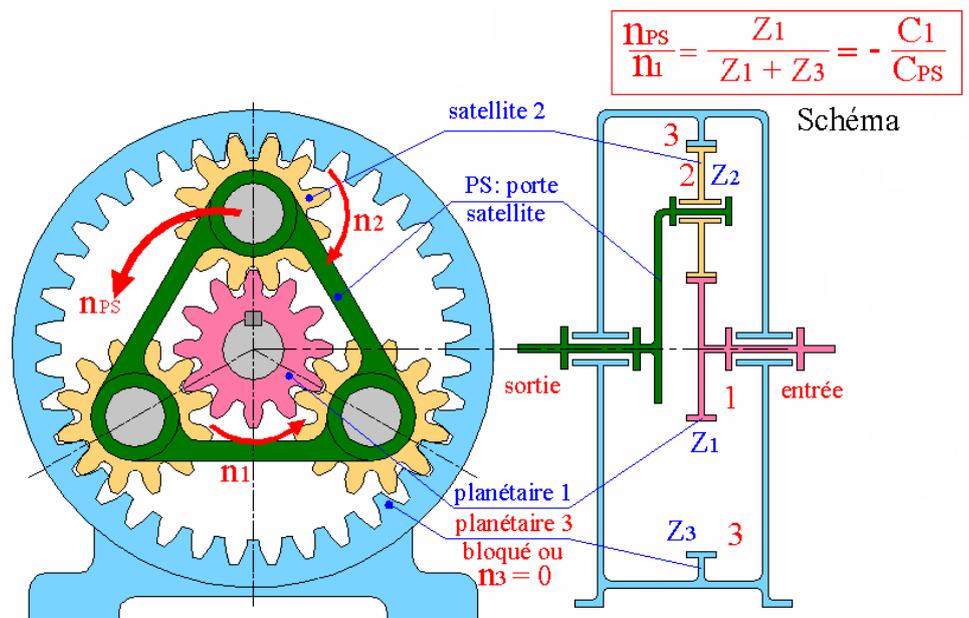


Figure II-9: Configuration Planétaire (3) bloqué

- **Planétaire 1 bloqué:** C'est une variante avec  $n_1 = 0$

Le rapport de transmission est donné par la fomule suivante: 
$$\frac{n_{PS}}{n_3} = \frac{Z_3}{Z_1 + Z_3} = - \frac{C_3}{C_{PS}}$$

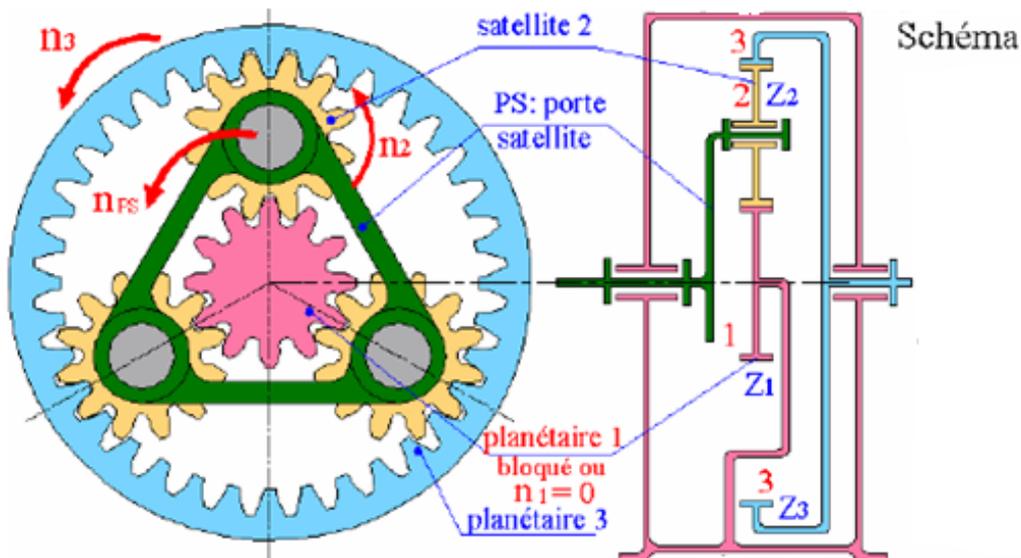


Figure II-10 : Configuration Planétaire(1) bloqué

- **Porte Satellite bloqué:** C'est une variante avec  $n_{ps} = 0$

Si le porte satellite PS est bloqué, l'ensemble fonctionne comme un train classique à un engrenage intérieur avec roue d'inversion 2.

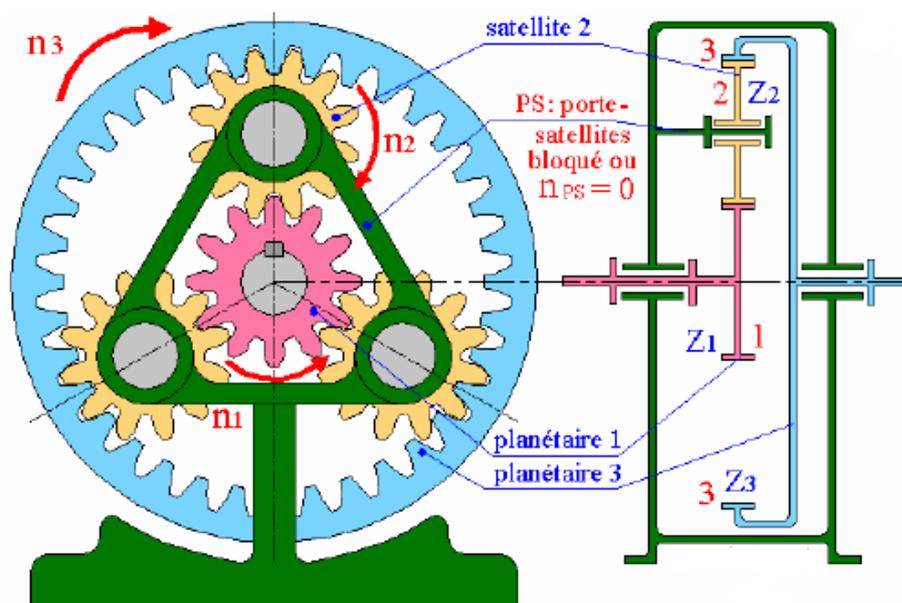


Figure II-11: Configuration Satellite bloqué

### II.8.1 Configuration avec train en série:

Le rapport de transmission est donné par la fomule suivante:

$$\frac{n_{PS''}}{n_1} = \frac{n_S}{n_E} = \left( \frac{Z_1}{Z_1 + Z_3} \right) \cdot \left( \frac{Z_1'}{Z_1' + Z_3'} \right) \cdot \left( \frac{Z_1''}{Z_1'' + Z_3''} \right)$$

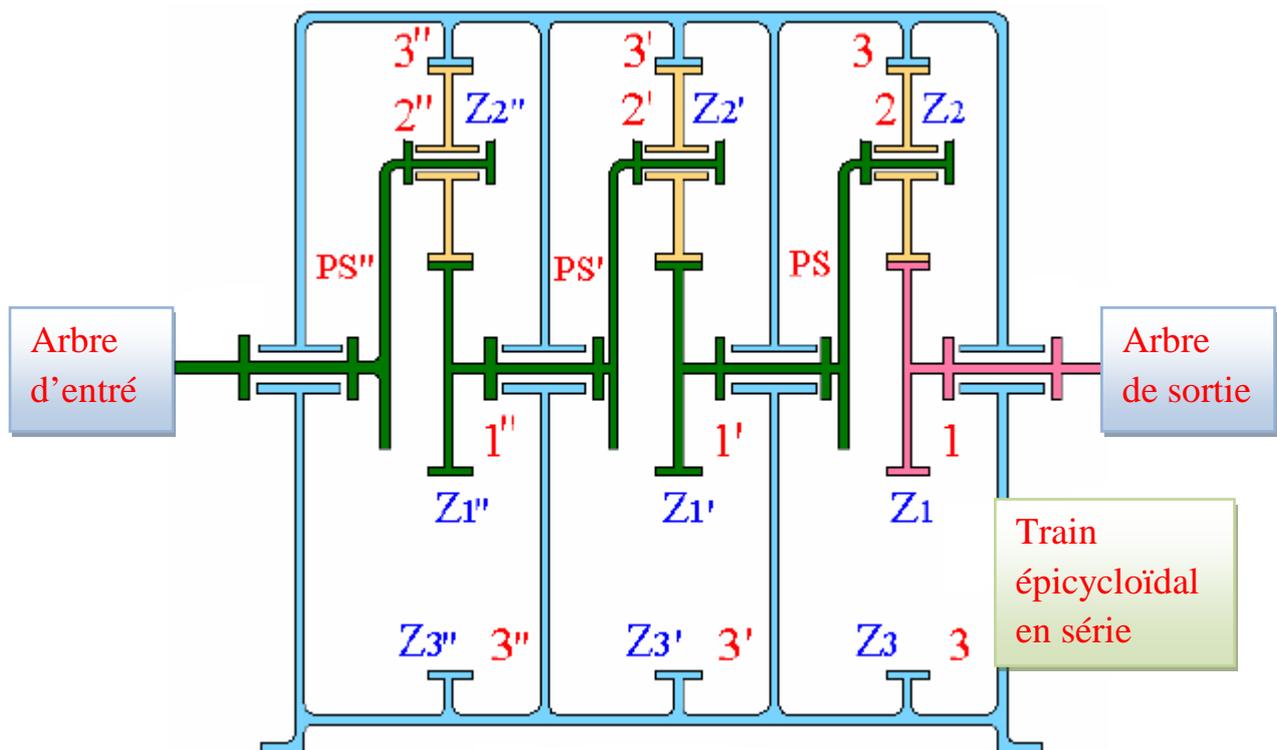


Figure II-12: Configuration avec trains en série:

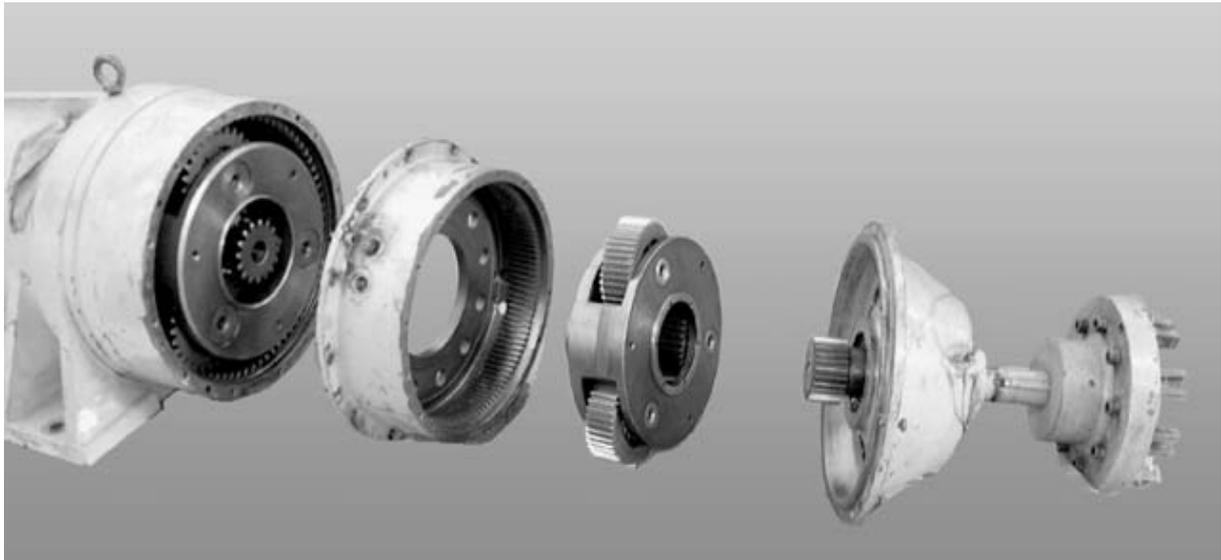


Figure II-13: Vue éclatée d'un train épicycloïdal en série

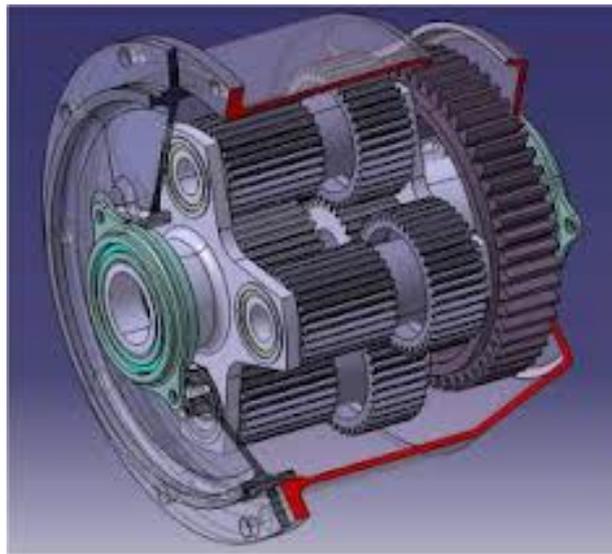


Figure II-14: Train épicycloïdal en série

## II.9.Trains épicycloïdaux

### II.9.1 Définition d'un train épicycloïdal.

Un train d'engrenages est qualifié d'épicycloïdal quand, pendant le fonctionnement, une ou plusieurs roues dentées tournent autour d'un axe qui tourne lui même par rapport au bâti.

Terminologie.

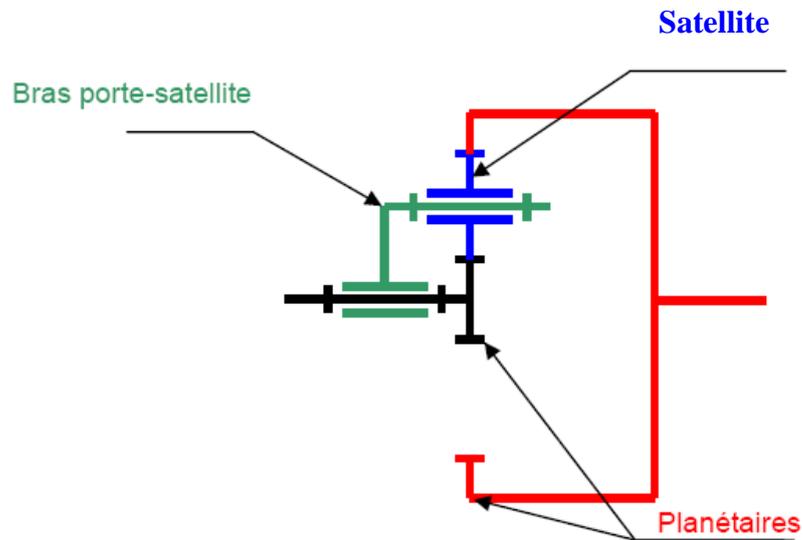


Figure II-15: Schéma d'un train épicycloïdal

### II.9.2 Divers types de trains épicycloïdaux:

	Trains plans	Trains sphériques
Trains simples		
Trains doubles		

Figure II-16: types de trains épicycloïdaux

### II.9.3. Formule de Willis:

Pour un observateur situé sur le porte satellite 4  
Le train d'engrenage se comporte comme un train simple, on peut alors en écrire la raison de base  $r_b$ :

$$r_b = \frac{\omega_s}{\omega_e} = \frac{\omega_{1/4}}{\omega_{3/4}} = -\frac{Z_3}{Z_1}$$

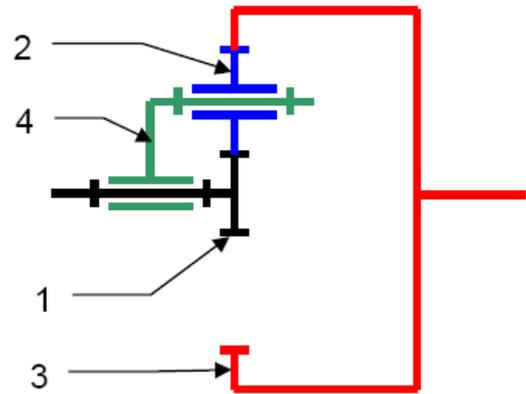


Figure II-17: Schéma d'un train épicycloïdal

Par relation de Chasles sur les fréquences de rotation, on peut écrire:

$$\omega_{1/4} = \omega_{1/0} + \omega_{0/4} = \omega_{1/0} - \omega_{4/0}, \text{ et } \omega_{3/4} = \omega_{3/0} + \omega_{0/4} = \omega_{3/0} - \omega_{4/0}$$

D'où la formule de Willis:

$$\frac{\omega_{1/0} - \omega_{4/0}}{\omega_{3/0} - \omega_{4/0}} = -\frac{Z_3}{Z_1}$$

### II.9.4. Possibilités cinématiques d'un train simple épicycloïdal plan:

La formule de Willis montre que le train épicycloïdal est un mécanisme à deux degrés de liberté, et que la connaissance de deux des fréquences de rotation permet le calcul de la troisième.

#### II.9.4.1. Porte satellite 4 fixe, $\omega_{4/0} = 0$ :

$$\omega_{1/0} = \omega_s \Rightarrow \omega_{3/0} = \omega_e \Rightarrow r = \frac{\omega_s}{\omega_e} = -\frac{Z_3}{Z_1}$$

Deux possibilités :

Le train est multiplicateur et inverseur.

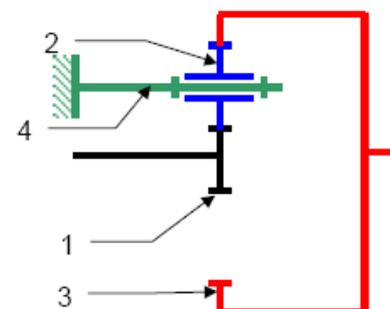


Figure II-18: Porte satellite fixe

Ou  $\omega_{3/0} = \omega_s \Rightarrow \omega_{1/0} = \Rightarrow \frac{\omega_e}{\omega_s} = -\frac{Z_3}{Z_1} \Rightarrow r = \frac{\omega_s}{\omega_e} = \frac{Z_1}{Z_3}$   $\omega_e$

Le train est réducteur et inverseur.

