



FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE ET
ELECTRONIQUE

MEMOIRE

Pour l'obtention du Diplôme de
Master en Electrotechnique
Option : Commande de Machine Electrique

Présenté par :
Kamel AMMOUR
Ahmed MEKELLECHE

Thème

**Commande de la vitesse d'une éolienne par
l'approche multi-modèle**

Mémoire soutenu publiquement le 22/10/2014 devant le Jury composé de :

Président	Mr. KHEROUS Abdelghani	U.A.B. Tlemcen
Encadreur	Mr. YACOUBI Boumediene	U.A.A Tlemcen
Examineur	Mr. BENYAHIA Boumediene	U.A.B Tlemcen

Année Universitaire : 2013 - 2014

Remerciements

Avant tous, il apparait opportun de commencer ce Mémoire par des remerciements à Allah puis à ceux qui nous ont beaucoup appris au cours de ce travail.

Nous tenons à exprimé notre sincère gratitude à *Monsieur KHEROUS Abdelghani* Maitre de Conférence à la Faculté de Technologie de l'Université Aboubekr Belkaïd de Tlemcen pour avoir accepté de présider et d'honoré de sa présence le Jury de soutenance, qu'il trouve ici l'expression de notre reconnaissance et de notre respect.

Nous tenons aussi à remercier Monsieur *BENYAHIA Boumediene* pour l'intérêt qu'il a témoigné à l'égard de ce travail par leur nombreuse et enrichissante remarques et observations. Enfin pour nous avoir fait l'honneur d'examiner ce mémoire au titre de membre de jury.

Qu'il nous soit permis d'exprimer notre profonde gratitude à *Monsieur YACOUBI Boumediene*, Maître Assistant à la Faculté de Technologie de l'Université Aboubekr Belkaïd de Tlemcen pour avoir proposé, suivi et dirigé ce travail mais également pour sa disponibilité, et pour le respect dont nous fûmes témoins. Nous le remercions pour nous avoir fait profiter de son expérience ainsi que ses orientations constructives et ses encouragements qui nous ont étaient précieux, et nous ont permis de mener à bien ce travail.

MEKELLECHE Ahmed

AMMOUR Kamel

Tlemcen, Octobre 2014

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

- *Aux êtres les plus chers à mon cœur, ma mère et mon père, qui m'ont beaucoup soutenu
durant mon cursus d'étude et à qui je serai éternellement
reconnaissant ;*
- *A mes chères sœurs ;*
- *A tous les enseignants qui m'ont aidé de près ou de loin à obtenir mon master en
électrotechnique ;*
- *A tous mes oncles et mes tantes ;*
- *A tous mes amis ;*
- *Enfin à tous ceux et celles qui m'ont encouragé et soutenu.*

Kamel AMMOUR

Tlemcen, Octobre 2014

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

*-Aux êtres les plus chers à mon cœur, ma mère et mon père, qui m'ont beaucoup soutenu
durant mon cursus d'étude et à qui je serai éternellement reconnaissant.*

- A mes chères sœurs ;

-A mes frères

*-A tous les enseignants qui m'ont aidé de près ou de loin à obtenir mon master en
électrotechnique ;*

-A mes Amis, Mourad, Kamel, Saïd, Kaddour, Yousef, Malki, Souleymane mehiaoui,...

-Enfin à tous ceux et celles qui m'ont encouragé et soutenu.

Ahmed MEKELLECHE

Tlemcen, Octobre 2014

Résumé

Ce mémoire se porte sur la modélisation et la simulation d'un système de conversion d'énergie éolienne utilisé pour fournir au réseau une puissance constante. Une modélisation bien détaillée de la partie mécanique a été donnée.

L'étude conçoit une représentation multi-modèle qui se base sur la linéarisation autour d'un point de fonctionnement, Aussi on a une représentation dans l'espace d'état des systèmes multivariable qui comporte deux entrées et deux sorties.

Mots clés : turbine, multi-modèle, éolienne.

Abstract

This thesis focuses on the modeling and simulation of a system of wind energy conversion used to provide power to the grid constant. Well detailed modeling of the mechanical part was given.

This study designed a multi-model representation that is based on linearization around an operating point is therefore a representation in the state space of multivariable systems having two input and two output

Keyword: turbine, multi-model, eolienne.

Symbole	Signification	Unité
V_v	Vitesse du vent	m/s
D	le diamètre de la turbine éolienne	m
P	La puissance maximale obtenue	W
C_L	coefficient de portance (sans dimension)	/
C_D	Coefficient de traînée (sans dimension)	/
dA	Surface du « tronçon » de la pale	/
W	Module du vent apparent	/
m	La masse d'air	kg
R_T	Rayon de la turbine éolienne.	m
S	Surface balayée par l'hélice.	m ²
ρ	La densité de l'air	Kg/m ³
E_c	l'énergie cinétique	W
C_p	Coefficient de puissance	N
$C_{p_{max}}$	Coefficient de puissance maximale	N.m
P_{vent}	la puissance disponible dans le vent	W
Ω_T	Vitesse de rotation de la turbine	Rad/s
C_{p-opt}	Coefficient de puissance optimal	/
β	Angle de calage de la pale en degré	[°]
β_{opt}	Valeur nominale de l'angle de calage des pales	[°]
β_{reg}	Valeur référence de l'angle de calage	[°]
λ	Rotation de vitesse	Rad
λ_{opt}	Lambda optimal.	/
C_{aero}	Couple avant le multiplicateur	N.m
P_{aero}	La puissance l'aérogénérateur avant multiplicateur	W
p_{ele}	La puissance électrique générée par l'éolienne	W
C_{em}	Couple électromagnétique	N.m
C_{em-ref}	Couple électromagnétique référence	N.m

C_{aero}	Couple l'aérogénérateur	N.m
C_{mec}	Couple mécanique	N.m
G_g	le gain du multiplicateur	/
J	d'inertie globale en transmission rigide	Kg.m ²
J_T	d'inertie de la turbine	Kg.m ²
J_g	d'inertie de la génératrice	Kg.m ²
J_{g-bv}	d'inertie de la génératrice ramenée à l'arbre de basse vitesse	Kg.m ²
k	Coefficient d'élasticité de l'arbre d'entraînement	/
d	coefficient de frottement de l'arbre d'entraînement par rapport au multiplicateur	/
Ω_{g-BV}	Vitesse d'angulaire de rotation de la génératrice amenée à l'arbre de basse vitesse	Rad/s
τ_β	constante de temps de la dynamique de l'actionneur pitch	/
V	la valeur moyenne de la vitesse du vent	m/s
$\hat{H}_F(s)$	fonction de transfert	/
K_F	Gain statique de la fonction de transfert du filtre de Von Karman	/
$m1, m2 :$	paramètres de Nichita	kg
L_F	échelle de longueur de la turbulence du vent	/
T_F	constante de temps de la fonction de transfert du filtre de Von Karman	/
k_F	gain statique de la fonction de transfert du filtre de Von Karman	/
T_S	Période d'échantillonnage	/
$v_0(t)$	la vitesse du vent en un point fixe	m/s
σ_v	écart type de la turbulence du vent	/
k_σ	Coefficient l'intensité de la turbulence.	/

k	coefficient d'élasticité de l'arbre d'entraînement	/
$\xi(t)$	le vecteur des variables de décision.	/
μ_i	les fonctions d'activation	/
θ	le vecteur de paramètres des modèles	/
M_i, M_{i+1}	modèles linéaires locaux	/
v_k	La vitesse du vent correspondant au modèle local M_k	/
r_k	est le résidu du modèle local M_k	/
$z(t)$	le vecteur des variables de décision	/
μ_i	les fonctions d'activation	/
$G_{ij}(s)$	matrice de transfert	/

Table de Figure

Figure I.1	Capacité mondiale installé en MW	6
Figure I.2	Taux de croissance du marché mondial	6
Figure I.3	Les 10 premières capacités en [MW]	7
Figure I.4	Total des installations – Afrique(MW).....	7
Figure I.5	régions ventées en Algérie	8
Figure I.6	Comparaison entre les vitesses moyennes de sites	9
Figure I.7	Puissance énergétique récupérable en altitude à 50 m Algérie.....	9
Figure I.8	Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s)en Algérie	10
Figure I.9	Comparaison des puissances récupérables des Sites Ventés	11
Figure I.10	élément constitution d'une éolienne	11
Figure I.11	deux types des éoliennes	13
Figure I.12	Eolienne lente	14
Figure I.13	Eolienne rapide	14
Figure I.14	Evolution de la taille des éoliennes.....	17
Figure I.15	Eléments caractéristiques d'une pale	18
Figure I.16	Directions du vent sur un tronçon de pale.....	18
Figure I.17	Forces appliquées sur un tronçon de pale.....	19
Figure I.18	tube de courant autour d'une éolienne	21
Figure I.19	la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent.....	24
Figure II.1	schéma de éolienne.....	26
Figure II.2	Courbe de C_p fonction de λ et β	29
Figure II.3	Modèle rigide de l'éolienne	30
Figure II.4	schéma blocs du modèle rigide de l'éolienne	30
Figure II.5	Modèle à deux masses de l'éolienne.....	31
Figure II.6	Schéma blocs du modèle souple de l'éolienne.....	32
Figure II.7	Modèle de l'actionneur de l'angle de calage	33
Figure II.8	Schéma blocs de la construction de la vitesse du vent en un point	34
Figure II.9	Génération de vents de différentes natures par la méthode de Nichita.....	35
Figure III.1	Classification des systems.....	41
Figure III.2	Schéma blocs du modèle rigide de l'éolienne.....	45
Figure III.3	Structure d'un système multi-modèle	49
Figure III.4	Structure du correcteur proportionnel multi modèle (rigide, sans pitch).....	52
Figure III.5	la puissance (p_T) en fonction de la vitesse de la turbine(Ω_T).....	52
Figure III.6	schéma bloc multi-modèle.....	54

Figure IV.1 exemple représentation d'état d'un système.....	56
Figure IV.2 Exemple de système multi variable à deux entrées et deux sorties	58
Figure IV.3 commande distribuée ($Y_1 U_1, Y_2 U_2$).....	65
Figure IV.4 commande distribuée($Y_1 U_2, Y_2 U_1$).....	66
Figure IV.5 commande multi variable.....	67
Figure IV.6 Découplage simplifié.....	70
Figure IV.7 Le découplage inversé.....	71
Figure IV.8 le découplage inversé alternatif.....	73

LISTE DES TABLEAU :

CHAPITRE I :

Tableau I.1 Classification des turbines éoliennes	12
---	----

CHAPITRE III :

Tableau III.1 les valeurs k_i et k_p pour chaque point de vent.....	54
---	----

Table de matière

Chapitre I Généralités sur les éoliennes

I.1	Introduction.....	5
I.2	Historique	5
I.3	L'énergie Eoliennes dans le monde	6
I.3.1	La capacité mondiale installée de l'énergie éolienne	6
I.4	L'énergie éolienne en Algérie	8
I.4.1	Répartition régionale de la vitesse du vent.....	8
I.4.2	L'atlas de la puissance en Algérie.....	9
I.5	Descriptif d'une éolienne.....	11
I.6	Différent type d'éoliennes	12
I.6.1	Eolienne à axe vertical.....	13
I.6.2	Eolienne à axe horizontal	13
I.7	Avantages et inconvénients d'une éolienne	15
I.7.1	Les avantages	15
I.7.2	Les inconvénients	15
I.8	Application des éoliennes	16
I.9	Taille des aérogénérateurs	16
I.10	Conversion de l'énergie éolienne	17
I.10.1	Principe	17
I.10.2	Efforts sur une pale éolienne	17
I.10.3	Loi de betz	21
I.11	Intérêt de la régulation mécanique de puissance de l'éolienne	24
I.12	Conclusion	25

Chapitre II Modélisation du système éolien

II.1	Introduction.....	26
II.2	Modélisation du système électrique	26
II.3	Multiplicateur.....	27
II.4	Modélisation du sous-système aérodynamique.	27
II.4.1	Modèle de transmission rigide	28
II.4.2	Modèle de transmission souple	29
II.5	Modélisation du système d'orientation des pales	32
II.6	Modélisation du vent.....	33
II.7	Conclusion.....	35

Chapitre III Représentation multi –modèles

III.1	Introduction.....	36
III.2	obtention d'une structure multi-modèles	37
III.2.1	multi-modèle par identification	37
III.2.2	multi-modèle par la linéarisation.....	38
III.2.3	multi-modèle basé sur les secteurs de non linéarité.....	39
III.4.	Représentation du différent type des systèmes asservissement.....	41
III.5	Systèmes non linéaires.....	41
III.5.1	Linéarisation par développement de Taylor.....	41
III.6	Linéarisation du système éolien	42
III.7	Structure d'un système multi-modèle de l'éolienne	49
III.8	Commande par action proportionnelle.....	51
III.9	Conclusion.....	54

Chapitre. IV Représentations dans l'espace d'état

IV.1	Introduction.....	55
IV.2	État d'un système et variables d'état	56
IV.3	Modélisation du fonctionnement du système	57
IV.4	Obtention de la matrice de transfert à partir de la représentation d'état.....	57
IV.5.	Commandabilité et observabilité.....	59
IV.5.1	Commandabilité	59
IV.5.1.1	Définition	59
IV.5.1.2	Critère de Commandabilité (Kalman)	59
IV.5.2	Observabilité.....	60
IV.5.2.1	Définition.....	60
IV.5.2.2	Critère D'observabilité (Kalman).....	60
IV.5.3	Forme canonique commandable.....	61
IV.5.4	Forme canonique observable.....	63
IV.6	Introduction au découplage	64
IV.7	Choix des couples (entrée/sortie).....	65
IV.8	Les types découplages de la commande multi variable.....	68
IV.8.1	Découplage idéal.....	68
IV.8.2	Découplage simplifié.....	69
IV.8.3.	Découplage inversé.....	70
IV.9	Conclusion	73

Introduction générale

Introduction générale :

L'énergie éolienne est une source d'énergie utilisée depuis des siècles. En plus de son exploitation en mer pour faire avancer les bateaux, ce type d'énergie a été exploité sur terre durant au moins les 3000 dernières années. En effet, des moulins à vent ayant un axe vertical étaient déjà utilisés dans les hautes terres afghanes durant sept siècles, pour moulinier du grain. Ainsi, dans un premier temps, l'énergie cinétique du vent était uniquement transformée en énergie mécanique. C'est en 1890 que le danois POUL LACOUR construisit pour la première fois une turbine à vent générant de l'électricité.

C'est principalement la crise pétrolière de 1974 qui a relancé les études et les expériences sur les éoliennes. En cherchant surtout à les utiliser pour produire de l'énergie électrique.

Etant donné que le vent est la source énergétique complémentaire depuis la moitié des années 70, il en résulte deux préoccupations : la protection de l'environnement et l'économie des combustibles fossiles. D'autre part, l'évolution des technologies rendent la conversion de cette énergie de plus en plus efficace et donc son utilisation devient économiquement compétitive par rapport aux sources traditionnelles. En outre, certains événements politiques ont rappelé à l'attention du public l'importance de pouvoir disposer d'une énergie fiable quand à leurs approvisionnements.

Grâce aux efforts intensifs déployés au cours des 30 dernières années, la conversion de l'énergie éolienne est devenue un moyen fiable et concurrentiel capable de produire de l'électricité. La durée de vie des éoliennes modernes est maintenant de 20 à 25 ans, ce qui est comparable à de nombreuses autres technologies de production d'énergies conventionnelles. Pour donner une idée des énormes progrès réalisés, pour des vents moyens de 23 Km/h la puissance moyenne des machines est passée de 30 KW en 1983 à 600 KW en 1997. Tous ces bouleversements techniques font que ce secteur est actuellement en pleine expansion et de plus en plus ouvert sur une multitude des marchés mondiaux. Ainsi, l'énergie éolienne est vouée à un bel avenir.

L'idée générale de notre étude porte sur la commande du sous système mécanique d'une éolienne par l'approche multi-modèle qui repose sur un modèle de

connaissance linéaire sous une représentation d'état .Ce mémoire s'organise en quatre chapitres:

Le premier chapitre est consacré aux notions générales sur l'énergie éolienne .Les technologies d'éolienne ainsi que les différents composants constituant l'aérogénérateur seront brièvement présentés

Dans le deuxième chapitre nous nous intéressons à la modélisation de la turbine avec transmission souple et rigide. Les schémas fonctionnels respectifs ont été étudiés et un modèle mathématique permettant de générer le vent a été élaboré.

Dans le troisième chapitre on a étudié les différentes méthodes de la technique multi-modèle, celle retenue est basée sur une linéarisation autour d'un point de fonctionnement

Le quatrième chapitre concerne les systèmes multi variables avec les différentes techniques de découplage

Et pour finir une conclusion générale résume les résultats obtenus dans ce présent mémoire.

Chapitre I

Généralités sur les éoliennes

I.1. Introduction :

Une éolienne est une machine utilisant la force motrice du vent. Cette force peut être utilisée mécaniquement (dans le cas d'une éolienne de pompage), ou pour produire de l'électricité (dans le cas d'un aérogénérateur).

On parle de parc éolien ou de ferme éolienne pour décrire des unités groupées pour la production de l'énergie électrique. Ces unités peuvent être installées en terre ou mer. [1]

I.2. Historique :

Depuis l'Antiquité, des moulins à vent convertissent l'énergie éolienne en énergie mécanique (généralement utilisée pour moudre du grain, presser des produits oléifères, battre le fer, le cuivre, le feutre ou les fibres du papier ou relever de l'eau).

De nos jours, on trouve encore des éoliennes couplées à des pompes à eau, généralement utilisées pour assécher des zones humides ou au contraire irriguer des zones sèches ou abreuver du bétail.

Historiquement, on note que c'est en 1888 qu'un certain Charles F. Brush construit une grande éolienne pour alimenter sa maison en électricité, avec un stockage par batterie d'accumulateurs.

La première éolienne « industrielle » génératrice d'électricité est mise au point par le Danois Poule Lacour en 1890, pour fabriquer de l'hydrogène par électrolyse. Dans les années suivantes, il crée l'éolienne Lykkegard, dont il vend soixante-douze exemplaires en 1908.

En France, une éolienne expérimentale de 800 kVa était mise en fonctionnement de 1955 à 1963, à Nogent-le-Roi dans la Beauce. Elle avait été conçue par le Bureau d'études scientifiques et techniques de Lucien Romani et exploitée pour le compte d'EDF.

Simultanément, deux éoliennes Neyrpic de 130 et 1 000 kW furent testées par EDF à Saint-Rémy-des-Landes (Manche). En Algérie, une éolienne fut montée sur les hauteurs d'Alger (Dély Ibrahim) en 1957.

Cette technologie ayant été quelque peu délaissée par la suite, il faudra attendre les années 1970 et le premier choc pétrolier pour que le Danemark relance les activités dans les installations d'éoliennes. [2][3]

I.3. L'énergie éolienne dans le monde :

I.3.1. La capacité mondiale installée de l'énergie éolienne :

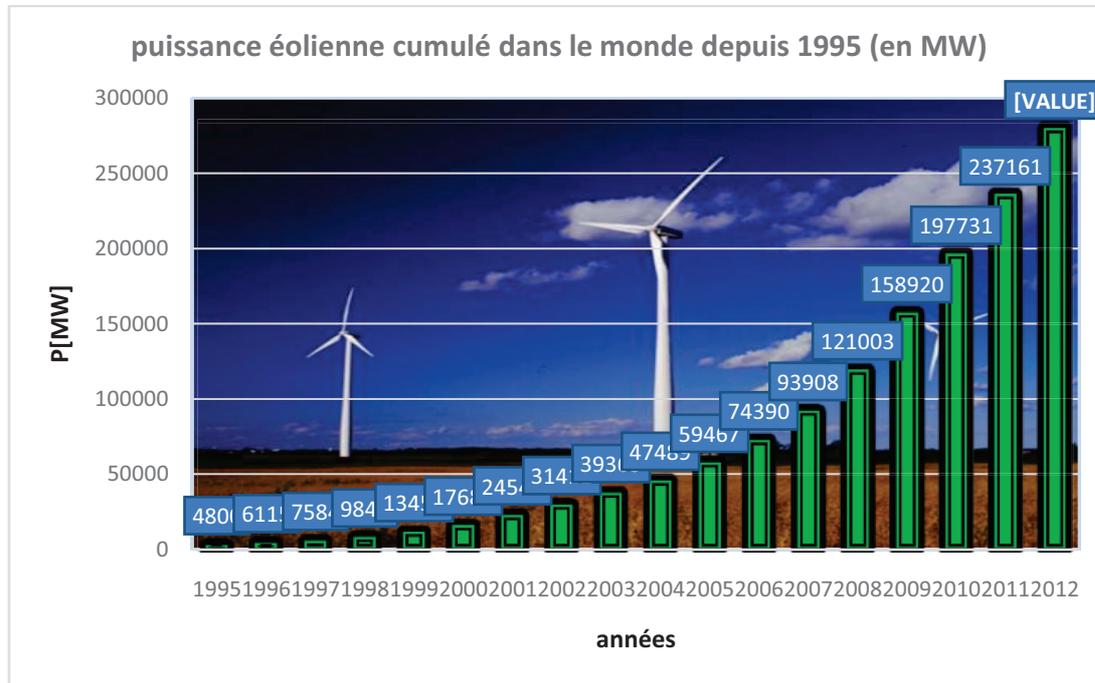


Figure I.1: Capacité mondiale installé en MW [4]

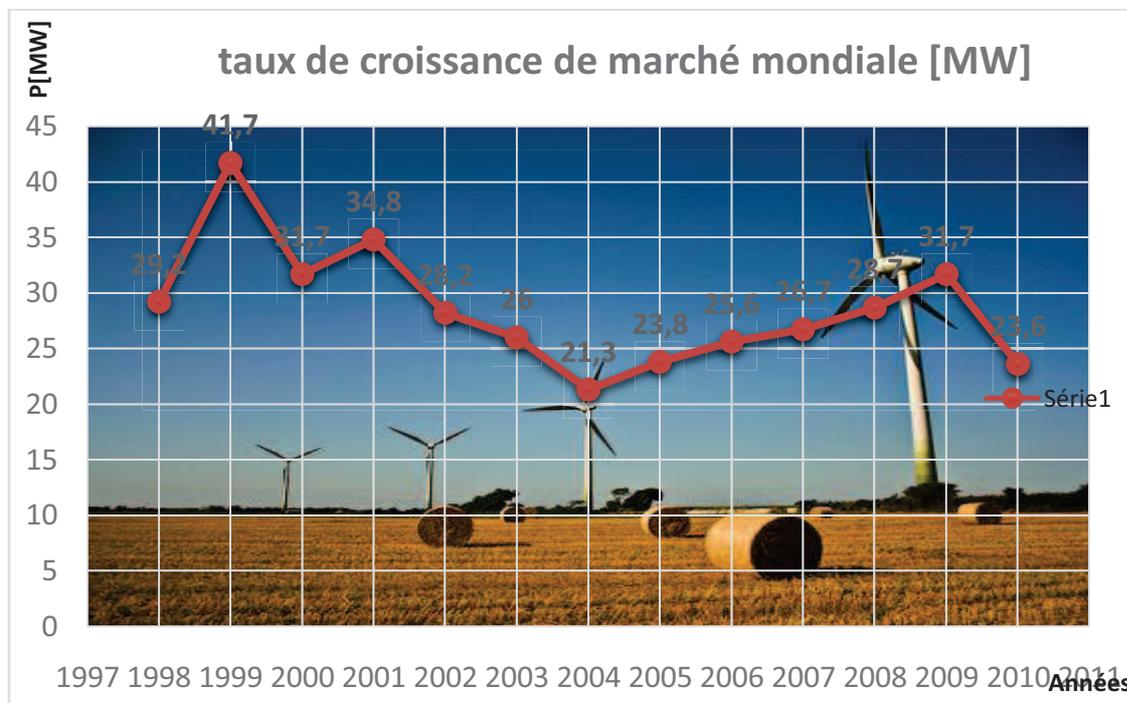


Figure I. 2 : Taux de croissance du marché mondial [5]

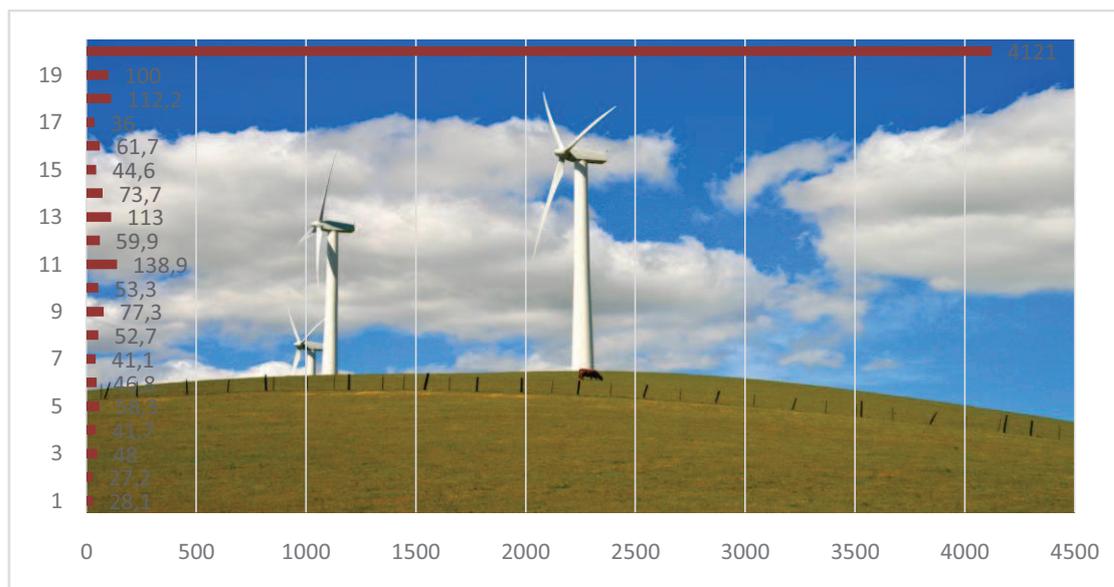


Figure I.3: Les 10 premières capacités en [MW]

Avant 2010, le taux de croissance annuel n'avait cessé de croître depuis 2004, culminant à 31.7% en 2009, la plus forte valeur depuis 2001. Le plus fort taux de croissance de 2010 se trouve en Roumanie, qui a multiplié sa capacité par 40. La seconde région au taux de croissance de plus de 100% est la Bulgarie (+112%).

En 2009, quatre marchés avaient plus que doublé leur capacité éolienne : Chine, Mexique, Turquie et Maroc. Après la Chine, les plus fortes croissances se situent en Europe de l'Est et en Europe du Sud Est : Roumanie, Bulgarie, Turquie, Lituanie, Pologne, Hongrie, Croatie, Chypre et Belgique

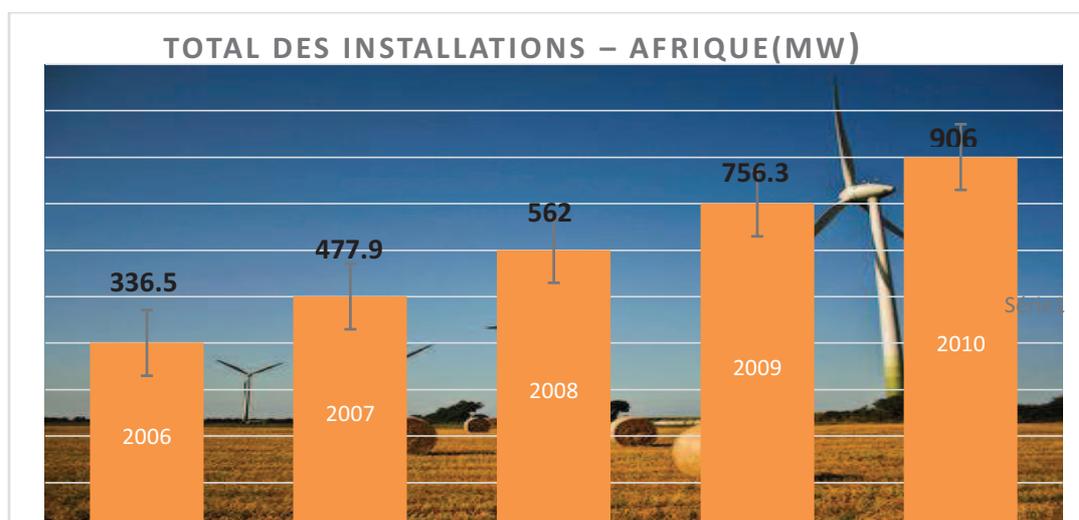


Figure I.4: Total des installations – Afrique (MW)

I.4. L'énergie Eoliennes en Algérie

Les premiers travaux Algériens sur le potentiel éolien ont été publiés en 1984, suivis en 1985, en 1990, en 1994 et 2002. [6]

I.4.1. Répartition régionale de la vitesse du vent

Pour installer une éolienne il faut choisir un site où la vitesse du vent fournirait l'énergie nécessaire; nous devons donc faire des mesures de la vitesse du vent dans plusieurs sites. La Figure I.5 montre un exemple des régions ventées en Algérie d'après les données satellitaires du Laboratoire d' Energie Eolienne du Centre de Recherche en Energies Renouvelables (CDER, Algérie).

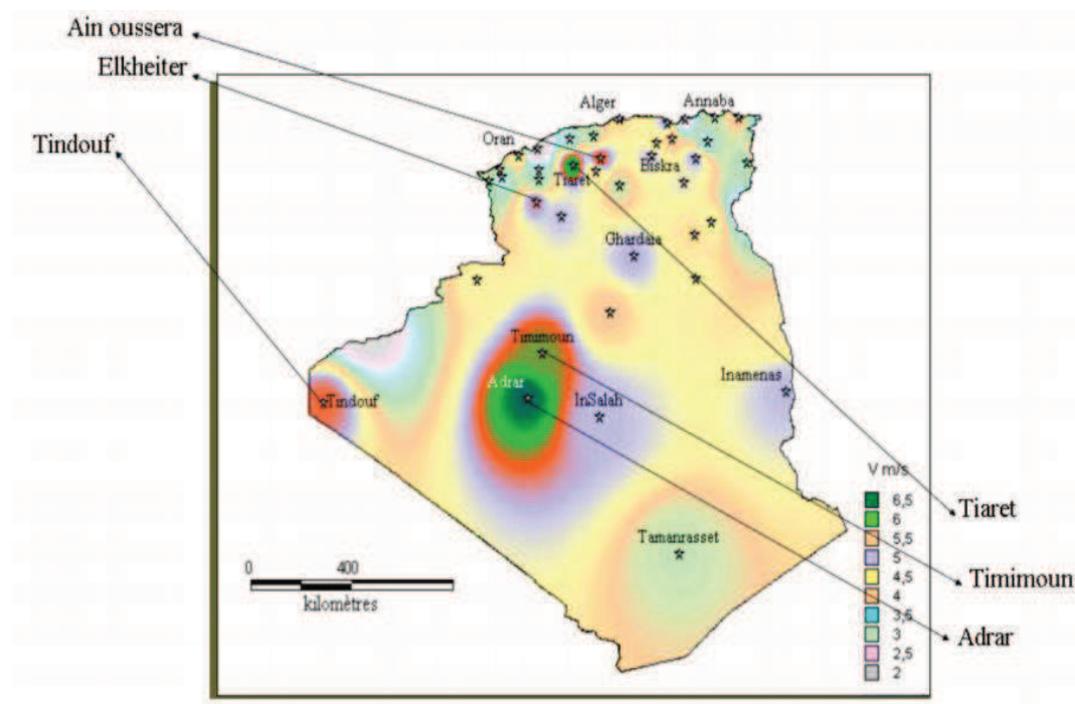


Figure I.5: régions ventées en Algérie

D'après les données du CDER, la figure I.6 indique les vitesses des vents pour différents sites situés en Algérie.