**II.9.4.2. Planétaire 1 fixe,  $\omega_{1/0} = 0$ :**

Deux possibilités :

$$\omega_{3/0} = \omega_s \Rightarrow \omega_{4/0} = \omega_e \Rightarrow \frac{0 - \omega_e}{\omega_s - \omega_e} = -\frac{Z_3}{Z_1} \Rightarrow \frac{\omega_s}{\omega_e} = \frac{Z_1}{Z_3} + 1$$

$$\Rightarrow r = \frac{\omega_s}{\omega_e} = \frac{Z_1 + Z_3}{Z_3}$$

$\omega_{3/0} = \omega_s$        $\omega_{4/0} = \omega_e$

Le train est multiplicateur et non-inverseur

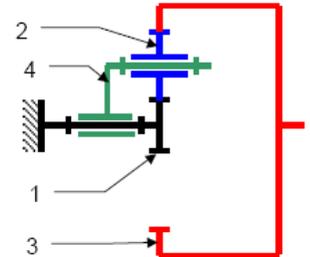


Figure II-19: Planétaire fixe

Ou

$$\omega_{4/0} = \omega_s \Rightarrow \omega_{3/0} = \omega_e \Rightarrow \frac{0 - \omega_s}{\omega_e - \omega_s} = -\frac{Z_3}{Z_1} \Rightarrow \frac{\omega_e}{\omega_s} = \frac{Z_1}{Z_3} + 1$$

$$\Rightarrow r = \frac{\omega_s}{\omega_e} = \frac{Z_3}{Z_1 + Z_3}$$

Le train est réducteur et non-inverseur

**II.9.4.3. Planétaire 3 fixe,  $\omega_{3/0} = 0$ :**

$$\omega_{1/0} = \omega_s \Rightarrow \omega_{4/0} = \omega_e \Rightarrow \frac{\omega_s - \omega_e}{0 - \omega_e} = -\frac{Z_3}{Z_1} \Rightarrow$$

$$\frac{\omega_s}{\omega_e} = \frac{Z_3}{Z_1} + 1$$

$$\Rightarrow r = \frac{\omega_s}{\omega_e} = \frac{Z_1 + Z_3}{Z_1}$$

x possibilités :

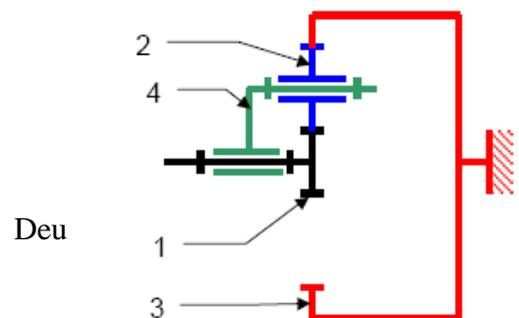


Figure II-20: Planétaire fixe

Dans ce cas le train est multiplicateur et non-inverseur

$$\omega_{4/0} = \omega_S \Rightarrow \omega_{3/0} = \omega_e \Rightarrow \frac{0 - \omega_S}{\omega_e - \omega_S} = -\frac{Z_3}{Z_1} \Rightarrow \frac{\omega_e}{\omega_S} = \frac{Z_1}{Z_3} + 1 \quad \text{Ou:}$$

$$\Rightarrow r = \frac{\omega_S}{\omega_e} = \frac{Z_3}{Z_1 + Z_3}$$

Le train est réducteur et non-inverseur

$$r_1 + d_2 = r_3 \Rightarrow \frac{m \cdot Z_1}{2} + m \cdot Z_2 = \frac{m \cdot Z_3}{2}$$

## II.9.5. Construction d'un train épicycloïdal:

### II.9.5.1. Configuration à un seul satellite:

D'où la condition sur les nombre de dents à respecter:

$$Z_3 = Z_1 + 2 \cdot Z_2$$

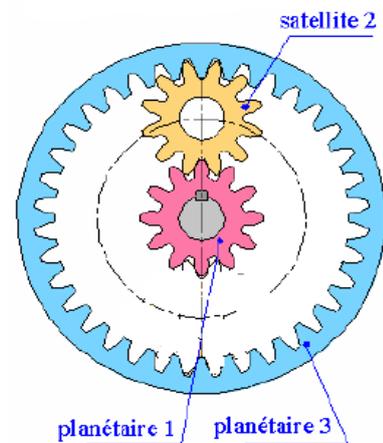


Figure II-21: Configuration à 1 satellite

### II.9.5.2. Montage de deux satellites:

Le circuit tracé sur la figure doit correspondre à un nombre entier de dents :

D'où la condition sur les nombre de dents à respecter:

$$\frac{Z_2}{2} + \frac{Z_1}{3} + \frac{Z_2}{2} + \frac{Z_3}{3} = \text{entier} \Rightarrow Z_2 + \frac{Z_1 + Z_3}{3} = \text{entier}$$

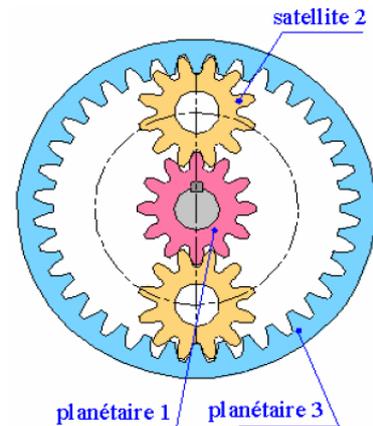


Figure II-22: Configuration à 2 satellites

### II.9.5.3. Montage de trois satellites:

Le circuit tracé sur la figure doit

correspondre à un nombre entier de dents :

$$\frac{Z_2}{2} + \frac{Z_1}{2} + \frac{Z_2}{2} + \frac{Z_3}{2} = \text{entier} \Rightarrow Z_2 + \frac{Z_1 + Z_3}{2} = \text{entier}$$

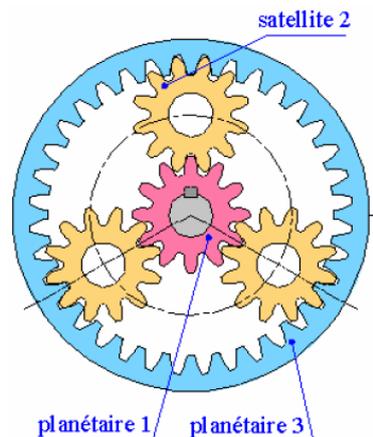


Figure II-23: Configuration à 3 satellites

D'où la condition sur les nombre de dents à respecter :

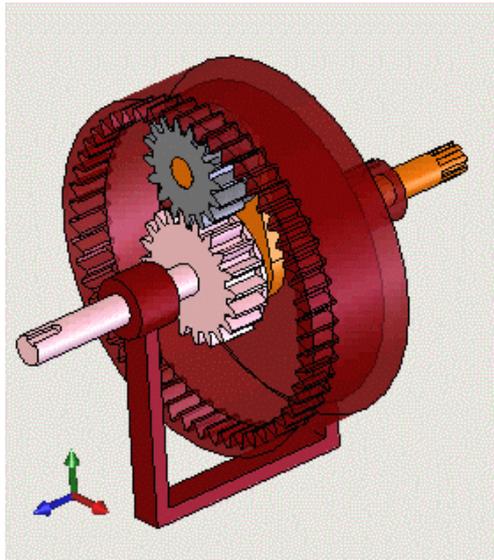
$$Z_1 + Z_3 = \text{multiple de } 3$$

Remarque: Le nombre des satellites est sans influence sur le rapport de transmissio

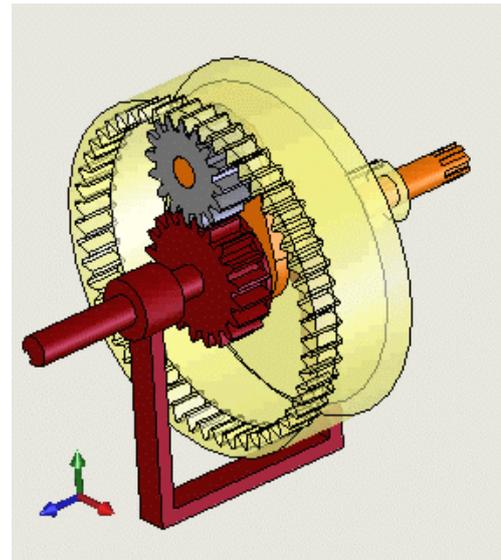
**II.10. Les trois cas ci-dessous illustrent ces différentes situations:**

Dans chacune des solutions, la couleur rouge du bâti a été également donnée à la pièce choisie comme immobilisée.

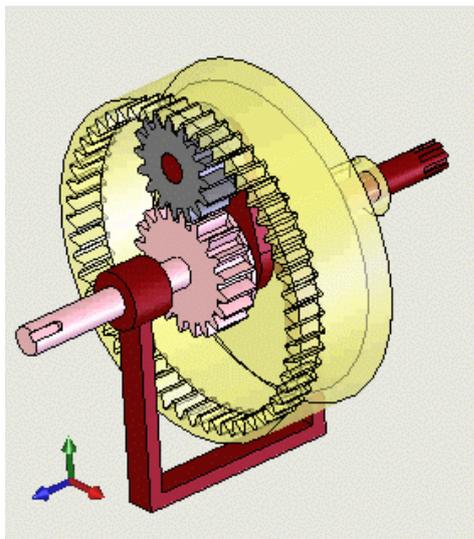
Dans les deux premiers cas suivants (couronne fixe ou planétaire fixe) on obtient un train épicycloïdal dont le rapport de réduction est différent.



Couronne bloquée par rapport au bâti



Porte-satellite bloqué par rapport au bâti



Planétaire bloqué par rapport au bâti

Figure II-24: Les trois configurations

- Dans le troisième cas, lorsque l'on bloque le porte satellite, on obtient un train simple d'engrenages.