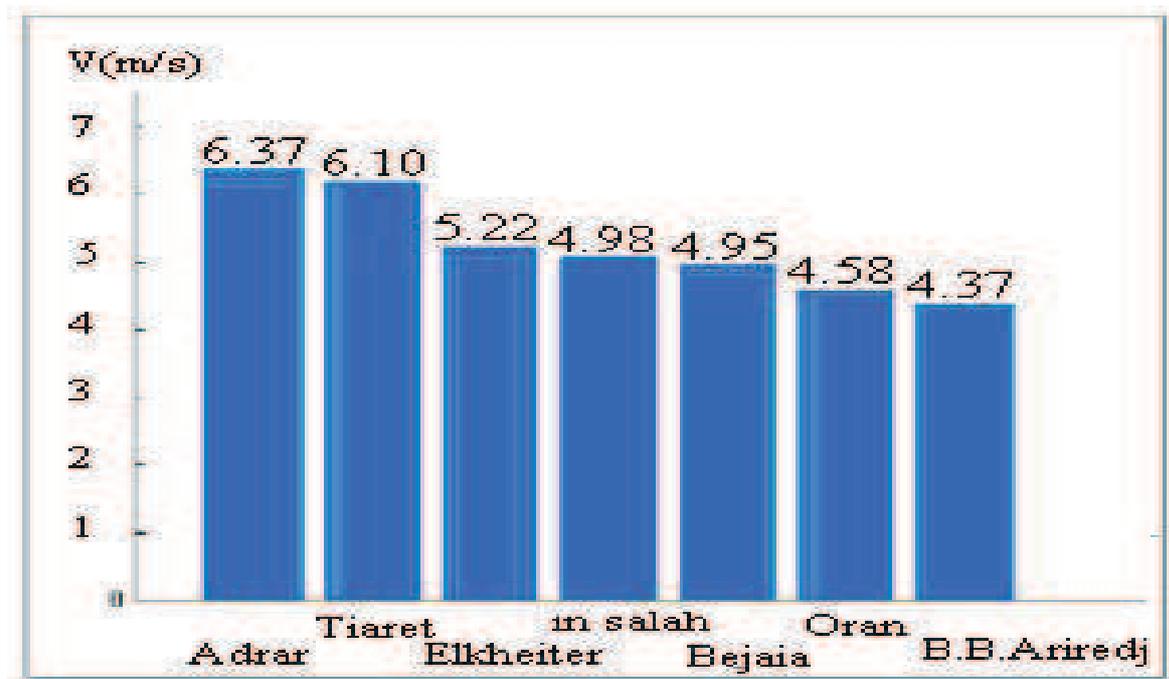


Figure I.6 : Comparaison entre les vitesses moyennes de sites ventés

I.4.2 L'Atlas de la puissance en Algérie

La figure ci-dessous (Figure I.7) représente l'atlas de la puissance énergétique récupérable à 50 m d'altitude en Algérie. [7]

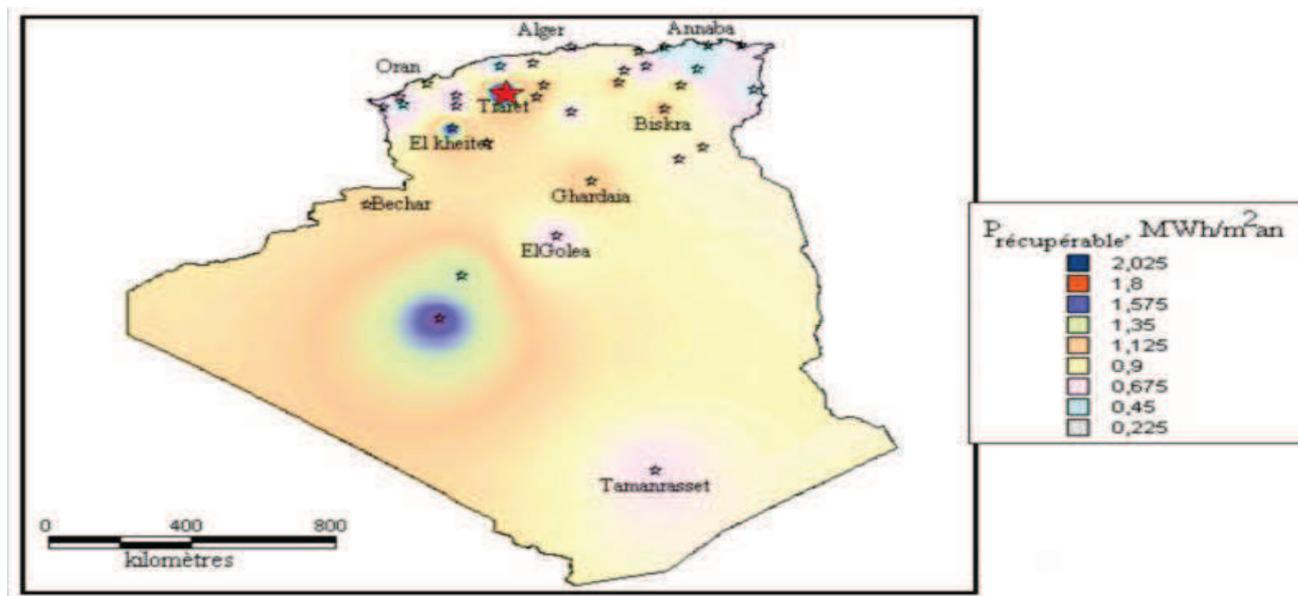


Figure I.7 : Puissance énergétique récupérable en altitude à 50 m Algérie.

L'Algérie présente un potentiel éolien considérable qui peut être exploité pour la production d'énergie électrique, surtout dans le sud où les vitesses de vents sont élevées et peuvent dépasser 4m /s (6m/s dans la région de Tindouf), et jusqu'à 7m /s

dans la région d'Adrar. Les ressources énergétiques de l'Algérie ont déjà été estimées par le CDER (laboratoire de l'énergie éolienne) depuis les années 90 à travers la production des atlas de la vitesse du vent et du potentiel énergétique éolien disponible en Algérie.

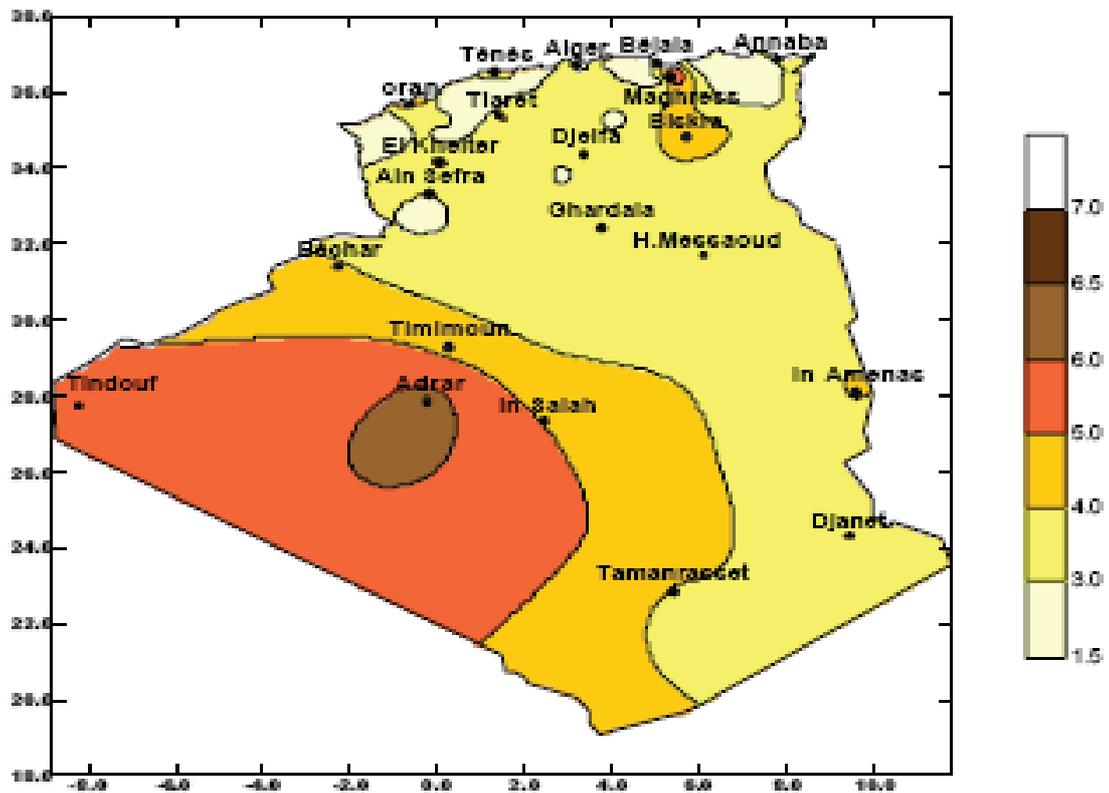


Figure I.8 : Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s) en Algérie.

La figure suivante représente une comparaison de puissances entre les sites ventés en Algérie

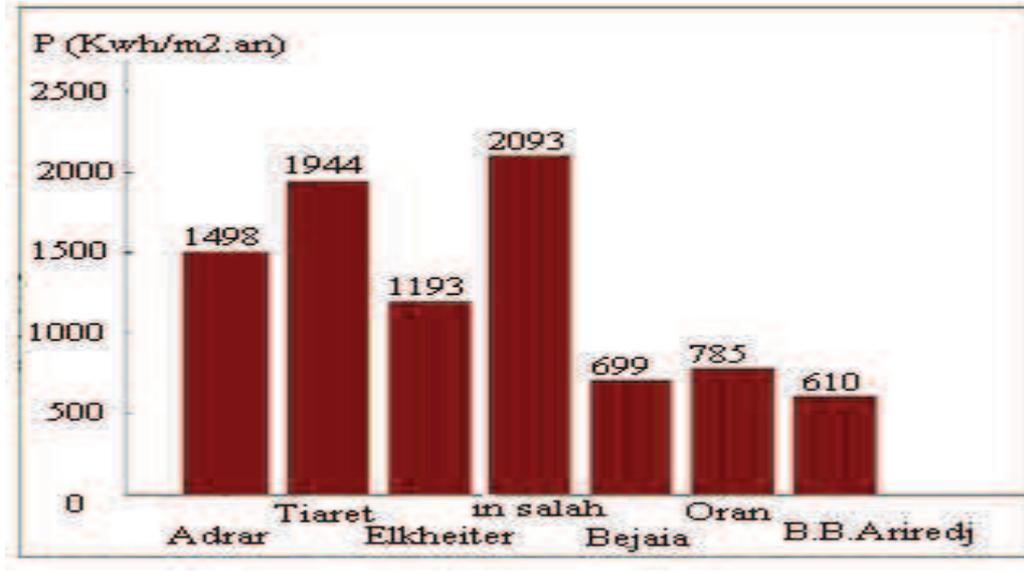


Figure I.9 Comparaison des puissances récupérables des Sites Ventés :

I.5. Descriptif d'une éolienne

L'éolienne est composée de deux parties : une partie mobile le rotor et une partie fixé le stator, permettant de créer un champ magnétique et de générer un courant électrique. L'éolienne est équipée d'une girouette permettant l'orientation des pales en fonction de la direction du vent [8], [9]. Une éolienne "classique" est généralement constituée de :

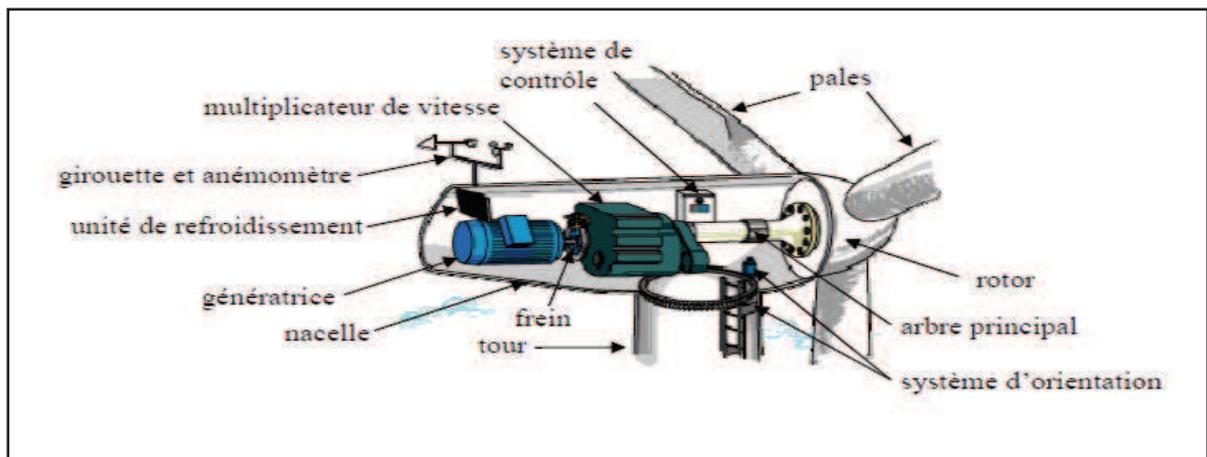


Figure I.10: élément constitution d'une éolienne

1-Le mat ou la tour : c'est un tube d'acier, il doit être le plus haut possible pour bénéficier d'une part du maximum de l'énergie cinétique du vent et de l'autre part pour

éviter les perturbations près du sol. Au sommet du mat se trouve la nacelle.

2-La nacelle : regroupe les éléments mécaniques permettant de coupler la génératrice électrique à l'arbre de l'éolienne.

3-Le multiplicateur de vitesse: sert à adapter la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique

4-unité de refroidissement: se compose généralement d'un ventilateur électrique utilisé pour Refroidir la génératrice, et d'un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur.

5-La génératrice : c'est l'élément principal de la conversion mécano électrique qui généralement une machine synchrone (GS) ou asynchrone (GAS) avec le rotor bobiné ou à cage (GOS) à aimant permanent (GS). La puissance électrique de cette génératrice peut varier entre 600 kW et 2.5 MW.

6-Le système de contrôle: qui contrôle en permanence le bon fonctionnement de l'éolienne et qui intervient automatiquement, en cas de défaillance pour l'arrêter.

7-Un arbre: qui relie le moyeu au multiplicateur, il contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.

8-Un système d'orientation des pâles: qui sert à la régulation de la puissance (réglage aérodynamique). En plus de ces éléments la turbine est munie des pâles fixes ou orientables et qui tournent à des vitesses nominales inférieures à 40 tr/mn.

I.6. Différent type d'éoliennes :

Le tableau (I.1) suivant présent une classification des turbines [10]:

Echelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délivrée
Petite	Moins de 12m	Moins de 40 KW
Moyenne	12m à 45m	De 40kW à 1Mw
Grand	46m et plus	1Mw et plus

Tableau (I.1): Classification de turbines éoliennes

Les turbines éoliennes sont classées selon la disposition géométrique de leur arbre sur lequel est montée l'hélice. Il existe principalement deux types de Turbines éoliennes [11]:

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

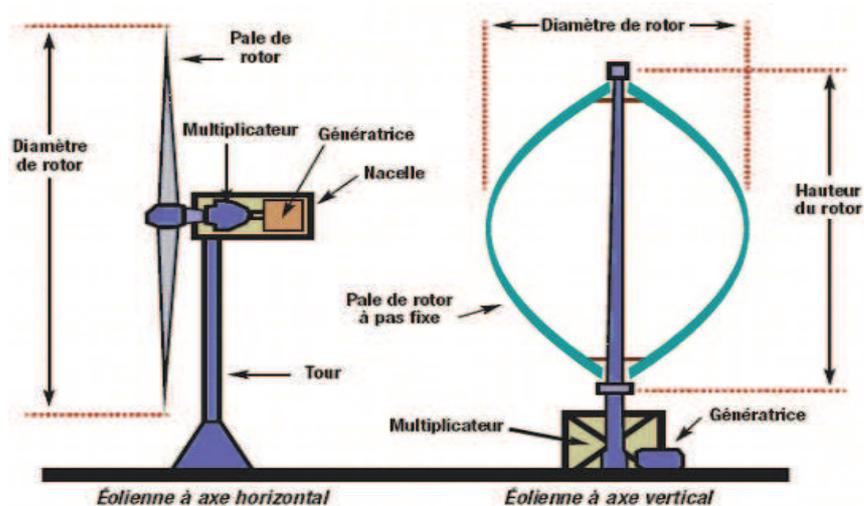


Figure I.11 : deux types des éoliennes [12]

I.6.1. Eolienne à axe vertical : les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol ce qui facilite l'accessibilité de dépannage en cas de dysfonctionnement.

Néanmoins elles restent marginales et peu utilisées voir abandonnées actuellement à cause de sa faible vitesse, des turbulences qui affectent le capteur d'énergie situé au près du sol, et de la surface importante qu'elles occupent au sol pour les éoliennes de grande puissance. [13]

I.6.2. Eolienne à axe horizontal : Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion ces éoliennes peuvent être classifiées en deux catégories :



Figure I.12 : Eolienne lente

Figure I.13: Eolienne rapide

a-éoliennes lentes: sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40). Les pales couvrent presque toute la surface de la roue.

Elles servent généralement au pompage pour alimenter en eau le bétail dans les vastes plains, elles sont adaptées aux vents de faible vitesse.

La puissance maximale obtenue par ce type de machine peut se calculer en fonction du diamètre par l'expression suivante. [13]

$$P = 0.15 * D^2 * V^3 \quad (I.1)$$

Puissance étant exprimée en Watts, le diamètre en mètre et la vitesse du vent en m/s.

b-éoliennes rapides: Les éoliennes rapides ont un nombre de pales assez réduit, qui varie en général entre 2 et 4 pales. Elles sont les plus utilisées dans la production d'électricité en raison de leur efficacité, de leur poids (moins lourdes comparées à une éolienne lente de même puissance) et de leur rendement élevé. Elles présentent, par contre, l'inconvénient de démarrer difficilement.

Formule pratique pour une éolienne rapide à axe horizontal :

$$P = 0.2 * D^2 * V^3 \quad (I.2)$$

I.7. Avantages et inconvénients d'une éolienne :

I.7.1. Les avantages :

-L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre qui ne nécessite aucun carburant, ne crée pas de gaz à effet de serre et ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs. En luttant contre le changement climatique, l'énergie éolienne participe à long terme au maintien de la biodiversité des milieux naturels.

-L'énergie éolienne produit de l'électricité éolienne. Sans dégrader la qualité de l'air, sans polluer les eaux (pas de rejet dans le milieu aquatique, pas de pollution thermique), sans polluer les sols.

-Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. En effet elle répond au besoin urgent d'énergie surtout pour les zones isolées. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles. Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà

-La production éolienne d'électricité suit notre consommation d'énergie: le vent souffle plus souvent en hiver, cette saison étant celle où la demande d'électricité est la plus forte.

-L'énergie éolienne est l'une des sources de production d'électricité permettant de parvenir à moindre coût à la réalisation des objectifs que s'est fixée l'Union Européenne pour 2020 : 20% d'énergies renouvelables (éolienne et autres) dans la consommation globale d'énergie.

-L'électricité éolienne garantit une sécurité d'approvisionnement face à la variabilité des prix du baril de pétrole.

-L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle.

-C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables

I.7.2. Les inconvénients:

-L'électricité éolienne est une énergie intermittente, l'énergie éolienne ne suffit pas en elle-même à définir une politique énergétique et environnementale.

-Des effets sur le paysage (esthétique), problème de bruit, d'interférences électromagnétiques.

-L'énergie éolienne est dépendante de la topographie, de la météo et de l'environnement.

I.8. Application des éoliennes :

Une éolienne est une machine capable de récupérer l'énergie cinétique présente dans le vent. Cette énergie sera transformée en énergie mécanique de rotation en tenant compte de rendement de la machine. Ce dernier peut exploiter de deux manières :

-Directement pour entraîner une pompe.

-Pour entraîner une génératrice électrique.

Dans le cas de production d'énergie électrique deux cas d'énergie se présentent :

-stockée dans des accumulateurs.

-Utilisé directe sur réseau de distribution.

L'énergie éolienne sert d'un coté de complément aux moyens traditionnels de production, d'un autre coté à la production pour alimenter les sites non raccordés.

I.9. Taille des aérogénérateurs :

Avant le développement récent et le besoin de fournir des puissances croissantes au réseau, les constructeurs et les chercheurs mettent au point des éoliennes de plus en plus Puissantes donc plus grandes, figure (I.14). Pour utiliser le maximum de la force du vent, on cherche à ce que l'hélice balaie une surface où le vent est maximum, pour cela les éoliennes sont très haut perchées pour ne pas subir les effets de sol qui freinent le vent.

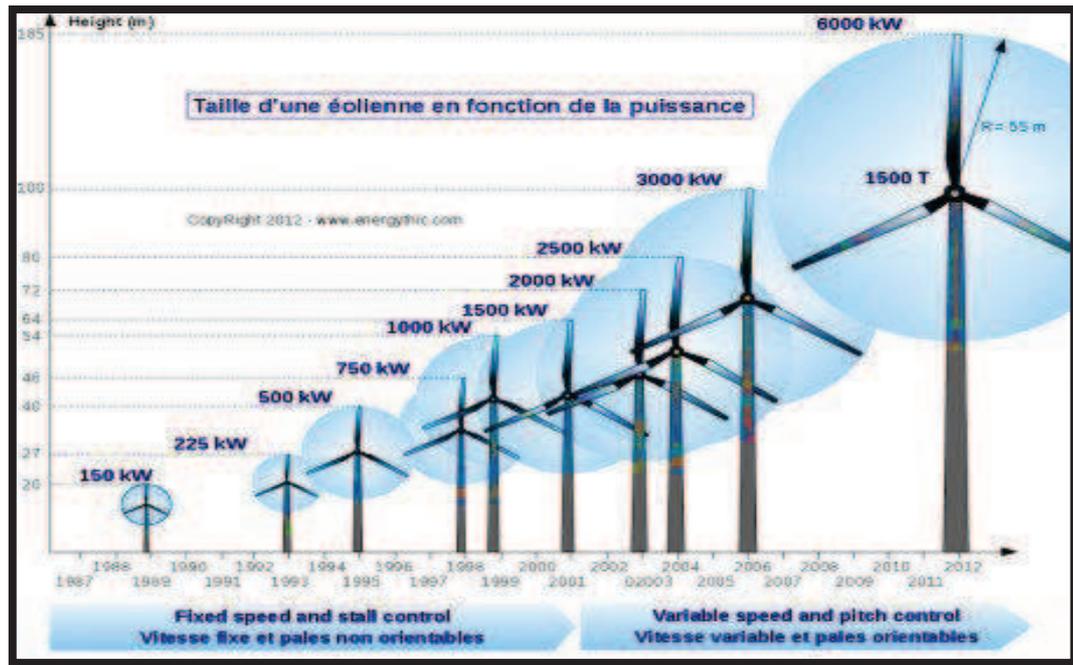


Figure I.14 : Evolution de la taille des éoliennes

I.10. Conversion de l'énergie éolienne :

I.10.1. Principe :

Une éolienne est constituée d'une partie tournante, le rotor, qui transforme l'énergie cinétique en énergie mécanique, en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil se compose d'une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite. La puissance mécanique est ensuite transformée soit en puissance hydraulique par une pompe, soit en puissance électrique par une génératrice. [14]

I.10.2 .effort sur une pale d'éolienne:

L'action de l'air en mouvement va se traduire par des forces appliquées en chaque point de la surface. Les pales ont un profil aérodynamique présenté sur le schéma de la Figure I.1 [15]

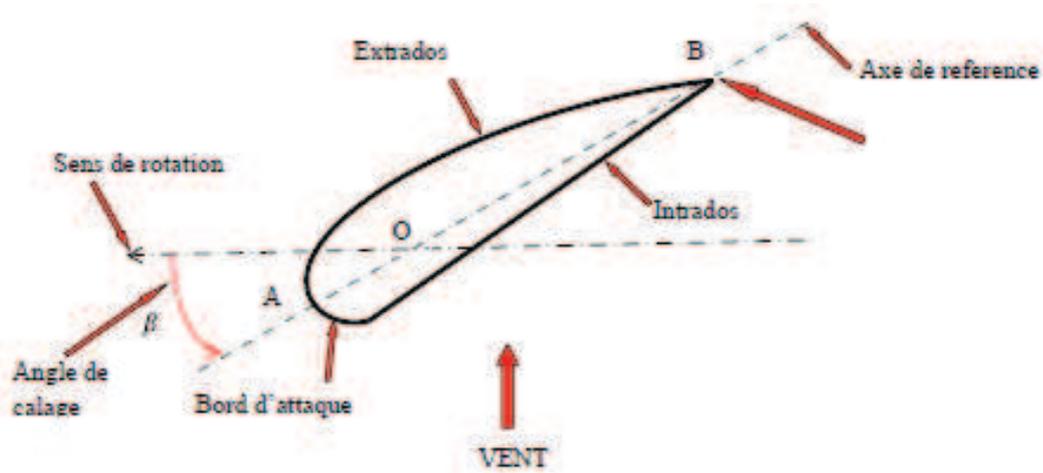


Figure I.15: Eléments caractéristiques d'une pale

On remarque plus particulièrement les éléments suivants :

- ✓ Corde: longueur l du profil du bord d'attaque au bord de fuite.
- ✓ Angle de calage β (inclinaison de l'axe de référence par rapport au plan de rotation).
- ✓ Extrados: dessus des pales
- ✓ Intrados: dessous des pales

Les profils sont généralement de type plan-convexe (l'intrados est plan alors que l'extrados est convexe) ou alors biconvexe (l'intrados et l'extrados sont convexes). Ils sont normalisés et les paramètres sont bien définis. [15]

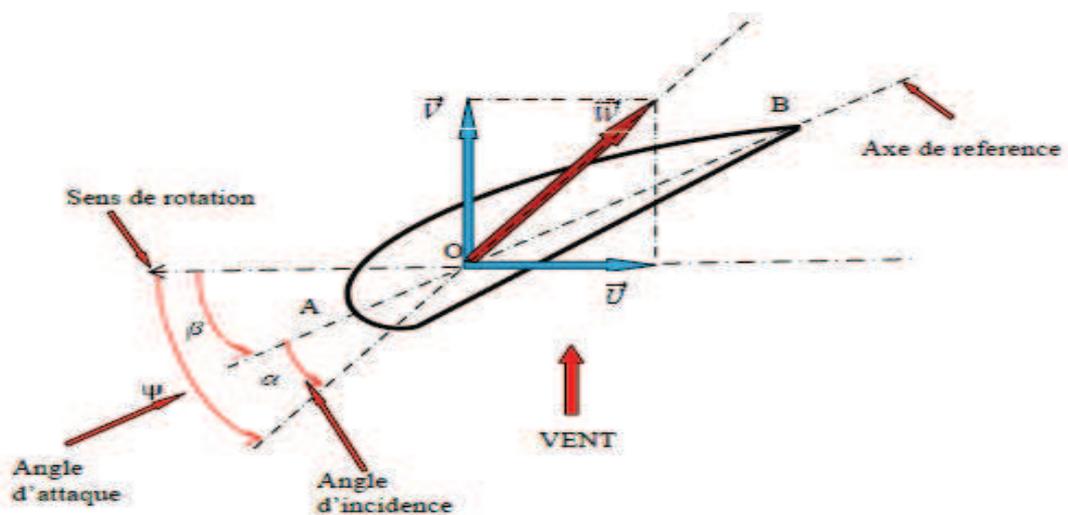


Figure I.16: Directions du vent sur un tronçon de pale

La résultante du vent (apparent) \vec{w} :

$$\vec{W} = \vec{V} + \vec{U} \quad (I.3)$$

La vitesse du vent apparent W fait un angle d'attaque Ψ avec le plan de rotation. Cet angle s'écrit:

$$\Psi = \arctg\left(\frac{V}{U}\right) \quad (I.4)$$

On introduit alors l'angle dit d'incidence, noté entre l'axe de référence de la pale et la direction du vent apparent α

$$\alpha = \Psi - \beta \quad (I.5)$$

Ainsi les efforts sur une pale illustrée par la figure ci-dessous

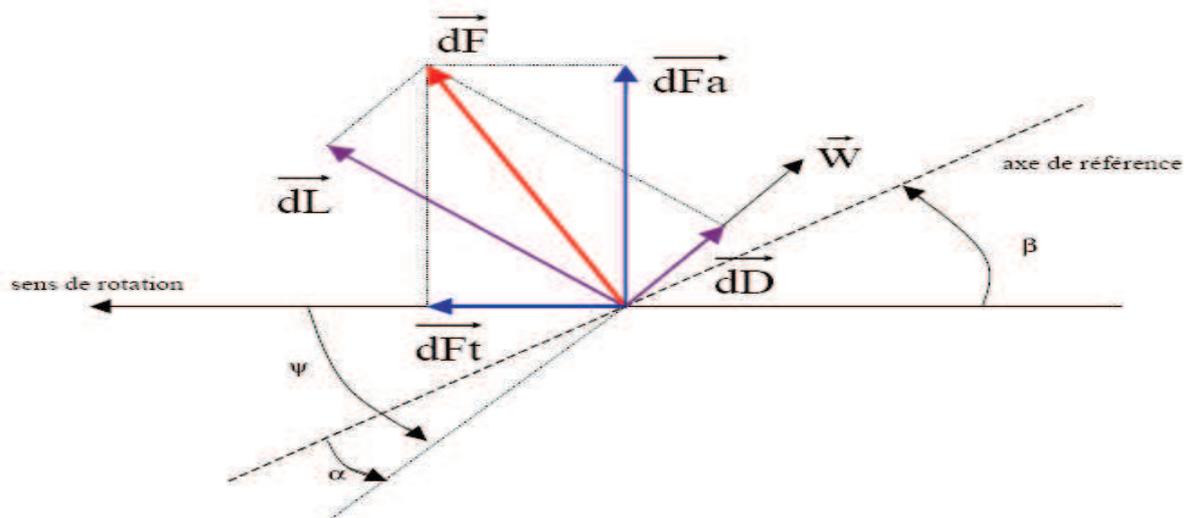


Figure I.17: Forces appliquées sur un tronçon de pale

On peut décomposer la force résultante \vec{dF} de la manière suivante [16]:

- la portance \vec{dL} normale à la direction du vent apparent.
- La force de traînée \vec{dD} parallèle à la direction du vent.

On peut aussi la décomposer d'une autre manière

La poussée axiale \vec{dF}_a , perpendiculaire au plan de rotation.

La poussée tangentielle \vec{dF}_t , dans la direction de rotation.

On déduit aisément les expressions de la poussée axiale et tangentielle en fonction de la portance et de la traînée

$$\begin{aligned}dF_t &= dL \sin(\Psi) - dD \cos(\Psi) \\dF_a &= dL \cos(\Psi) + dD \sin(\Psi)\end{aligned}\tag{I.6}$$

C'est le couple résultant des forces tangentielles qui va provoquer la rotation de la turbine.

Les modules des forces dL et dD

$$\begin{aligned}dL &= \frac{1}{2} \rho W^2 dA C_L \\dD &= \frac{1}{2} \rho W^2 dA C_D\end{aligned}\tag{I.7}$$

Avec :

- dA : Surface du « tronçon » de la pale
- C_L : Coefficient de portance (sans dimension)
- C_D : Coefficient de traînée (sans dimension)
- W : Module du vent apparent

Ces coefficients C_L et C_D dépendent fortement de l'angle d'incidence α . Pour des angles à faibles, l'écoulement de l'air le long de la pale est laminaire et est plus rapide sur l'extrados que sur l'intrados. La dépression qui en résulte à l'extrados crée la portance. C'est cette force qui soulève un avion et qui lui permet de voler. Ici, elle « aspire » la pale vers l'avant. Si α augmente, la portance augmente jusqu'à un certain point puis l'écoulement devient turbulent. Du coup, la portance résultant de la dépression sur l'extrados disparaît. Ce phénomène s'appelle le décrochage aérodynamique. Cependant, les concepteurs de pales ne se préoccupent pas uniquement de la portance et du décrochage. Ils prêtent également beaucoup d'attention à la résistance de l'air, appelée aussi dans le langage technique de l'aérodynamique, la traînée. La traînée augmente en général si la surface exposée à la direction de l'écoulement de l'air augmente. Ce phénomène apparaîtra ici pour des angles α importants.

I.10.3 Loi de betz :

L'éolienne ne récupère qu'une partie de la puissance du vent déterminée par le physicien allemand betz qui montre que cette partie de la puissance présente un maximum de $16/27$ soit environ 59% de l'énergie totale du vent.

Le coefficient $C_p(\lambda, \beta)$ diffère pour chaque éolienne, dépend de l'angle d'inclinaison des pales et de vitesse spécifique normalisée.

La proposition de betz être plus claire avec la représentation de passage de l'air en amont et en aval de l'aérogénérateur (le système a axe horizontal) par un tube de courant

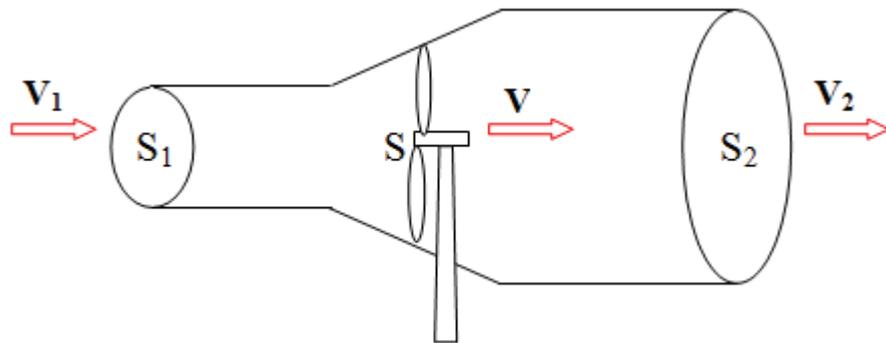


Figure I.18 : tube de courant autour d'une éolienne

V_1 : la vitesse du vent avant les de l'éolienne.

V_2 : la vitesse du vent après le prélèvement de l'énergie par les pales de l'éolienne.

V : la vitesse du vent au niveau des pales de l'éolienne.

Pour retrouver la puissance maximale aérodynamique en faisant une démonstration mathématique :

La puissance captée sur l'éolienne est correspond à la variation d'énergie cinétique du vent.

$$\frac{\Delta E_c}{\Delta t} = \frac{1}{2} \rho S V_{\text{vent}} (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{I. 8})$$

m : La masse d'air présentée par :

$$m = \rho S V_{\text{vent}} \quad (\text{I. 9})$$

D'autre part, l'effort qui s'applique sur l'éolienne crée une puissance aérodynamique.

Le théorème de la quantité de mouvement donne :

$$F = \rho S V_{\text{vent}} (V_1 - V_2) \quad (\text{I. 10})$$

Donc la puissance par l'aérogénérateur

$$P_{\text{aéro}} = F V_{\text{vent}} = \rho S V_{\text{vent}} (V_1 - V_2) V_{\text{vent}} \quad (\text{I. 11})$$

La puissance aérodynamique est égale à la variation de l'énergie cinétique E_c de la masse d'air :

$$\rho S V_{\text{vent}} (V_1 - V_2) V_{\text{vent}} = \frac{1}{2} \rho S V_{\text{vent}} (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{I. 12})$$

Par simplification:

$$V_{\text{vent}} (V_1 - V_2) = \frac{1}{2} (V_1 - V_2)(V_1 + V_2) \quad (\text{I. 13})$$

Donc :

$$V_{\text{vent}} = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (\text{I. 14})$$

L'expression de la puissance aérodynamique devient :

$$P_{\text{aéro}} = \rho S \frac{(V_1 + V_2)^2}{4} (V_1 - V_2) = \rho S \frac{V_1 + V_2}{4} (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{I. 15})$$

La puissance est maximale pour V_2 :

$$\frac{dP_{\text{aéro}}}{dV_2} = 0$$

Ce qui donne :

$$-3 V_2^2 - 2 V_1 V_2 + V_1^2 = 0 \quad (\text{I. 16})$$

Après la résolution de cette équation du deuxième ordre, seulement la solution positive sera prendre :

$$V_2 = \frac{V_1}{3} \quad (\text{I. 17})$$

La nouvelle expression de P_{aero} :

$$P_{\text{aero}} = \rho S V_1^3 \left(\frac{8}{27} \right) \quad (\text{I. 18})$$

Le coefficient de puissance maximale alors extraite :

$$P_{\text{aero}} (\text{max}) = \rho S V_1^3 \left(\frac{8}{27} \right) = \frac{1}{2} \rho S C_{p_{\text{max}}} V_1^3 \quad (\text{I. 19})$$

Par identification :

$$C_{p_{\text{max}}} = \frac{16}{27} \approx 0.59 \quad (\text{I. 20})$$

Le coefficient de puissance représente le ratio entre la puissance d'aérogénérateur et la puissance disponible dans le vent :

$$C_p = \frac{P_{\text{aero}}}{P_{\text{vent}}} \quad (\text{I. 21})$$

La puissance maximale du aérogénérateur sera égale à :

$$P_{\text{aero}} (\text{max}) = \frac{16}{27} \frac{1}{2} \rho S V_1^3 \quad (\text{I. 22})$$

I.11.Intérêt de la Régulation de puissance mécanique de l'éolienne :

Pour une exploitation parfaite de l'énergie disponible dans le vent différents mécanismes de régulation et de control mécanique étaient développés.