Le terme épicycloïdal vient du nom de la courbe décrite par un point d'un des pignons mobiles (épicycloïde).

Les rapports de multiplication obtenus avec les trains épicycloïdaux peuvent être très importants sous un encombrement réduit (celui de la couronne) avec un rendement très supérieur aux systèmes de réduction à roue et vis sans fin.

### **II.11.Conclusion:**

Cette étude des multiplicateurs de vitesse a permis d'analyser dans le détail les différents types de réalisations. Qu'il s'agisse d'un choix sur catalogue ou d'une réalisation particulière, quelques points forts sont à bien préciser.

À puissance fixée et rapport constant ne dépassant pas 8, le prix évolue suivant la géométrie, la nature des matériaux et la finition des dentures, le rapport d'évolution pouvant atteindre 3 à est le plus compétitif, volume et masse s'orientant vers un minimum avec les aciers de cémentation et une rectification, le prix de l'unité de masse augmente par contre avec la qualité.

L'engrenage conique est de prix élevé et de vitesse tangentielle limitée avec un encombrement important et des réglages assez délicats.

Le train épicycloïdal, dernier venu, évolue depuis une vingtaine d'années pour aboutir à des ensembles très compacts, l'isostatisme assuré ne conduisant pas à un accroissement de prix.

Les groupements s'imposent dès que le rapport dépasse 8. Longtemps, le groupement en série a été le seul utilisé. Actuellement, le groupement en série permet la réduction des dimensions s'accompagnant d'un esthétisme plus agréable sans que le prix augmente, le rendement restant très intéressant.

# CHAPITRE III

---

*CALCULS ET CONCEPTION DU  
MULTIPLICATEUR*

---

### III.1. Introduction:

Dans ce chapitre il sera question de déterminer les paramètres aérodynamiques nécessaires et de proposer une procédure de conception d'un multiplicateur d'éolienne, en cherchant et en assurant un fonctionnement optimale de la boîte de vitesse et qui assure un meilleur rendement.

Ce chapitre commence par le choix du nombre de pales ainsi que du diamètre de l'éolienne. Ensuite, les paramètres aérodynamiques de conception sont déterminés et qui sont directement utilisés pour calculer la vitesse de rotation de l'arbre d'entrée ainsi que les caractéristiques des roues dentées du multiplicateur.

### III.2. Détermination des paramètres aérodynamiques de l'éolienne:

De nombreux éléments nécessaires dans la construction d'éolienne dépendent entre autre de leur fonction et de la vitesse locale du vent.

Ainsi si l'on désire construire un aérogénérateur, on adoptera de préférence une éolienne rapide ayant une vitesse spécifique  $\lambda_0$  élevée, comprise par exemple entre 5 et 8; de façon à limité au maximum le rapport de multiplication de la vitesse de rotation pour l'entraînement de l'alternateur. L'éolienne sera alors bipale ou tripale.

La vitesse spécifique ou le paramètre de rapidité noté  $\lambda_0$  est le rapport entre la vitesse de l'extrémité de la pale et la vitesse du vent [10].

En pratique, le nombre de pales dépend de la vitesse spécifique comme rapporté dans le tableau III.1

Vitesse spécifique	Nombre des pales
$\lambda_0 = 1$	8 à 24
$\lambda_0 = 2$	6 à 12
$\lambda_0 = 3$	3 à 6
$\lambda_0 = 4$	2 à 4
$\lambda_0 \geq 5$	2 à 3

Tableau III.1: Nombre des pales d'une éolienne.

### III.3. Calcul préliminaire:

#### III.3.1. Calcul de la puissance mécanique disponible:

- La puissance maximale récupérable est définie par:

$$P_{max} = \frac{1}{2} C_p \cdot \rho \cdot S \cdot V^3$$

$$C_p = \frac{16}{27} = 0,5926$$

- $C_p$  : coefficient d'échange de puissance
- $\rho$  : masse volumique de l'air **1,225 kg/m<sup>3</sup>**
- $S$  : surface balayée par les pales
- $V$  : vitesse du vent égale **6 m/s**
- $R$  : Longueur de la pale égale **12 m**

$$S = \pi R^2 = 3,14 \times 144 = 452,16 \text{ m}^2$$

$$P_{max} = \frac{1}{2} \times 0,5926 \times 1,225 \times 452,16 \times 6^3 \longrightarrow P_{max} = 35450 \text{ Watt}$$

- Détermination de la vitesse de rotation de l'arbre primaire:
- Calcul du couple:

Il nous faut ici définir le paramètre de vitesse  $\lambda$  de notre éolienne obtenu d'après les valeurs indiquées (voir Tableau III.1).

Pour un nombre de pales égale **3**, on choisi  $\lambda = 7$

$$\text{On a: } \lambda = \frac{U}{V} \quad \text{avec } U : \text{vitesse au bout de la pale et } V : \text{vitesse du vent}$$

$$U = R \omega$$

$$\lambda = \frac{R \omega}{V} \longrightarrow \omega = \frac{\lambda V}{R} = \frac{7 \times 6}{12} \longrightarrow \omega = 3.5 \text{ rd/s} \quad (\text{III.1})$$

Pour déterminer le couple délivré par notre éolienne on a :

$$P = C \omega \longrightarrow C = \frac{P}{\omega} = \frac{35450}{3.5} \longrightarrow C = 1060 \text{ N.m} \quad (\text{III.2})$$

$$\text{Le nombre de tours est: } n = \frac{30 \omega}{\pi} \longrightarrow n = 33.44 \text{ tr/mn} \quad (\text{III.3})$$

### III.4. Conception du multiplicateur:

#### III.4.1- Avant propos:

L'éolienne possède un mouvement de rotation d'axe horizontal, sous l'action du vent.

Cette rotation de module faible peut actionner directement une pompe mais pas un générateur d'électricité.

Il est nécessaire d'augmenter d'avantage sa vitesse de rotation d'où la réalisation d'un multiplicateur de vitesse. Ce mécanisme sera interposé entre le rotor de l'éolienne et l'arbre récepteur de l'alternateur afin de multiplier sa vitesse de rotation.

#### III.4.2- Les paramètres fonctionnels de départ:

- Le réducteur sera à l'intérieur de la nacelle.
- L'encombrement doit être réduit au minimum (vidange, graissage, remplacement des pièces)
- Ce mécanisme doit pouvoir fonctionner 24 heures sur 24, ceci durant 3ans avant de nécessiter une révision provoquant l'arrêt momentané de l'éolienne.
- Le diamètre intérieur de la nacelle est fixé, entre [480,580 mm].
- Le générateur, (cours d'électricité J. Niard) doit fonctionner avec une fréquence 50 Hertz, et vitesse de rotation de 3000 tr/min.

#### III.4.3- Etude comparative des solutions envisageables:

L'arbre de l'éolienne et celui de l'alternateur sont horizontaux. Ceci conduit à la conception d'un multiplicateur à axes coaxiaux.

Deux solutions sont envisageables.

- Transmission par train d'engrenage simple
- Transmission par train d'engrenage épicycloïdal.

#### III.4.4- Le rapport de multiplicateur:

La transmission d'un mouvement à l'aide d'un engrenage permet d'assurer un rapport de multiplication fixe.

La vitesse d'entrée de 33,44 tr/min a été déterminée par le calcul précédent (III.3)

Ainsi qu'une vitesse de sortie égale à 3000 tr/min permettant le fonctionnement nominal du générateur.

$$\text{Le rapport de transmission } R = \frac{n(\text{sortie})}{n(\text{entrée})} = \frac{3000}{33.44} = 89.7 \quad \text{(III.4)}$$

Le grand rapport de transmission  $R = 89.7$  nous permet d'écarter une transmission par train d'engrenage simple vu le nombre encombrant des roues dentées.

Notre choix sera une configuration d'un multiplicateur à train épicycloïdal, offrant un grand rapport de multiplication et surtout un encombrement réduit par rapport au train d'engrenage simple.

### III.4.5- Calculs des caractéristiques du multiplicateur:

On donne les paramètres de départ suivant:

La vitesse d'entrée:  $n_1 = 33.44$  tr/mn

Le diamètre de la nacelle étant fixé à 580 mm.

Choisissons un diamètre primitif de la couronne planétaire  $d_3 = 336$  mm et une denture droite de module 4 qui satisfait la condition de l'encombrement (diamètre de la nacelle égal à 580mm).