Ces différents mécanismes génèrent de plusieurs caractéristiques aérodynamiques comme l'angle de calage et plus précisément le coefficient de puissance afin de maintenir la puissance autour de sa valeur nominale. Cependant l'éolienne ne produit pas le maximum de puissance sur toute sa plage de fonctionnement.

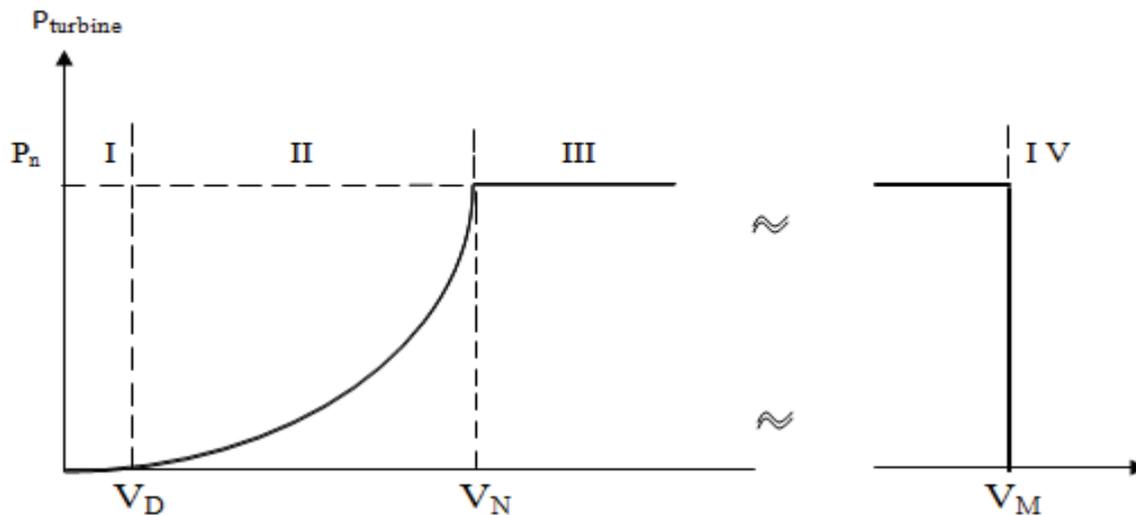


Figure I.19 : la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent

Ainsi la caractéristique de puissance en fonction de la vitesse du vent comporte quatre zones :

- a zone I : ou $p_{\text{turbine}}=0$ (la turbine ne fournit pas de puissance) ;

-la zone II : dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent V_w .

-la zone III : ou généralement la vitesse de rotation est maintenue constante par un dispositif de régulation et ou la puissance p_{turbine} fournie reste sensiblement égale à p_n ;

-la zone IV : dans laquelle le système de sureté du fonctionnement arrête la rotation et le transfert de l'énergie.

La plupart des grandes turbines éolienne utilisent deux principes de contrôle aérodynamique pour limiter la puissance extraite à la valeur de la puissance nominale de la génératrice :

-Système « pitch» ou « à pas ou calage variable» qui permet d'ajuster la portance des pales à la vitesse du vent, principalement pour maintenir une puissance sensiblement constante dans la zone³ de vitesse.

-Système « stall » ou à « décrochage aérodynamique », le plus robuste car c'est la forme des pales qui conduit à une perte de portance au-delà d'une certaine vitesse de vent, mais la courbe de puissance maximale n'est pas plate et chute plus vite. Il s'agit donc d'une solution passive et robuste (pas besoin de système d'orientation des pales). Chez certains fabricants de grandes machines, un système hybride se développe, la « stalle active », dans lequel le décrochage aérodynamique est obtenu progressivement grâce à une orientation minime des pales nécessitant des moyens de réglage plus économique et plus robustes que dans le système pitch.

I.12.Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons introduit les systèmes éoliens et leur exploitation mondiale en générale puis particulièrement en Algérie. Nous avons aussi donné le principe de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie aérodynamique et en fin nous avons mentionner l'intérêt de la commande de la vitesse d'une éolienne.

Chapitre II

Modélisation du système éolien

II.1 Introduction :

La conversion d'énergie d'une éolienne est caractérisée par trois éléments principaux qui sont : la turbine (le moyeu et les pales), le multiplicateur et le générateur, et peut être schématisée comme le montre la Figure II.1

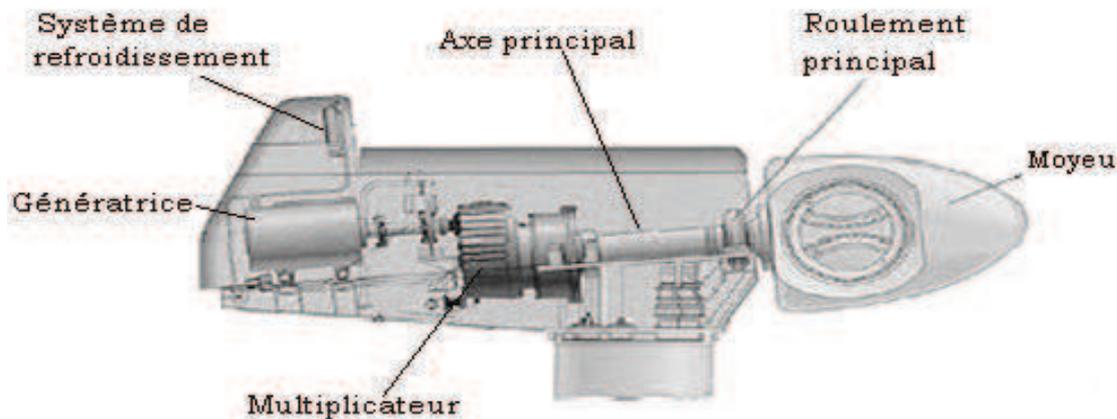


Figure II.1 : schéma de l'éolienne

Dans ce chapitre nous présenterons la modélisation puis nous décrirons les modèles mathématiques de ces éléments et nous terminons par un modèle du vent.

Les différents sous-systèmes de l'éolienne seront présentés dans ce qui suit.

II.2. Modélisation du système électrique:

Le sous-système électrique de l'éolienne est composé de la génératrice et d'un module d'électronique de puissance et a pour rôle de convertir l'énergie mécanique au niveau de la turbine en énergie électrique.

Sur les systèmes éoliens d'aujourd'hui, on peut distinguer essentiellement l'utilisation de deux types de machines électriques : les machines synchrones et les machines asynchrones sous leurs diverses variantes [17], [18]. Ces dernières sont réservées aux éoliennes raccordées au réseau.

Les dynamiques des machines électriques et des systèmes d'électronique de puissance qui y sont associés sont beaucoup plus rapides que celles des autres parties de l'aérogénérateur. Et, étant donné que les dynamiques dominantes sont essentiellement imposées par le sous-système mécanique, le système éolien sera

considéré en tant qu'une structure mécanique [19]. Par la suite, le générateur sera caractérisé par le fait que son couple électromagnétique C_{em} peut être pris à tout instant égal à sa valeur de référence [20].

$$C_{em} = C_{em-ref} \quad (II.1)$$

La puissance électrique P sera égale au produit du couple électromagnétique C_{em} par la vitesse de rotation de la génératrice Ω_g

$$P = C_{em} \Omega_g \quad (II.2)$$

II.3. Multiplicateur

Le multiplicateur de vitesse existe dans la plupart des éoliennes commercialisées. En effet, quand le diamètre du rotor est grand, les vitesses de rotation sont trop faibles [21]. Il est alors indispensable d'intercaler un multiplicateur entre la turbine et la génératrice afin d'adapter les deux vitesses de rotation au même ordre de grandeur.

Il s'agit d'un dispositif très complexe que nous avons modélisé très simplement par un gain entre le couple aérodynamique C_{aero} et le couple électromagnétique C_{em} :

$$C_{em} = \frac{C_{aero}}{G_g} \quad (II.3)$$

G_g : Étant le gain du multiplicateur.

On en déduit la relation suivante entre la vitesse de rotation de la turbine Ω_T et celle de la génératrice G_g

$$\Omega_T = \frac{\Omega_g}{G_g} \quad (II.4)$$

II.4. Modélisation du sous-système aérodynamique

L'éolienne ne récupère qu'une partie de la puissance du vent déterminée par un coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta) < 1$. La puissance aérodynamique aura alors l'expression simplifiée suivante :

$$P_{aero} = \frac{\rho S V^3}{2} C_p(\lambda, \beta) \quad (II.5)$$

Avec:

- ρ [Kg/m³] : la densité de l'air ($\approx 1,22$ Kg/m³ à 15°C),

- $S[m^2]$: la surface circulaire balayée par la turbine, et dont le rayon R_T est déterminé par la longueur de la pale ($S = \pi R_T^2$)
- $V_V[m/s]$: est la vitesse du vent,
- $\lambda[rad]$: le ratio de vitesse (rad), défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales Ω_T et la vitesse du vent v ,

$$\lambda = \frac{\Omega_T R_T}{V_V} \quad (II.6)$$

- $\beta[^\circ]$: l'angle d'orientation de la pale,
- $C_p(\lambda, \beta)$: le coefficient de puissance qui est une fonction fortement non linéaire de λ et β définie par les courbes caractéristique de la figure II.2

L'expression utilisée pour la puissance est simplifiée. D'une part, les phénomènes aérodynamiques mis en jeu sont trop complexes pour être modélisés finement par ce type d'expression. D'autre part, le vent n'est absolument pas homogène sur toute la surface balayée par les grandes éoliennes ($S = \pi R_T^2$). Cependant, c'est l'expression qui est utilisée le plus couramment dans la littérature pour calculer les lois de commande.

Le couple aérodynamique extrait par la turbine est défini par l'équation suivante :

$$C_{aero} = \frac{P_{aero}}{\Omega_T} \frac{\rho S R_T V_V^2}{2\lambda} C_p(\lambda, \beta) \quad (II.7)$$

L'expression du C_p est donné en ANNEXE, les résultats de simulation MATLAB des variations de C_p sont montres par la figure ci- dessous.

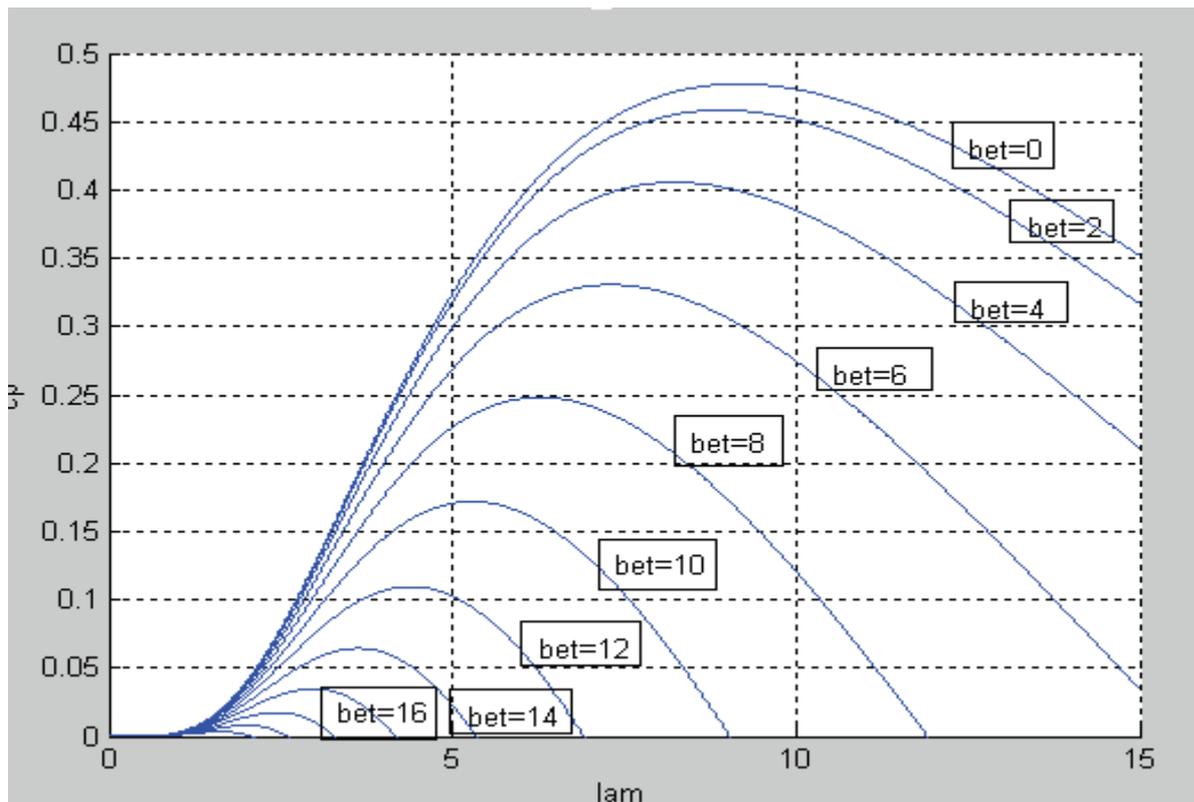


Figure II.2 : courbe de C_p fonction de λ et β

D'après ce résultat le C_p présente d'une part et d'autre part un maximum en fonction du ratio de vitesse λ , et d'autre part le C_p est inversement proportionnel à la variation de l'inclinaison des pales β .

Par ailleurs la modélisation du système éolienne présente deux cas selon la nature de la transmission entre la turbine et la génératrice :

- ✓ Rigide si l'accouplement est assuré seulement par un multiplicateur de vitesse.
- ✓ Souple si l'accouplement est assuré par un multiplicateur plus un système amortisseur- ressort.

Nous présentons dans ce qui suit la modélisation de ces deux modèles.

II.4.1. Modèle de transmission rigide :

La modélisation en transmission rigide ne considère que l'inertie totale J constituée de l'inertie J_T de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de

l'inertie

J_g du

générateur

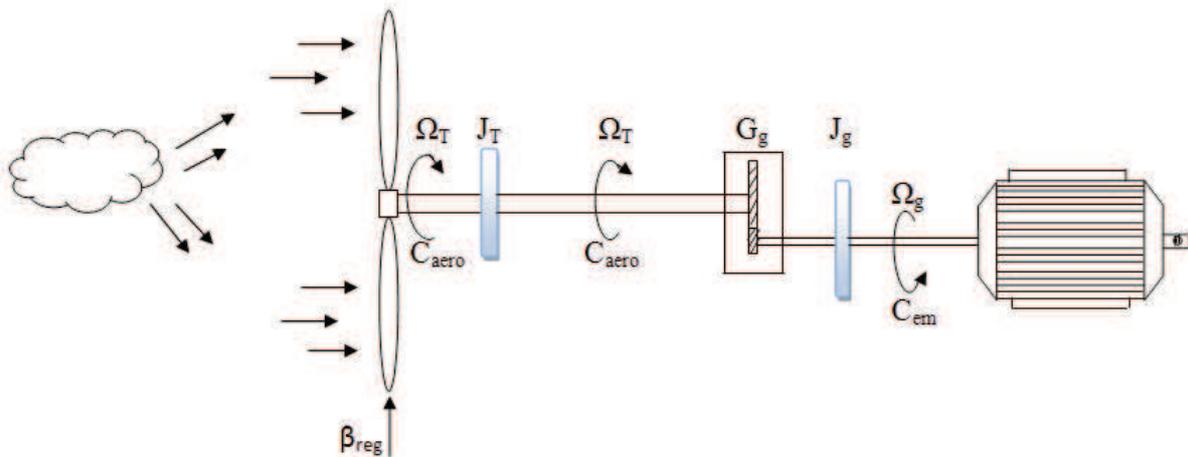


Figure II.3: Modèle rigide de l'éolienne

Cette inertie est exprimée par la formule suivante :

$$J = \frac{J_T}{G_g^2} + J_g \quad (\text{II. 8})$$

On définit le modèle de la partie mécanique en transmission rigide par l'équation (II.9)

$$J \frac{d\Omega_T}{dt} = C_{aero} - G_g C_{em} \quad (\text{II. 9})$$

Le modèle rigide est alors représenté par le schéma blocs de la Figure II.4

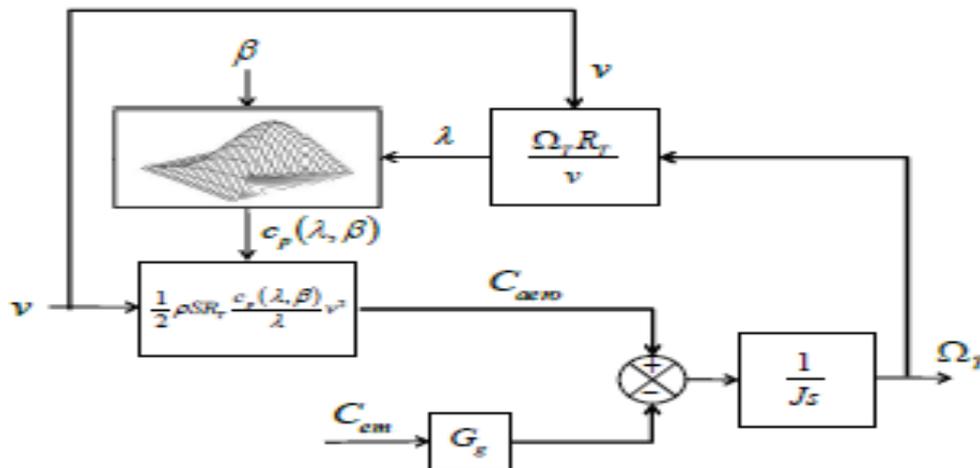


Figure II.4 : schéma blocs du modèle rigide de l'éolienne

II.4.2. Modèle de transmission souple :

En tenant compte de la souplesse de l'arbre, le couplage mécanique entre l'aéroturbine et la machine électrique en transmission souple est modélisé par un modèle présenté à la Figure II.5 [22]. Les deux masses sont connectées à un arbre

souple caractérisé par le coefficient d'élasticité de l'arbre d'entraînement des pales k et le coefficient de frottement de l'arbre par rapport au multiplicateur d .

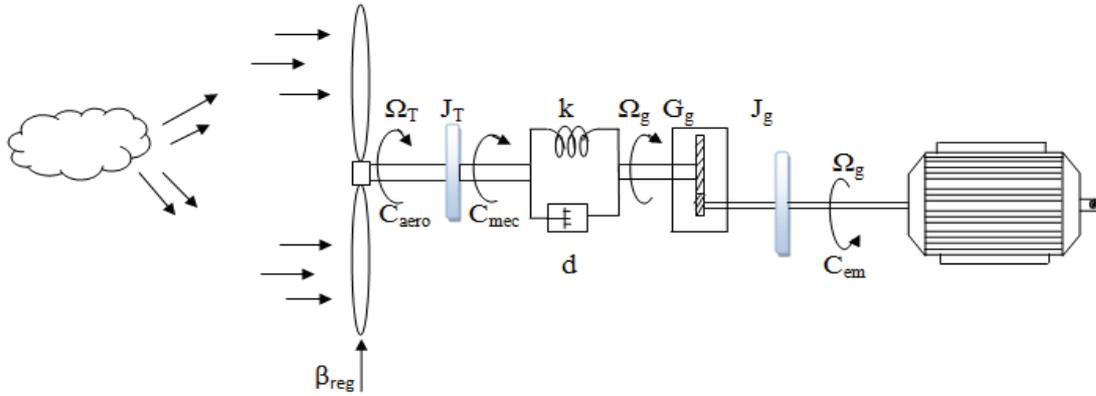


Figure II.5: Modèle souple de l'éolienne

Nous pouvons alors écrire les équations suivantes ramenées à l'arbre basse vitesse:

$$\begin{cases} J_T \frac{d\Omega_T}{dt} = C_{aero} - C_{em} \\ J_{g-BV} \frac{d\Omega_{g-BV}}{dt} = C_{mec} - G_g C_{em} \\ \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = k(\Omega_T - \Omega_{g-BV}) + d \left(\frac{d\Omega_T}{dt} - \frac{d\Omega_{g-BV}}{dt} \right) \end{cases} \quad (II.10)$$

Ω_{g-BV} et J_{g-BV} étant respectivement la vitesse de rotation et l'inertie de la génératrice ramenées à l'arbre basse vitesse, définies par

$$\begin{cases} \Omega_{g-BV} = \frac{\Omega_g}{G_g} \\ J_{g-BV} = G_g^2 J_g \end{cases} \quad (II.11)$$

Le modèle souple est alors représenté par le schéma blocs de la Figure II.6.

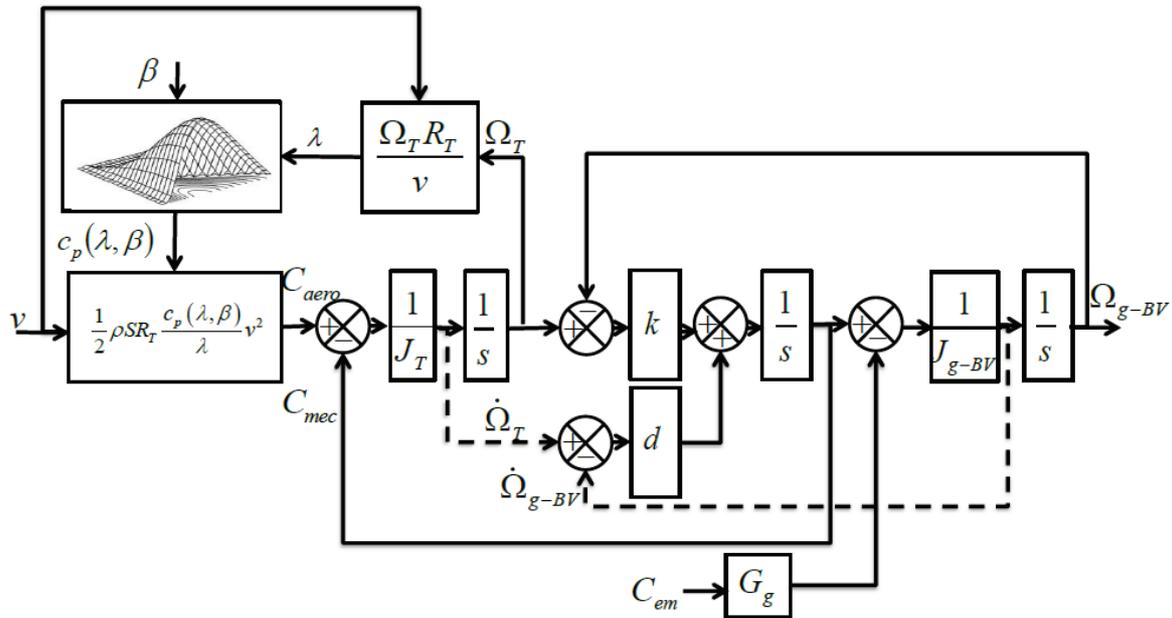


Figure II.6 : Schéma blocs du modèle souple de l'éolienne

II.5. Modélisation du système d'orientation des pales :

Le système d'orientation des pales permet d'ajuster la portance des pales afin de maintenir la puissance autour de sa valeur nominale. En réglant l'angle de calage, on agit sur les performances de l'éolienne et plus précisément sur le coefficient de puissance.

Le système d'orientation des pales génère alors un angle de calage de référence qu'on note : β_{reg} . La dynamique de l'actionneur pitch est généralement décrite par la fonction de transfert de premier ordre suivante :

$$\beta = \frac{1}{1 + \tau_\beta s} \beta_{reg} \quad (II. 12)$$

τ_β : étant la constante de temps du système de premier ordre de l'actionneur pitch. Lors de la modélisation du système d'orientation de pales, il est très important de modéliser la vitesse de variation de cet angle. En effet, compte tenu des efforts subis par les pales, la variation de l'angle de calage doit être limitée à 10°/s. La valeur de saturation de l'angle de calage en position est de 45°.

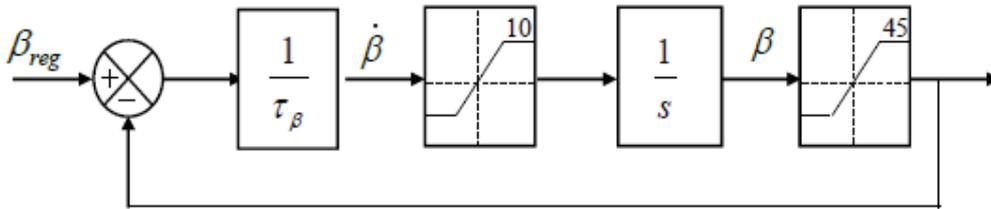


Figure II.7. Modèle de l'actionneur de l'angle de calage

II.6. Modélisation du vent :

La modélisation des aérogénérateurs nécessite une connaissance de la variation de la vitesse du vent au cours du temps. Cependant, cette source reste imprédictible et difficilement reproductible sur un site.

Une modélisation proposée parmi de nombreuses autres a été présentée par *C. Nichita* dans [23]. Cette approche est basée sur la génération de l'allure temporelle du vent à partir d'un bruit blanc sur lequel on applique une fonction de transfert du filtre non rationnel de *Von Karman* dont les paramètres dépendent des caractéristiques du site et de la nature du vent [24].

Cette fonction de transfert est approximée par :

$$\hat{H}_F(s) = K_F \frac{(m_1 T_F s + 1)}{(T_F s + 1)(m_2 T_F s + 1)} \quad (\text{II. 13})$$

m_1 Et m_2 étant les paramètres de Nichita, $m_1 = 0,4$ et $m_2 = 0,25$.

Les paramètres mathématiques T_F et K_F sont calculés selon les expressions suivantes :

$$T_F = \frac{L_F}{V} \quad (\text{II. 14})$$

Où

L_F : est l'échelle de longueur de la turbulence du vent $V_t(t)$. Cette valeur dépend des caractéristiques du site, et varie de 100 en mer à 500 dans les zones turbulences,

- V : est la valeur moyenne de la vitesse du vent qui dépend de la nature du vent (faible, moyen ou fort

$$K_F = \sqrt{\frac{\pi}{T_s \Delta \omega S_F}} \quad (\text{II. 15})$$

Avec

- T_s : la période d'échantillonnage,
- $\Delta \omega$: 0.002 rad/s

$$S_F = \sum_{k=0}^{\frac{\pi}{T_s \Delta \omega}} \frac{(m_1 T_F k \Delta \omega)^2 + 1}{[(T_F k \Delta \omega)^2 + 1][(m_2 T_F k \Delta \omega)^2 + 1]}$$

L'expression $v_0(t)$ de la vitesse du vent en un point fixe peut être représentée par l'équation suivante [BIANCHI ET AL., 07]:

$$v_0(t) = V + v_t(t) \quad (\text{II. 16})$$

La composante représentant la turbulence $v_t(t)$ est caractérisée par la longueur d'échelle L_F et aussi par l'écart type σ_v de cette turbulence qui dépend de la valeur moyenne de la vitesse du vent V par la relation :

$$\sigma_v = k_\sigma V \quad (\text{II. 17})$$

Où k_σ représente l'intensité de la turbulence. La valeur de ce coefficient varie de 0,1 en mer à 0,25 dans une zone turbulente.

Ainsi, la vitesse du vent est construite selon le schéma bloc de la Figure II.8.

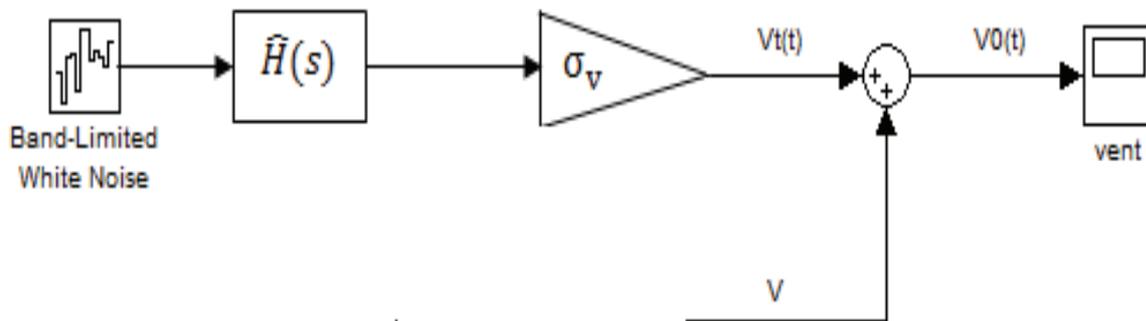


Figure I.8 : Schéma blocs de la construction de la vitesse du vent en un point

Le modèle de la Figure I.26 est utilisé sur Matlab Simulink avec les paramètres suivants : $T_s = 1s$, et $L_F = 195$, $k_\sigma = 0.14$ on obtient les courbes suivantes Figure II.9

Pour trois valeurs de vitesses moyennes : 7m/s (vent faible), 12 m/s (vent moyen) et 18 m/s (vent violent) :

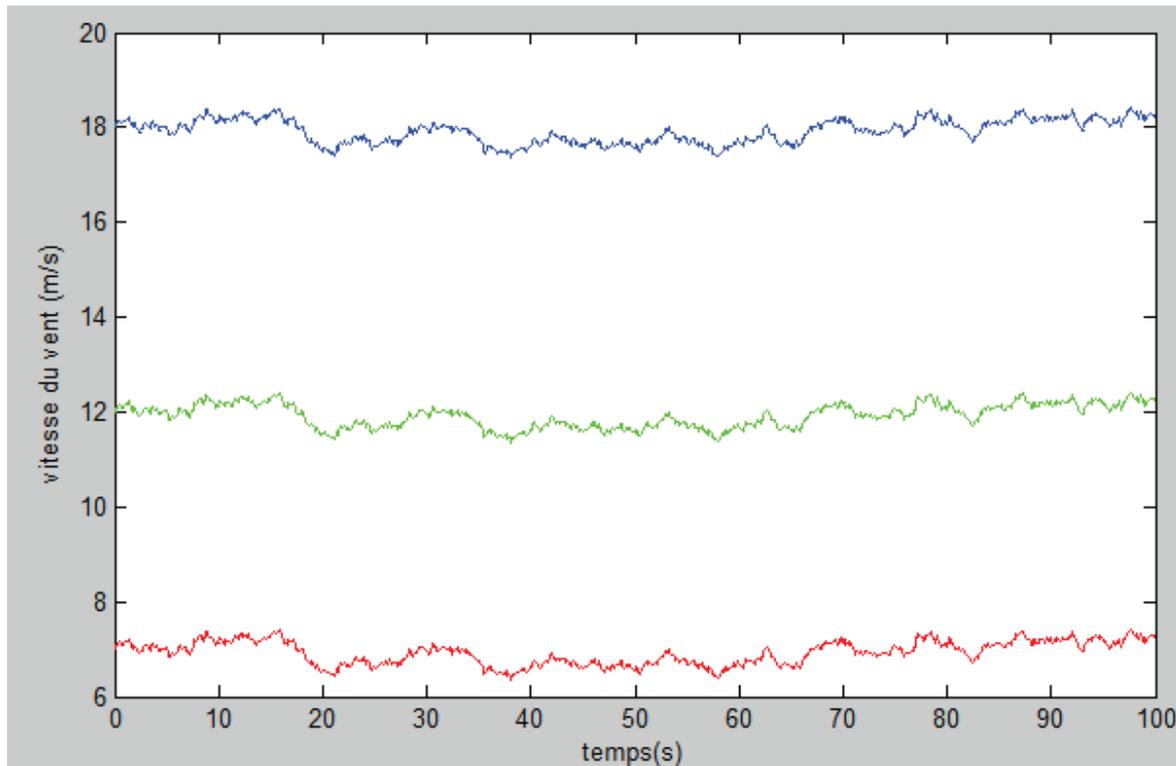


Figure II.9: Génération de vents de différentes natures par la méthode de Nichita

II.7 Conclusion :

Ce chapitre nous a permis d'étudier le modèle mathématique des différentes parties qui composent le système éolienne à savoir :

- ✓ La turbine avec son coefficient de puissance C_p , un programme MATLAB montre les variations de C_p en fonction de λ et β
- ✓ Le système de transmission rigide (seulement un multiplicateur) ou souple (multiplicateur plus amortisseur –ressort)
- ✓ Un modèle de Nichita du vent conduit aux résultats de simulation a la figure II.9 ci-dessus

Enfin les dynamique de la partie électrique (génératrice) ont être négligés car elles ont trop rapide par rapport a cent du la partie mécanique du système éolienne

Chapitre III

Représentation multi-modèles

III.1.Introduction

La modélisation d'un système non linéaire vise à trouver un modèle mathématique linéarisé autour d'un point d'équilibre qui décrit le mieux possible la réalité du système en question et traduit son comportement dynamique dans tous ses modes de fonctionnement. Cependant, l'inconvénient qui apparaît à ce stade est que ce modèle linéarisé n'est qu'une description locale du comportement du système au voisinage du point de linéarisation.