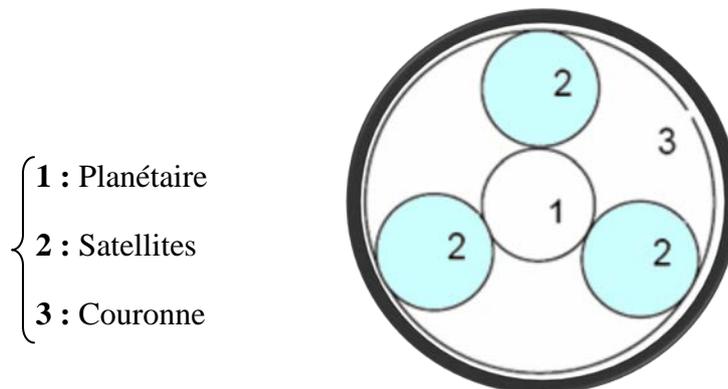


Figure III.1: Montage à 3 satellites

D'après la figure ci-contre on a les relations suivantes:

$$r_1 + d_2 = r_3 \quad \text{donc} \quad Z_1 + 2Z_2 = Z_3$$

Le choix du montage à 3 satellites doit correspondre à un nombre entier des dents:

$$Z_2 + \frac{Z_1 + Z_3}{3} = \text{entier}$$

Donc il faut que le nombre de dents des roues vérifie les deux équations:

$$\begin{cases} Z_1 + Z_3 = \text{multiple de } 3 \\ Z_1 + 2 Z_2 = Z_3 \end{cases}$$

- **Calcul du diamètre primitif  $d_3$**

$$d_3 = m Z_3 = 336 \text{ soit } Z_3 = d_3 / m \longrightarrow Z_3 = 84 \text{ dents}$$

$$Z_1 + Z_3 = Z_1 + 84 = \text{multiple de } 3 \longrightarrow \text{choisissons } Z_1 = 24$$

- **Calcul du diamètre primitif  $d_1$**

$$d_1 = m Z_1 = 4 \times 24 = 96 \longrightarrow d_1 = 96 \text{ mm}$$

La relation  $Z_1 + 2 Z_2 = Z_3$  nous permet de calculer le nombre de dents  $Z_2$

$$Z_2 = \frac{Z_3 + Z_1}{2} = \frac{84 + 24}{2} \longrightarrow Z_2 = 30$$

- **Calcul du diamètre primitif  $d_2$**

$$d_2 = m Z_2 = 4 \times 30 = 120 \longrightarrow d_2 = 120 \text{ mm}$$

### III.4.6 -Schéma cinématique du multiplicateur:

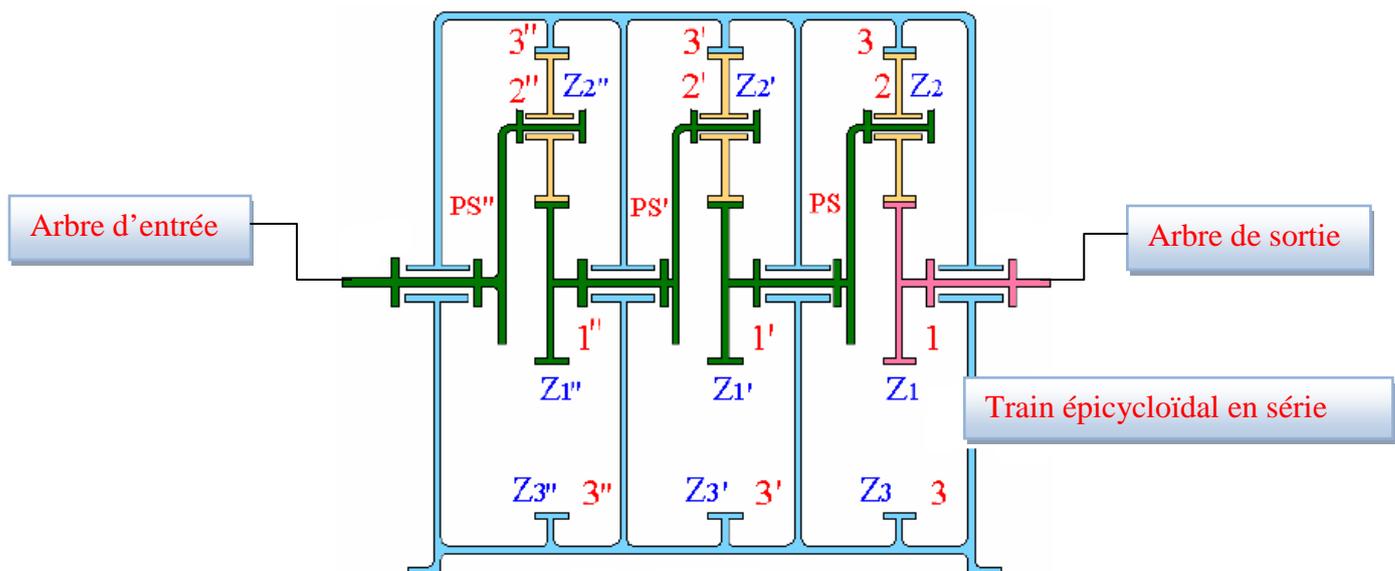


Figure III.2: Train épicycloïdal en série

### III.4.7- Calculs des caractéristiques des roues dentées:

	Engrenage extérieur	Engrenage intérieur
Module $m$	Donné par calcul de résistance des matériaux	
Nombre de dents $Z$	Donné par le rapport $(Z_1/Z_2) = (l_2/l_1)$	
Pas au primitif $p$	$p = \pi.m$	
Saillie $ha$	$ha = m$	
Creux $hf$	$hf = 1,25.m$	
Hauteur de la dent $h$	$h = ha + hf = 2,25.m$	
Diamètre primitif $d$	$d = m.Z$	
Diamètre de tête $da$	$da = d + 2.m$	$da = d - 2.m$
Diamètre de pied $df$	$df = d - 2,5.m$	$df = d + 2,5.m$
Largeur de dent $b$	$b = km$ ( $k$ : coefficient de largeur de denture $7 \leq k \leq 12$ )	
Entraxe $a$	$a = \frac{d_1 + d_2}{2}$	$a = \frac{d_1 - d_2}{2}$

Tableau III.2: Tableau récapitulatives des caractéristiques des roues dentées

Par application directe des formules du tableau, nous permettent de trouver les valeurs suivantes ( $k=8$ ):

Roues	Pas de denture $P$	Module $m$	Nombre de dents $Z$	Diamètre primitif $d$	Saillie de denture $h_a$	Creux de denture $h_f$	Diamètre de tête $d_a$	Diamètre de pied $d_f$	Largeur de denture $b$
1 1 1	12.56	4	24	96	4	5	104	86	32
2 2 2			30	120			128	110	
3 3 3			84	336			328	346	

Tableau III.3 : Valeurs récapitulatives des caractéristiques des roues dentées

### III.4.8- Calcul du rapport de multiplicateur:

Pour calculer le rapport de transmission du train épicycloïdal nous avons la formule de Willis suivante:

$$R = \frac{n_{sortie}}{n_{entrée}} = \frac{Z_1+Z_3}{Z_1} \times \frac{Z_1+Z_3}{Z_1} \times \frac{Z_1+Z_3}{Z_1}$$

$$R = \frac{n_{sortie}}{n_{entrée}} = \frac{24+84}{24} \times \frac{24+84}{24} \times \frac{24+84}{24} = 91$$

- Vérification du rapport de transmission avec la valeur précédente (III.4)

$$\frac{n_{sortie}}{n_{entrée}} = \frac{3000}{33.44} = 89.7$$

Le rapport du multiplicateur  $R = 91$  nous permet nettement d'atteindre la vitesse de rotation à la sortie du multiplicateur  $n_{sortie} = 3000 \text{ tr/mn}$ , sachant qu'en réalité le rendement de la transmission est inférieur à 1.

### III.5. Efforts sur les dentures:

Puisque chaque compartiment de train épicycloïdal formant le multiplicateur est composé de roues dentées de même caractéristiques, la roue 2 est menante (motrice) et la roue 1 menée (réceptrice),  $r_2$  et  $r_1$  sont respectivement les rayons primitifs.

$C_2$  est le couple moteur sur la roue 2 et  $C_1$  le couple récepteur sur la roue 1.

$P_2$  est la puissance motrice de la roue 2 et  $P_1$  la puissance réceptrice de la roue 1.

Le rendement est égal à 1:  $P_2 = P_1$ .

$$P_1 = C_1 \cdot \omega_1$$

$$P_2 = C_2 \cdot \omega_2 \text{ avec } P \text{ en watts, } C \text{ en } \mathbf{N.m} \text{ et } \omega \text{ en rad/s}$$

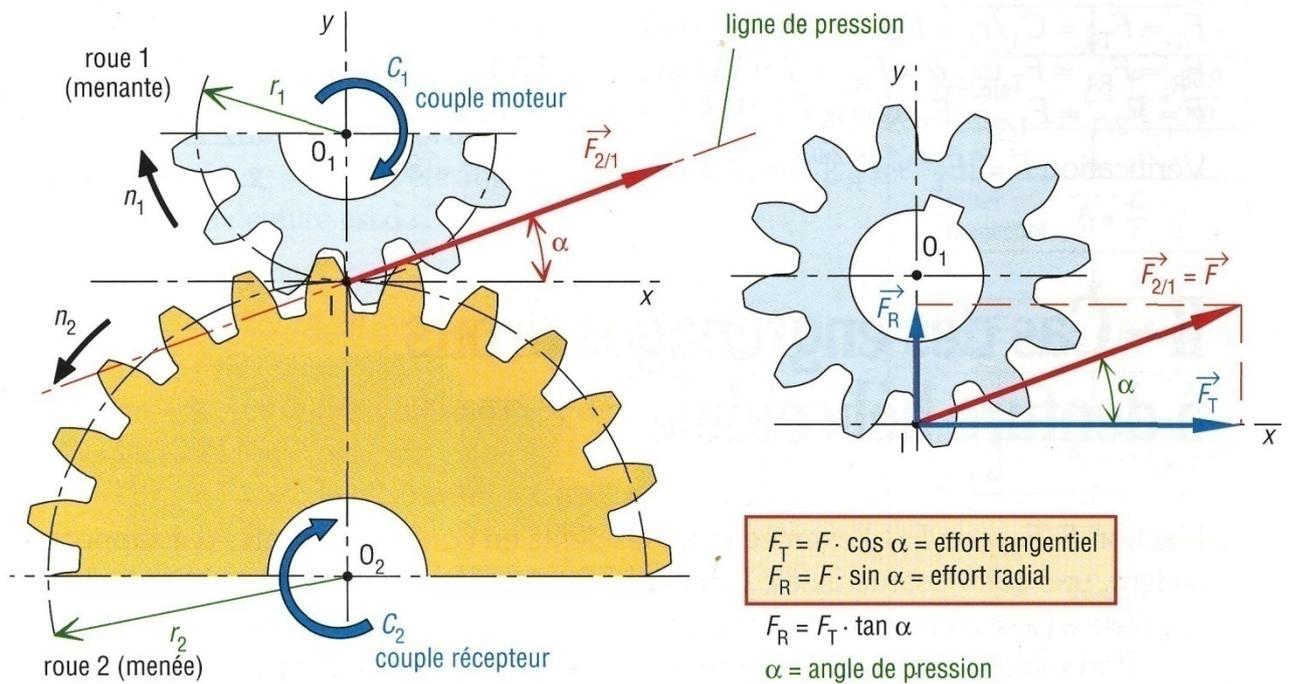


Figure III.3: Efforts sur une denture droite

### III.5. 1. Efforts de contact

#### III.5. 1. 2. Action de contact $F_{2/1}$

Elle schématise l'action exercée par la roue 2 sur la roue 1. Elle est toujours portée par la ligne de pression (inclivée de l'angle de pression  $\alpha$  et passant par I, point de contact entre cercles primitifs).

▪ **Calcul de  $F_{2/1}$ ,  $F_T$  et  $F_R$**

L'organigramme proposé indique la procédure à suivre connaissant la puissance d'entrée, la vitesse de rotation et l'angle de pression.

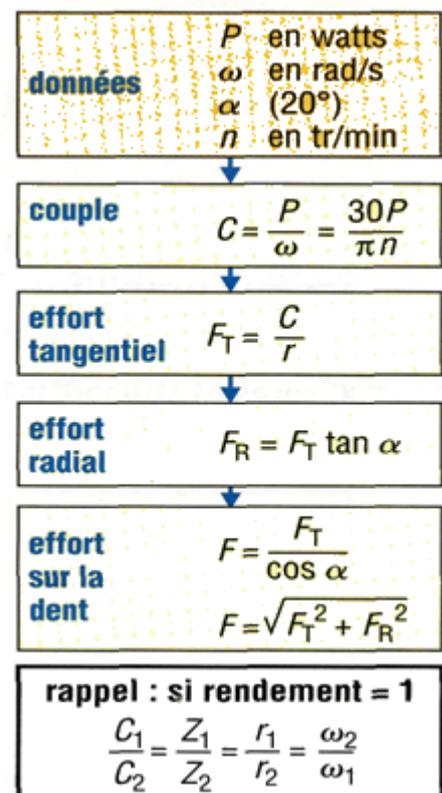


Figure III.4: Organigramme de calcul

- **Effort tangentiel  $F_T$**

Il est obtenu en projetant  $F_{2/1}$  sur la tangente en I aux cercles primitifs.  $F_T$  est à l'origine du couple transmis.

$$F_T = F_{2/1} \cdot \cos\alpha \quad (\text{III.5})$$

$$C_1 = F_T \cdot r_1 \quad C_2 = F_T \cdot r_2 \quad (\text{III.6})$$

$$\frac{n_S}{n_e} = \frac{n_1''}{n_{ps''}} = \frac{Z_1'' + Z_3''}{Z_1''} = \frac{24 + 84}{24} = 4.5 \quad \text{donc} \quad n_1'' = 4.5 \times n_{ps''}$$

$$n_1'' = 4.5 \times 33.44 = 150,5 \text{ tr/mn}$$

$$V_{T1} = \omega_1 r_1 = \frac{\pi n_1'' r}{30} = \frac{\pi 150,5 \times 48}{30} = 75,6 \text{ m/s} \quad (\text{III.7})$$

Sachant que la puissance est donnée par:

$$P = F_T \cdot V_T \quad F_T = \frac{P}{V_T} = \frac{35450}{75,6} = 468,92 \text{ N} \quad (\text{III.8})$$

$$F_T = 468,92 \text{ N}$$

- **Effort radial  $F_R$  :**

Perpendiculaire à  $F_T$ , il est obtenu en projetant  $F_{2/1}$  sur  $O_1O_2$ .

Parfois appelé effort de séparation, il ne participe pas à la transmission du couple son action a tendance à séparer les deux roues et se traduit par un fléchissement des arbres.

$$\underline{F_R = F_T \cdot \text{tg}\alpha = 468,92 \text{ tg}20^\circ = 170,67 \text{ N}}$$

### III.5. 2. Calcul de la résistance de la dent:

La conception d'un engrenage passe par la détermination de l'épaisseur de la dent, du module à partir de l'effort  $F$  ( $F_{2/1}$ ) exercé entre les roues et des conditions de service.

Cette détermination conduit à deux types de calculs :

- Un calcul de contrainte au pied de la dent (zone fragile).

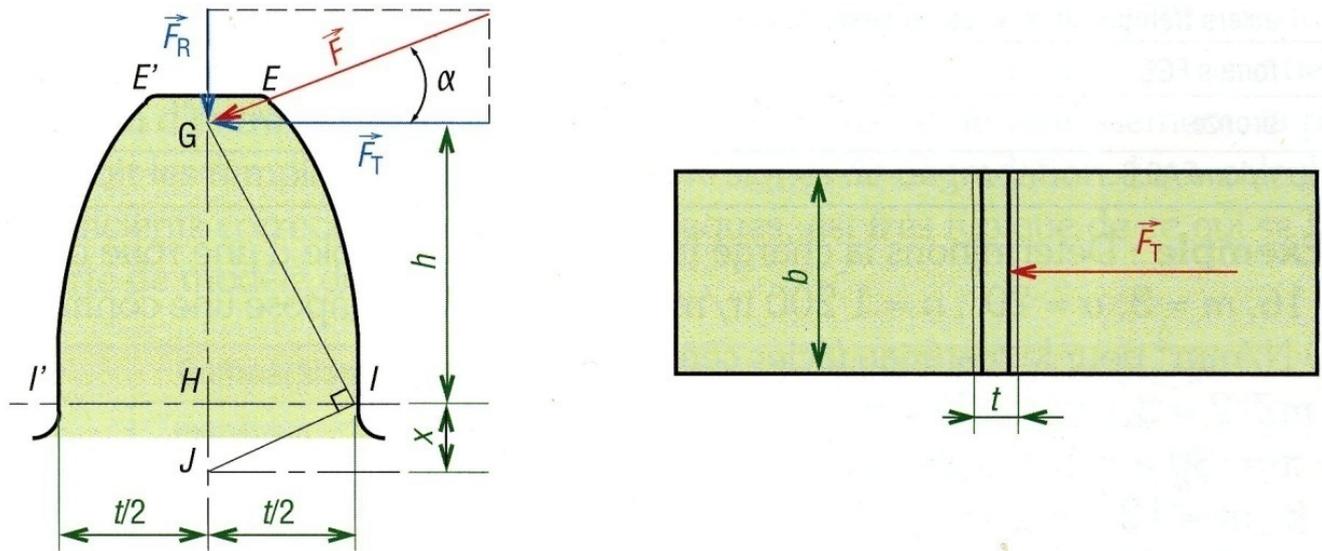


Figure III.5: Efforts exercés sur une dent

- Un calcul de résistance (usure, fatigue...) dans la zone de contact entre dents.

#### III.5. 2.1. Méthode de Lewis :

Notre cas est un engrenage droit à denture droite.

- **Principe :**

La dent est calculée en flexion comme une poutre encastree soumise à l'effort  $F$  suppose située à son extr emitt e  $E$  (ou  $E'$ ).

F peut être remplacé par ses composantes  $F_T$  et  $F_R$ . Les effets de  $F_R$  beaucoup plus faibles sont négligés.