La modélisation du système sur l'ensemble du point de fonctionnement résulte de la fusion de plusieurs modèles judicieusement choisis sur l'ensemble de la zone de fonctionnement.

L'approche multi-modèle inspirée de la représentation floue qui a connu un intérêt certain depuis de nombreuses années. L'idée de cette approche est l'appréhension du comportement non linéaire d'un système par un ensemble de modèles locaux caractérisant le comportement du système dans différentes zones de fonctionnement. En effet les multi-modèles s'écrivent sous forme d'interpolation entre des modèles linéaires (LTI) valides dans une zone de fonctionnement. Trois méthodes peuvent être utilisées pour l'obtention d'un multi-modèle:

- ✓ méthode par identification de type boîte noire lorsque le système non linéaire n'a pas de forme analytique.
- ✓ méthode par linéarisation du système autour de plusieurs points de fonctionnement lorsqu'on dispose d'un modèle mathématique.
- ✓ méthode basée sur des transformations mathématiques lorsqu'un modèle analytique est disponible.

III.2 obtention d'une structure multi-modèle :

Dans cette section, nous décrivons les trois méthodes d'obtention d'une structure multi-modèle à partir d'un modèle non linéaire.

III.2.1 multi-modèle par identification

En utilisant un système non linéaire sous forme multi-modèles, le problème de l'identification des systèmes non linéaires est réduit à l'identification des sous-systèmes définis par des modèles et des fonctions d'activation. Les méthodes d'optimisation numérique sont alors utilisées pour estimer ces paramètres.

La forme générale d'un multi-modèle décrivant un système dynamique non linéaire continue dans le temps est :

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=0}^n \mu_i(\xi(t))(A_i(x(t)) + B_i u(t)) \quad (\text{III.1})$$

Où $\mu_i(\xi(t))$; $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ étant les fonctions d'activation et $\xi(t) \in \mathbb{R}$ le vecteur des variables de décision.

Généralement la construction d'un multi-modèle des entrées/sortie exige :

- la définition d'une structure de multi-modèle
- la définition de la fonction d'appartenance l'estimation des paramètres des fonctions d'activation et modèles locaux.
- l'évaluation des performances des multi-modèles.

Pour l'estimation des paramètres plusieurs méthodes d'optimisation numériques peuvent être utilisées ; selon les informations a priori .Elle sont généralement basées sur la minimisation d'une fonction de l'écart entre la sortie estimée du multi-modèle $v_n(t)$ et la sortie mesurée du système (t).

Le critère la plus utilisé est le critère qui représente l'écart quadratique entre les deux sorties –indiquées.

$$J(\theta) = \frac{1}{2} \sum_{t=1}^N \epsilon(t, \theta)^2 = \frac{1}{2} \sum_{t=1}^N (y_n(t) - y(t))^2 \quad (\text{III.2})$$

Où N est l'horizon d'observation et θ est le vecteur de paramètres des modèles locaux et ceux des fonctions d'activation.

Les méthodes de minimisation du critère $J(\theta)$ s'appuient ; le plus souvent sur un développement limité $J(\theta)$ autour d'une valeur particulière du vecteur de paramètre θ et d'une procédure itérative de modification progressive de la solution si l'on note k l'indice d'itération de la méthode de recherche $J(\theta(k))$ la vecteur de la solution à itération k la mise à jour de l'estimation s'effectue de la manière suivante :

$$\theta(k+1) = \theta(k) - \eta D(k) \quad (\text{III.3})$$

Où η représente un facteur d'ajustement permettant de régler la vitesse de convergence vers la solution. $D(k)$ est la direction de recherche dans l'espace paramétrique. Selon la façon dont $D(k)$ est calculée, on distingue différentes méthodes d'optimisation numériques dont les principales sont : l'algorithme de Levenberg-Marquardt, l'algorithme du gradient et l'algorithme de Newton, l'algorithme de Gauss-Newton.

III.2.2 multi-modèle par la linéarisation:

Dans ce cas on dispose de la forme analytique du modèle non linéaire du processus physique qu'on linéarise autour de différents points de fonctionnement judicieusement choisis. Considérons le système non linéaire suivant :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = F(x(t), u(t)) \\ y(t) = G(x(t), u(t)) \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

Où $(F, G) \in \mathbb{R}^{2n}$ sont des fonctions non linéaires continues, $x(t) \in \mathbb{R}^n$ le vecteur d'état et $u(t) \in \mathbb{R}^m$ est le vecteur d'entrée. Par la suite, nous représenterons le système non linéaire par un multi-modèle composé de plusieurs modèles locaux linéaires ou affines obtenus par linéarisation des systèmes non linéaires autour d'un point de fonctionnement arbitraire $(x_i, u_i) \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m$

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^M \mu_i(\xi(t)) (A_i x(t) + B_i u(t) + D_i) \\ y_n(t) = \sum_{i=1}^M \mu_i(\xi(t)) (C_i x(t) + E_i u(t) + N_i) \end{cases} \quad (\text{III. 5})$$

$$A_i = \left. \frac{\partial F(x,u)}{\partial x} \right|_{\substack{x=x_i \\ u=u_i}} \quad B_i = \left. \frac{\partial F(x,u)}{\partial u} \right|_{\substack{x=x_i \\ u=u_i}}$$

$$D_i = F(x_i, u_i) - A_i x(t) - B_i u(t)$$

$$C_i = \left. \frac{\partial G(x,u)}{\partial x} \right|_{\substack{x=x_i \\ u=u_i}} \quad E_i = \left. \frac{\partial G(x,u)}{\partial u} \right|_{\substack{x=x_i \\ u=u_i}}$$

$$N_i = G(x_i, u_i) - C_i x(t) - E_i u(t)$$

Notons que dans ce cas, le nombre de modèles locaux(M) dépend de la précision de modélisation souhaité du système non linéaire et de choix de la structure des fonctions d'activations. Ces derniers doivent satisfaire les propriétés.

III.2.3 multi –modèle basé sur les secteurs de non linéarité

Considérons le cas général d'un système continu non linéaire:

$$\dot{x}(t) = f(x(t)) + Bu(t) \quad (\text{III. 6})$$

Avec:

$$x(.) \in \mathcal{R}^p; \quad u(.) \in \mathcal{R}^m; \quad f(x(.)) \in \mathcal{R}^p \quad \text{Et} \quad B \in \mathcal{R}^{p.M}$$

La méthode de transformation exposée à été introduite par Tanaka. Elle est basée sur une transformation des fonctions scalaires origines de la non linéarité .L'avantage de cette méthode est de ne pas engendrer d'erreur d'approximation et de minimiser le nombre de modèles locaux. Cette méthode est basée sur la bornitude des fonctions continues.

Lemme1 : soit $h(x(t))$ une fonction bornée de $[a, b] \rightarrow \mathcal{R}$ pour tout $x \in [a, b]$ avec $(a,b) \in \mathcal{R}^p$ alors il existe deux fonctions :

$$\begin{aligned} F^i(.) &: [a, b] \rightarrow [0,1] \in I_2 \\ x(t) &\rightarrow F^i(x(t)) \end{aligned} \quad (\text{III. 7})$$

Avec :

$$F^1(x(t)) + F^2(x(t)) = 1$$

Et deux scalaires α et β tel que

$$h(x(t)) = F^1(x(t))\alpha + F^2(x(t))\beta \quad (\text{III. 8})$$

Une composition de est considérée sur $[a, b]$ comme suivent :

$$\beta = \min_{x \in [a,b]} h(x(t)) \quad \text{et} \quad \alpha = \max_{x \in [a,b]_{y-}} h(x(t)) \quad (\text{III. 9})$$

$$F^1(x(t)) = \frac{h(x(t)) - \beta}{\alpha - \beta} \quad \text{et} \quad F^2(x(t)) = \frac{\alpha - h(x(t))}{\alpha - \beta} \quad (\text{III. 10})$$

Sous l'hypothèse de la continuité t de la borngitude des fonctions $f(x(t))$ et $g(x(t))$ données en (III.6) avec $f(0)=0$ et $g(0)=0$.ces fonctions peuvent être réécrites sous la forme suivante

$$\begin{cases} f(x(t)) = \sum_{i=1}^2 F^i(x(t))A_i x(t) \\ g(x(t)) = \sum_{i=1}^2 F^i(x(t))C_i x(t) \end{cases} \quad (\text{III. 11})$$

Le modèle (2.6) devient

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^2 F^i(x(t))A_i x(t) + B_i u(t) \\ y_m(t) = \sum_{i=1}^2 F^i(x(t))(C_i x(t) + D_i u(t)) \end{cases} \quad (\text{III. 12})$$

Dans ce cas ; le multi –modèle (III.12) obtenu représente de façons exacte linéaire (III.6) sur l’intervalle compact considéré.

III.4 Représentation des différents types des systèmes asservissement :

Deux classe de système peut être introduite en savoir statique et dynamique, ce dernier peut définir différent type de système selon en montre la figure (III.1) ci-dessous.

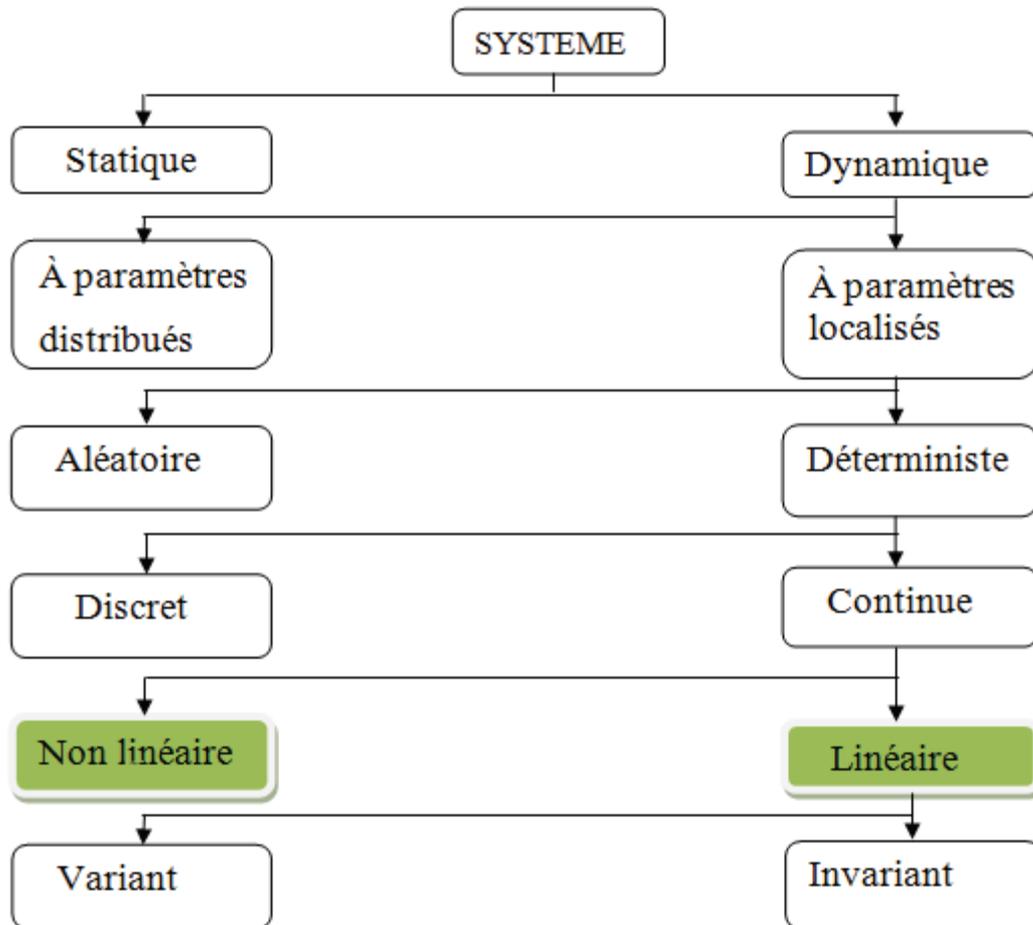


Figure (III.1) : Classification des systèmes. [EL –k25]

III.5 Systèmes non linéaires :

La majorité des systèmes physique sont en réalité non linéaires et décrits par le modèle de représentation d’état .un pratique très courante consiste a linéaires le modèle d’état non linéaire localement autour d’un point de fonctionnement nominal afin de disposer d’un modèle linéaire localement valide sous les hypothèses de faibles déviations autour du point de fonctionnement.

III.5.1 Linéarisation par développement de Taylor :

Soit le système décrit par l'équation d'état différentielle

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t) \quad (\text{III. 13})$$

On définit une trajectoire d'état nominale $x_0(t)$ ainsi qu'un vecteur de commande nominal $u_0(t)$ vérifiant

$$\dot{x}_0(t) = f(x_0(t), u_0(t), t) \quad (\text{III. 14})$$

On suppose alors que le système fonctionne autour des conditions nominales. Cela signifie que pour tout $t_0 \leq t \leq t_f$ $(u(t), x(t))$ ne diffère de $(u_0(t), x_0(t))$ que très faiblement. Il est donc possible de définir les perturbations telles que :

$$\begin{aligned} u(t) &= u_0 + \tilde{u}(t) \\ x(t_0) &= x_0(t) + \tilde{x}(t) \\ x(t) &= x_0 + \tilde{x}(t) \quad t_0 \leq t \leq t_f \end{aligned} \quad (\text{III. 15})$$

En écrivant le développement en série de Taylor au premier ordre de la fonction autour du point nominal, on obtient :

$$\dot{x}_0(t) + \dot{\tilde{x}}(t) = f(x_0(t), u_0(t), t) + J_x(x_0(t), u_0(t), t)\tilde{x}(t) + J_u(x_0(t), u_0(t), t)\tilde{u}(t) + h \quad (\text{III. 16})$$

Où J_x (J_u) est matrice jacobéenne de la fonction par rapport au vecteur $x(u)$:

$$J_x = \left[\frac{\partial f_i}{\partial x_j} \right]_{\substack{1 \leq i \leq n \\ 1 \leq j \leq n}} \quad J_u = \left[\frac{\partial f_i}{\partial u_j} \right]_{\substack{1 \leq i \leq n \\ 1 \leq j \leq n}}$$

En négligeant le terme $h(t)$, on obtient l'équation d'état linéarisée pour $t_0 \leq t \leq t_f$:

$$\dot{\tilde{x}}(t) = \underbrace{J_x(x_0(t), u_0(t), t)}_{A(t)} \tilde{x}(t) + \underbrace{J_u(x_0(t), u_0(t), t)}_{B(t)} \tilde{u}(t) \quad (\text{III. 17})$$

$$\dot{\tilde{x}}(t) = A(t)\tilde{x}(t) + B\tilde{u}(t) \quad (\text{III. 18})$$

III.6 linéarisation du système éolien :

Comme nous l'avons montré précédemment, le système éolien est fortement non linéaire. Nous allons proposer une linéarisation du système autour d'un point de fonctionnement. Nous rappelons, dans un premier temps, les principes généraux de linéarisation des systèmes, nous définissons un point de fonctionnement étant le vecteur état du système et u_i l'entrée.

Si l'on considère un système non linéaire de la forme :

$$\dot{x}(t) = F(X(t), U(t)) \quad (\text{III. 19})$$

Où $F(.)$ est une fonction non linéaire en l'état et la commande.