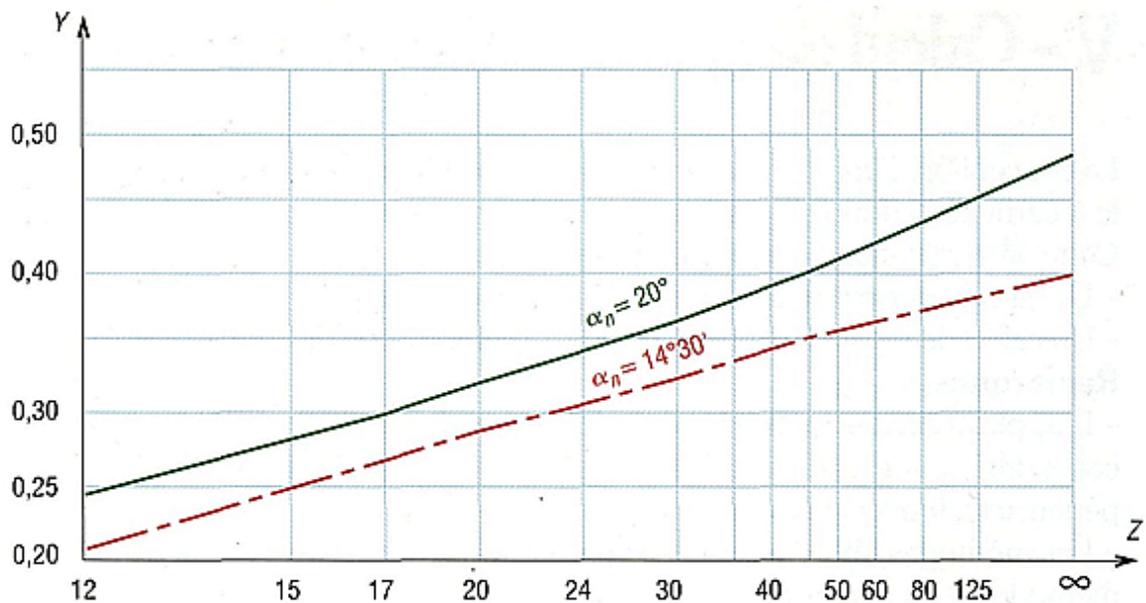


Tableau III.4: Valeur du coefficient Y

La résistance des matériaux (cas de flexion) montre que la contrainte de flexion est maximale en I (ou I', racine de la dent) et qu'en ce point :

Au besoin, un coefficient correcteur ( $K_V$ ) permet de tenir compte des effets de la vitesse circonférentielle au diamètre primitif ( $V = \pi nr/30$ ) :

$$\sigma_{\max} = \frac{F_T}{b.m.Y.K_V} \leq R_{pe} \quad \text{avec} \quad K_V = \frac{6}{6 + V} \quad (V \text{ en m/s})$$

### III.5. 2.2.Détermination de la contrainte admissible:

$$K_{v''} = \frac{6}{6+75,6} = 0,07 \quad \text{avec la valeur du coefficient } Y = 0,34 \text{ relevé du tableau (III.7) on a:}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{F_T}{b \times m \times Y \times K_{v''}} = \frac{468,92}{32 \cdot 4 \cdot 0,34 \cdot 0,07} \quad \text{donc} \quad \sigma_{\max} = 146,6 \text{ N/mm}^2$$

### III.5. 2.3.Choix du matériau du pignon arbré (1) :

Les résultats précédents nous permettent de choisir comme matériau des roues dentées et sous critère de classification d'emploi (extrait du guide dessinateur Chevalier) suivant:

Acier faiblement allié 16NC6 ( $R_r = 1080 \text{ N/mm}^2$  et  $R_e = 830 \text{ N/mm}^2$ )

### III.6. Calcul du poids des satellites 2:

#### ▪ Calcul du volume:

La masse  $M = \rho \cdot V$   $\rho = 7,89 \text{ g/cm}^3$  masse volumique de l'acier

$$V = V_{\text{Total}} - V_{\text{alésage}}$$

$$V_{\text{Total}} = \pi r^2 b = 3,14 \cdot 60^2 \cdot 32 = 361728 \text{ mm}^3$$

$$V_{\text{alésage}} = \pi r'^2 b = 3,14 \cdot 17,5^2 \cdot 32 = 30772 \text{ mm}^3$$

$$V = 361728 - 30772 = 330956 \text{ mm}^3 = 331 \text{ cm}^3$$

La masse  $M = 7,89 \cdot 331 = 2,6 \text{ kg}$

Le poids d'un satellite est donc  $P = Mg = 26 \text{ newton}$

### III.7. Choix des solutions technologiques:

#### III.7.1.Choix des roulements:

D'après les abaques donnant les caractéristiques des roulements à moyenne diamètre on choisit des roulements à billes à contact oblique pour les quatre paliers voir tableau (III.5)

Ce type de roulement supporte les charges axiales dues au poussées du vent sur les pales et radiales dues aux efforts de transmission par engrenage.

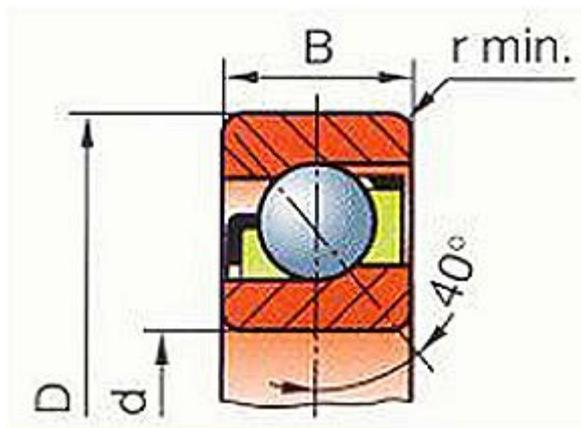


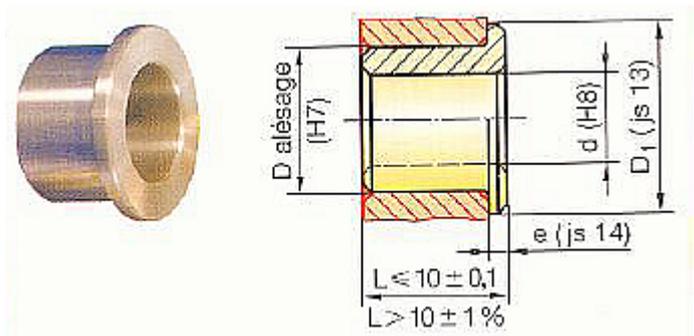
Figure III.6 : Roulement à contact oblique

	Charges admissibles			Aptitude à la vitesse	Espérance de vie	Rigidité sous couple de renversement	Aptitude au désalignement	Angle de rotulage
	Radiale	axiale	combinée					
	++	++	++	+++	+++	+	+	2 à 16°
	++	+++	+++	+++	+++	0	0	1 à 2°
	+++	++	++	++	+++	+++	+	≈ 0
	+	≈ 0	++	+	+	0	+++	2 à 4°
	0	+++	0	+	+	0	+	0
	+++	0	0	++	+++	0	+	1 à 7°
	+++	++	+++	++	+++	0	+	1 à 4°
	+++	+	++	+	++	0	+++	0,5 à 2°
	+++	0	0	+	++	+++	0	≈ 0
	+++ excellent			++ bon		+ passable		0 inacceptable

Tableau III.4: Caractéristiques des roulements

**III.7.2.Choix des coussinets:**

Les coussinets sont en bronze fritté à structure poreuse. Ils sont imprégnés d’huile jusqu’à saturation, sous l’effet de la rotation des arbres l’huile est aspirée et crée une excellente lubrification.

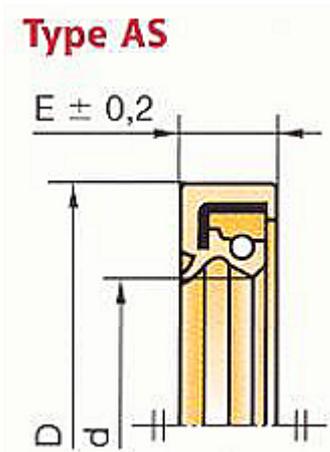


Coussinets à collerette									
d	D	D <sub>1</sub>	e	L	d	D	D <sub>1</sub>	e	L
3	6	9	1,5	4-6-10	20	26	32	3	16-20-25-32
4	8	12	2	4-8-12	22	28	34	3	15-20-25-30
6	10	14	2	6-10-16	25	32	39	3,5	20-27-32
8	12	16	2	8-12-16	28	36	44	4	22-28-36
10	16	22	2	8-10-16	30	38	46	4	20-25-30
12	18	24	3	8-12-20	32	40	48	4	20-25-30-32
14	20	26	3	14-18-22-28	36	45	54	4,5	22-28-36
16	22	28	3	16-20-25-32	40	50	60	5	25-32-40
18	24	30	3	18-22-28	50	60	70	5	32-40-50

Tableau III.5: Tableau dimensionnel des coussinets

### III.7.2.Choix des joints d'étanchéité à deux lèvres:

Assurent une étanchéité dans un seul sens avec en plus une protection dite anti poussière dans l'autre sens



### III.7.3.Choix des écrous à encoches:

Ce type d'écrou permet le réglage des jeux fonctionnels des roulements avec rondelles de freinage

Rondelles frein – Écrous à encoches							
N°	d × pas	D	B	S	d <sub>1</sub>	E	G
0	M10 × 0,75	18	4	3	8,5	3	1
1	12 × 1	22	4	3	10,5	3	1
2	15 × 1	25	5	4	13,5	4	1
3	17 × 1	28	5	4	15,5	4	1
4	20 × 1	32	6	4	18,5	4	1
5	25 × 1,5	38	7	5	23	5	1,25
6	30 × 1,5	45	7	5	27,5	5	1,25
7	35 × 1,5	52	8	5	32,5	6	1,25
8	40 × 1,5	58	9	6	37,5	6	1,25
9	45 × 1,5	65	10	6	42,5	6	1,25
10	50 × 1,5	70	11	6	47,5	6	1,25

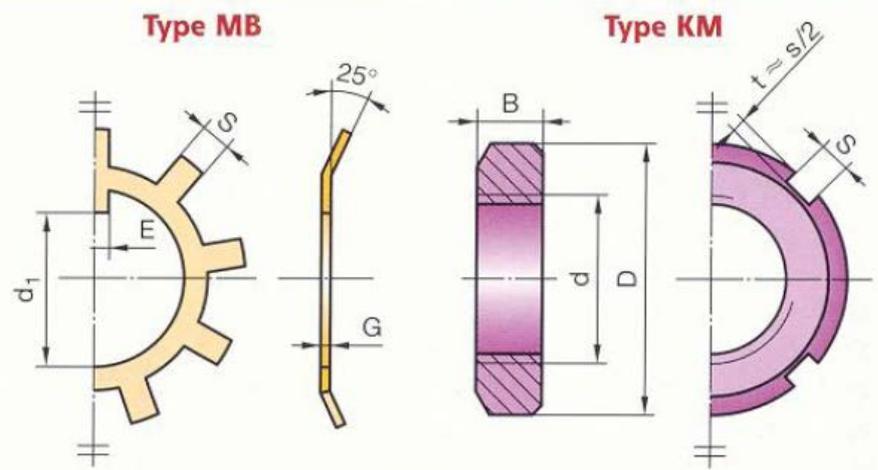
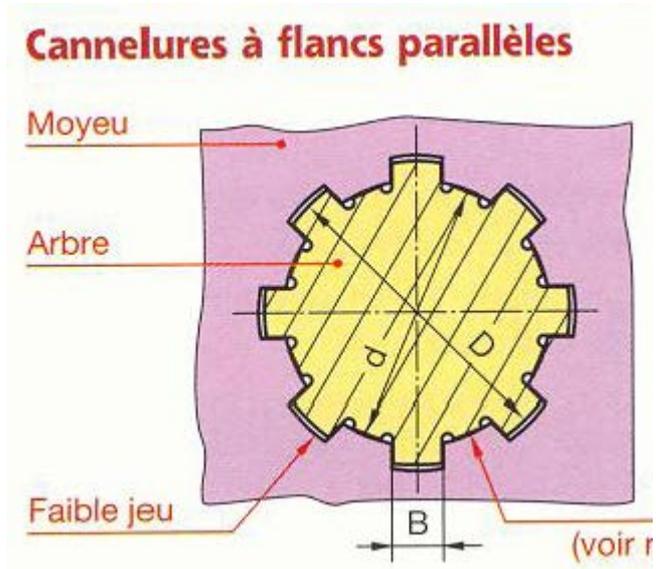


Tableau III.6: Tableau dimensionnel des écrous à encoches

### III.7.4.Choix des cannelures usinées sur les bouts des arbres principales:

Le couple à transmettre étant important, l'utilisation des clavettes est d'être concevable.

Donc le choix des cannelures s'impose.



Série légère					Série moyenne					Série forte*					
n	d	D	B	s	n	d	D	B	s	n	d	D	B	s	
6	23	26	6	5	6	11	14	3	5	10	16	20	2,5	12	
	26	30	6	7,2		13	16	3,5	5		18	23	3	16	
	28	32	7	7,2		16	20	4	7,2		21	26	3	16	
8	32	36	6	8,4		18	22	5,5	7,2		23	29	4	19	
	36	40	7	8,4		21	25	5	7,2		26	32	4	19	
	42	46	8	8,4		23	28	6	9,5		28	35	4	22	
	46	50	9	8,4		26	32	6	10,8		32	40	5	25	
	52	58	10	12		28	34	7	10,8		36	45	5	29	
	56	62	10	12		32	38	6	14,4		42	52	6	30	
10	62	68	12	12		36	42	7	14,4		46	56	7	30	
	72	78	12	15	42	48	8	14,4	52	60	5	36			
	82	88	12	15	46	54	9	18	56	65	5	42			
	92	98	14	15	52	60	10	18	62	72	6	48			
	102	108	16	15	56	65	10	21	72	82	7	48			
	112	120	18	22,5	62	72	12	24	82	92	6	60			
n = nombre de cannelures. s = surface réelle d'appui des cannelures par millimètre de longueur.					10	72	82	12	30	16	92	102	7	60	
						82	92	12	30		102	115	8	82	
						92	102	14	30		112	125	9	82	
						102	112	16	30		* Emploi à éviter. Voir également page suivante.				
						112	125	18	41						

Tableau III.7: Tableau dimensionnel des cannelures

**Conclusion:**

Grâce aux améliorations technologiques qui ont permis les réductions des coûts, la filière éolienne occupe actuellement une part de plus en plus importante dans le bilan énergétique de nombreux pays, et elle représente aujourd'hui une production mondiale de 60 000 MW.

Cette source d'énergie a aussi l'avantage d'être écologiquement très propre puisqu'un parc d'aérogénérateurs n'émet ni polluants ni gaz à effet de serre et qu'il ne génère pas de déchets et ne comporte que des risques mineurs sur l'environnement. On peut conclure que le bilan écologique de l'énergie éolienne est très positif.

En Algérie les réalisations dans le domaine de l'énergie éolienne sont très limitées en comparaison avec l'actuelle évolution mondiale dans ce domaine, qui a atteint des objectifs très avancés. Aussi la part des énergies renouvelables dans le bilan énergétique national est très faible par rapport aux pays voisins puisque elle ne représente que 0,02 % de la consommation nationale d'électricité.

Dans le domaine de la modélisation aérodynamique, la forme optimale de l'hélice d'un aérogénérateur ainsi que les efforts aérodynamiques serviront pour évaluer les performances énergétiques, mais sachant aussi bien que l'optimisation de la vitesse de rotation vers l'alternateur est un facteur positif pour produire encore plus d'énergie électrique.

La conception optimale de la boîte de vitesse d'une éolienne se démontre par la grandeur de son rapport multiplicateur de vitesse de rotation permettant l'utilisation d'un générateur de courant électrique plus performant.

## Références

- [1] *Mr Mahri Zine labidine* « Etude dynamique et optimisation des pales d un aérogénérateur» Université de Mentouri Constantine .
- [2] bureau d'étude winergy · atlas éolien d'haïti et termes de références pour une étude de faisabilité de 3 microcentrales éoliennes dans la région du nord / nord est Email : winergy@winergy.fr , Juillet 2006
- [3] les articles scientifiques Energie éolienne - technique de l'ingénieur réf : B 8 585.
- [4] R. Swisher, C. Real de Azua, J. Clendenin, « Strong winds on the horizon: wind power comes of age », proceedings of the IEEE, vol. 89, N°. 12, December 2001, pp. 1757-1764.
- [5] Louis-Charles FORCIER, " conception d'une pale d'éolienne de grande envergure à l'aide de techniques d'optimisation structurale " école de technologie Supérieure université du Québec, le 1er septembre 2010.
- [6] R. REDJEM, " Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne" université de Mentouri Constantine 04 /07/2009
- [7] Debbache.M," De la conception à la réalisation de pale éolienne Composites " , Université Mohamed Khider – Biskra, 2012
- [8] Corinne du bois, "le guide de l'éolien, techniques et pratiques" ,édition eyrolles 2009.
- [9] [http://www.earth-policy.org/Updates/2006/Update52\\_data.htm](http://www.earth-policy.org/Updates/2006/Update52_data.htm)
- [10] Hans Larsen, L.S. Peters "New and emerging technologies (options for the future)" Risø National Laboratory October 2002
- [11] Joseph Florence "Global wind power expands in 2006", Earth Policy Institute
- [12] P.E. Morthorst "Economics of wind power" Risø international energy conference: Energy technologies for post Kyoto targets in the Medium Term Risø national laboratory 19 - 21 may 2003
- [13] Gaëtan Lafrance « La sécurité énergétique et la filière éolienne » avis d'expert présenté au ministre des ressources naturelles, de la faune et des parcs (Québec), Nov 2004.
- [14] S.BENTOUBA « Les énergies renouvelables dans le cadre d'un développement durable en Algérie » SIPE8, 11 et 12 Nov 06 Bechar.
- [15] La Tribune (Alger) 17 décembre 06
- [16] Atelier de réflexion sur la stratégie de développement et à l'avenir des énergies renouvelables en Algérie, décembre 2006.
- [17] L. Aiche-Hamane et A. Khellaf « Evolution Mensuelle de la Ressource Eolienne à

travers l'Algérie » Rev. Energ. Ren.: ICPWE (2003)147-152

[18] B. Taya, L. Chaguer « énergie éolienne au Maroc » FIER' 2002 Tétouan – Maroc

[19] Science et Vie, février 99

[20] Site Internet : <http://resosol.org/Developpement/actualite2006.html>

[21] La Presse (Tunis), 14 décembre 2006.

[22] Dannemand Andersen "Review of historical and modern utilization of wind power"  
Wind Energy Department, Riso Laboratory.

[23] Hashatel.A, "Etude comparative des aéromoteurs pour un choix approprié d'éolienne  
destinée à la production de l'énergie électrique" école nationale polytechnique, 2004

[24] nachida kasbadji merzouk "évaluation du gisement énergétique éolien contribution à la  
détermination du profil vertical de la vitesse du vent en algérie " l'université abou bekr  
belkaid de tlemcen 2006

[25] Guide méthodologique relatif à l'implantation des éoliennes en Seine-et-Marne mars  
2007 cle7613f1

[26] B. Amine and S. Bachir, "Etude technologique d'une éolienne à axe horizontal et  
l'utilisation C. N. EBÉY, "Etude d'une éolienne lente pour l'entraînement d'une pompe à  
piston simple effet ", Université Kinshasa, 2005. on de la CAO dans sa conception ",  
Université Biskra, 2010.

[27] C. N. EBÉY, "Etude d'une éolienne lente pour l'entraînement d'une pompe à piston  
simple effet ", Université Kinshasa, 2005.

[28] D. L. Gourières, Les éoliennes : Théorie, conception et calcul pratique, 2ème ed.  
Moulin Cadiou, 2008.