La linéarisation du système (III.19) autour du point de fonctionnement (x_i, u_i) peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} \dot{X}(t) &= A_i(X(t) - X_i(t)) + B_i(U(t) - U_i(t)) + F \\ &= A_i X(t) + B_i U(t) + d_i \end{aligned} \quad (\text{III. 20})$$

Avec :

$$\begin{cases} d_i = F(X_i(t), U_i(t)) - A_i X_i(t) - B_i U_i(t) \\ A_i = \left. \frac{\partial F(X(t), U(t))}{\partial X} \right|_{\substack{X=X_i \\ U=U_i}} \\ B_i = \left. \frac{\partial F(X(t), U(t))}{\partial U} \right|_{\substack{X=X_i \\ U=U_i}} \end{cases} \quad (\text{III. 21})$$

Pour le cas du système éolienne, la non linéarité apparait dans du couple aérodynamique C_{aero} . Nous avons donc besoin d'adopter une démarche de linéarisation du couple C_{aero} Par rapport à Ω_T et β .

$$\begin{aligned} C_{aero} &= \frac{P_{aero}}{\Omega_T} = \frac{\rho \cdot S \cdot R_T \cdot V_v^2}{2\lambda} c_p(\lambda, \beta) \\ &= \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R_T^3 \cdot c_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{V_v^3}{\Omega_T} \end{aligned} \quad (\text{III. 22})$$

Puisque

$$\lambda = \frac{R_T \Omega_T}{V_v}$$

Le point de fonctionnement correspondant à une vitesse de vent v_i étant variable, on peut alors procéder à la linéarisation du système éolienne autour de différents point de fonctionnement v_i qui correspondant à plusieurs vitesses v_i . de ce (noté pf) donne à une vitesse de vent égale à v_i :

$$\begin{aligned} \Delta C_{aero} &= \left. \frac{\partial C_{aero}(\Omega_T(t), \beta(t))}{\partial \Omega_T} \right|_{pf} \Delta \Omega_T + \left. \frac{\partial C_{aero}(\Omega_T(t), \beta(t))}{\partial \beta} \right|_{pf} \Delta \beta \quad (\text{III. 23}) \\ &= a_i \Delta \Omega_T + b_i \Delta \beta \end{aligned}$$

Le point de fonctionnement pf correspondant à une vitesse de vent v_i

$$\begin{aligned} a_i &= \left. \frac{\partial C_{aero}(\Omega_T(t), \beta(t))}{\partial \Omega_T} \right|_{pf} = \left. \frac{\partial}{\partial \Omega_T} \left(0.5 \frac{\rho \pi R_T^2 \cdot V_v^3}{\Omega_T} C_p \right) \right|_{pf} \\ &= 0.5 \rho \pi R_T^2 V_v^3 \left\{ \left. \frac{\partial \left(\frac{1}{\Omega_T} \right)}{\partial \Omega_T} \right|_{pf} C_p + \frac{1}{\Omega_T} \left. \frac{\partial C_p}{\partial \lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial \Omega_T} \right|_{pf} \right\} \end{aligned}$$

D'ou

$$\begin{aligned} a_i &= 0.5 \rho \pi R_T^2 V_v^3 \left\{ -\frac{1}{\Omega_T^2} \Big|_{pf} C_p + \frac{1}{\Omega_T} \frac{R_T}{V_v} \left. \frac{\partial C_p}{\partial \lambda} \right|_{pf} \right\} \\ &= 0.5 \rho \pi R^2 V_v^3 \frac{1}{\Omega_T} \left\{ -\frac{1}{\Omega_T} \Big|_{pf} C_p + \frac{R_T}{V_v} \left. \frac{\partial C_p}{\partial \lambda} \right|_{pf} \right\} \\ &= 0.5 \rho \pi R^2 V_v^3 \frac{1}{\Omega_T} \left\{ -\frac{1}{\frac{\lambda \cdot V_v}{R_T}} \Big|_{pf} C_p + \frac{R_T}{V_v} \left. \frac{\partial C_p}{\partial \lambda} \right|_{pf} \right\} \\ &= 0.5 \rho \pi R_T^3 V_v^2 \frac{1}{\Omega_T} \left\{ -\frac{C_p}{\lambda} \Big|_{pf} + \left. \frac{\partial C_p}{\partial \lambda} \right|_{pf} \right\} \end{aligned}$$

Après la simplification on trouve :

$$a_i = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R_T^3 \frac{V_v^2}{\Omega_{T-nom}} \left[\frac{\partial C_p}{\partial \lambda} - \frac{C_{p-nom}}{\lambda_{i-nom}} \right] \quad (III. 24)$$

Et le deuxième terme de la linéarisation :

$$b_i = \frac{\partial C_{aero}}{\partial \beta} = \frac{\partial}{\partial \beta} \left(\frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R_T^3 C_p(\lambda, \beta) \right)$$

$$b_i = \frac{\partial}{\partial \beta} \left(\frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R_T^3 \right) \cdot C_p(\lambda, \beta) + \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R_T^3 \cdot \frac{\partial}{\partial \beta} (C_p(\lambda, \beta))$$

La simplification aussi nous donne :

$$b_i = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R_T^2 \frac{V_v^3}{\Omega_{T-nom}} \left[\frac{\partial C_p(\lambda, \beta)}{\partial \beta} \right] \quad (III. 25)$$

Où le symbole Δ désigne la variation par rapport au point de fonctionnement choisi. Nous pouvons alors schématiser le modèle linéaire par le graphe suivant :

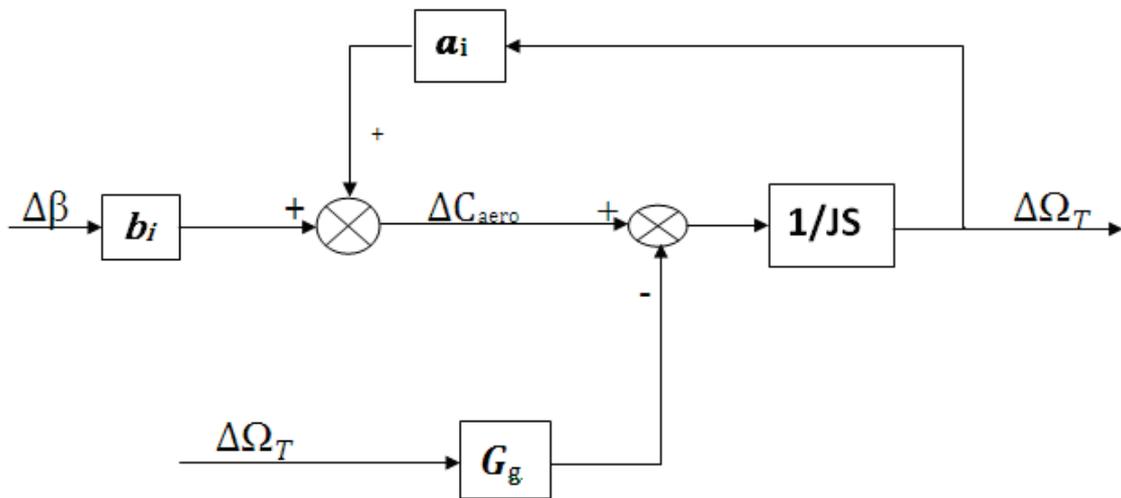


Figure III.2 : Schéma blocs du modèle rigide de l'éolienne.

Nous définissons, dans un premier temps, quelques notations liées au point de fonctionnement indice * i *.

La vitesse du vent est notée : v_i

Considérons la zone des vitesses élevées du vent. Ainsi, la vitesse de rotation de l'éolienne se situe aux alentours de la vitesse nominale Ω_{T-nom} et la puissance électrique générée est égale à sa valeur nominale P_{nom}

Notons par :

- λ_{i-nom} : Le ratio de vitesse spécifique qui permet d'avoir la vitesse de rotation nominale pour la vitesse du vent v_i :

$$\lambda_{i-nom} = \frac{\Omega_{T-nom} R_T}{v_i} \quad (III. 26)$$

- $C_{Pi-nom} = C_P(\lambda_{i-nom}, \beta_{i-nom})$: le coefficient de puissance correspondant à Ω_{T-nom} la vitesse du vent v_i :

$$C_{Pi-nom} = \frac{2\Omega_{T-nom} C_{aero-nom}}{\sigma S v_i^3} \quad (III. 27)$$

β_{i-nom} : L'angle d'orientation des pales nécessaire pour avoir la vitesse de rotation nominale pour la vitesse du vent v_i .

A titre d'exemple : pour $v_i = 15\text{m/s}$; $\lambda_{i-nom} = 5.03\text{m/s}$, $C_{Pi-nom} = 0.19$ on trouve l'équation (II.9) Peut être exprimée autour du point de fonctionnement nominal de la manière suivante :

$$\begin{aligned} J \frac{d\Delta\Omega_T}{dt} &= J \left(\frac{d\Omega_T}{dt} - \frac{d\Omega_{T-nom}}{dt} \right) \\ &= (C_{aero} - C_{aero-nom}) - G_g (C_{em} - C_{em-nom}) \end{aligned} \quad (III. 28)$$

$$J \frac{d\Delta\Omega_T}{dt} = \Delta C_{aero} - G_g \Delta C_{em}$$

On cherche une expression linéaire du premier ordre faisant intervenir $\Delta\beta$ il nous faut pour cela exprimer ΔC_{aero} et ΔC_{em} en fonction de $\Delta\beta$ et $\Delta\Omega_T$.

Il ya a alors un besoin de linéarisation l'expression de ΔC_{em} étant donne que la puissance électrique $p = C_{em}\Omega_g$ devrait être maintenue égale à sa valeur nominale nous pouvons alors écrire :

$$\Delta P = 0 \rightarrow \Delta C_{em} = -\frac{C_{em-nom}}{\Omega_{T-nom}}\Delta\Omega_T = \gamma\Delta\Omega_T \quad (III. 29)$$

Avec

$$\gamma = -\frac{C_{em-nom}}{\Omega_{T-nom}} \quad (III. 30)$$

En considérant l'équation (III.23) la linéarisation du couple aérodynamique autour du point de fonctionnement choisi permet d'écrire

$$\Delta C_{aero} = a_i \Delta\Omega_T + b_i\Delta\beta$$

Avec

$$\begin{cases} a_i = \frac{1}{2} \rho \pi R_T^3 \frac{V_v^2}{\Omega_{T-nom}} \left[\frac{\partial C_p}{\partial \lambda} - \frac{C_{p-nom}}{\lambda_{i-nom}} \right] \\ b_i = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R^2 \frac{V_v^3}{\Omega_{T-nom}} \left[\frac{\partial C_p(\lambda, \beta)}{\partial \beta} \right] \end{cases} \quad (III. 31)$$

L'expression du coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$ pour une éolienne de 2 Mw s'écrit sous la formule.

$$C_p = 0.18 \left(\frac{90}{0.4+0.5\lambda} - 6.8 - 0.115\beta^2 \right) e^{\frac{-8}{0.4+0.5\lambda}+0.16} \quad (III. 32)$$

Ensuite on procède aux devisé par rapport a Ω_T et par rapport a β .

a) Dérivation de par rapport aux Ω_T :

$$\frac{\partial C_p(\lambda, \beta)}{\partial \lambda} = \frac{\partial}{\partial \lambda} \left(0.18 \times \left(\frac{90}{0.4 + 0.5\lambda} - 6.8 - 0.115\beta^2 \right) e^{\frac{-8}{0.4+0.5\lambda}+0.16} \right)$$

Les simplifications de cette calcule donne :

$$\frac{\partial C_p(\lambda, \beta)}{\partial \lambda} = 0.18 \left(\frac{90}{0.4+0.5\lambda} - 6.8 - 0.115\beta^2 \right) \left(\frac{1}{(0.4+0.5\lambda)^2} e^{\frac{-8}{0.4+0.5\lambda}+0.16} \right) \quad (\text{III. 33})$$

b) Dérivation de par rapport aux β :

$$\frac{\partial C_p(\lambda, \beta)}{\partial \beta} = \frac{\partial}{\partial \beta} \left(0.18 \times \left(\frac{90}{0.4 + 0.5\lambda} - 6.8 - 0.115\beta^2 \right) e^{\frac{-8}{0.4+0.5\lambda}+0.16} \right)$$

Donc :

$$\frac{\partial C_p(\lambda, \beta)}{\partial \beta} = 0.0414 * e^{\frac{-8}{0.4+0.5\lambda}+0.16} \quad (\text{III. 34})$$

En tenant compte des expressions précédentes linéarités la linéarisation du modèle souple autour d'un point de fonctionnement conduit aux équations suivantes :

$$\begin{cases} J_T \Delta \dot{\Omega}_T = a_i \Delta \Omega_T + b_i \Delta \beta - \Delta C_{mec} \\ J_{g-BV} \Delta \dot{\Omega}_{g-BV} = \Delta C_{mec} - G_g \Delta C_{em} \\ \Delta \dot{\beta} = -\frac{1}{\tau_\beta} \Delta \beta + \frac{1}{\tau_\beta} \Delta \beta_{ref} \\ \Delta \dot{C}_{mec} = \left(k + \frac{da_i}{J_T} \right) \Delta \Omega_T - k \Delta \Omega_{g-BV} + \frac{db_i}{J_T} \Delta \beta + d \left(-\frac{1}{J_T} - \frac{1}{J_{g-BV}} \right) \Delta C_{mec} \end{cases} \quad (\text{III. 35})$$

Sous forme d'état on a :

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\Omega}_T \\ \Delta \dot{\Omega}_{g-BV} \\ \Delta \dot{\beta} \\ \Delta \dot{C}_{mec} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{a_i}{J_T} & 0 & \frac{b_i}{J_T} & \frac{-1}{J_T} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{J_{g-BV}} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{\tau_\beta} & 0 \\ k + \frac{da_i}{J_T} & -k & \frac{db_i}{J_T} & -\frac{d}{J_T} - \frac{d}{J_{g-BV}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \Omega_T \\ \Delta \Omega_{g-BV} \\ \Delta \beta \\ \Delta C_{mec} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{\tau_\beta} \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \beta_{ref} \\ \Delta C_{em} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 36})$$

III.7 Structure d'un système multi-modèle de l'éolienne :

La méthode multi-modèle par linéarisation est utilisée dans notre travail, ainsi si l'on considère une linéarisation autour d'un point de fonctionnement sous la forme de l'équation (III.20) et on suppose avoir n points de linéarisation donc n modèles locaux une représentation multi-modèle du système sera sous la forme.

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^n \mu_i Z(t) (A_i x(t) + B_i u(t) + d_i) \quad (\text{ III.37})$$

$\mu_i(Z(t)) ; i \in \{1, 2, \dots, n\}$ Étant les fonctions d'activation et $z(t)$ le vecteur des variables de décision.

La structure d'un système multi-modèle est décrite par le schéma blocs de la figure (III.2):

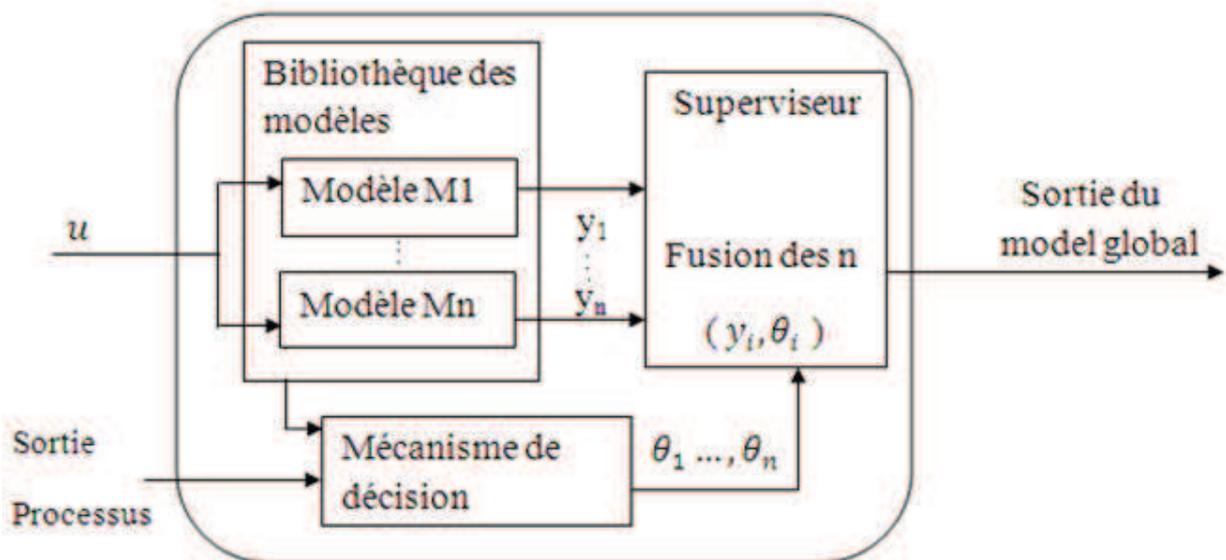


Figure III.3 : Structure d'un système multi-modèle.

Dans la figure on fait appel à une bibliothèque ou base de n modèles linéaires locaux (M_1, M_2, \dots, M_n) chaque modèle est une représentation linéarisée simplifiée du système non linéaire pour un point de fonctionnement.

À un instant donné seulement quelques un de ces modèles sont valides. En effet le choix du modèle validé consiste à calculer la distance entre les données d'actuel et

celles de chaque modèle local. Le modèle le plus proche est ainsi choisi à chaque instant .On aura donc besoin d'un mécanisme de décision permettant d'évaluer la pertinence de chaque modèle ,et de calculer les validités ($\theta \in [0; 1]$) des différents modèles M_i permettant de quantifier le degré de fiabilité de chaque modèle si à un instant considéré $\theta_k = 1$, alors le modèle M_k décrit parfaitement le processus et si au contraire $\theta_k = 0$ le modèle M_k est considéré complètement faux à cet instant après avoir calculé les validités le superviseur génère une description globale du processus en interpolant les différentes informations incluses dans le système multi-modèle .

Afin de déterminer les valeurs des validités de chaque modèle plusieurs approches sont connues dans la littérature .Dans ce document, nous choisissons d'utiliser l'approche des résidus .Un r_i est fonction qui calcule l'erreur entre deux valeurs d'une variable noté γ afin de quantifier l'erreur commise par chaque modèle dans sa représentation du processus il est défini alors par l'expression suivante :

$$r_i(t) = \|\gamma(t) - \gamma_i(t)\|, i = 1, \dots, n \quad (\text{III. 38})$$

Avec n le nombre de modèles locaux et $\|\cdot\|$ une norme choisie.

Cette valeur de résidu nécessite alors d'être normalisée .On définit r_i tel que

$$\hat{r}_i(t) = \frac{r_i(t)}{\sum_{j=1}^n r_j(t)}, i = 1 \dots n \quad (\text{III. 39})$$

À partir de ces résidus, on peut calculer les validités par le fait que plus l'erreur commise par un modèle local est grande moins il est valide. Ceci se traduit alors par l'expression (III.40)

$$\theta_i(t) = 1 - \hat{r}_i(t); i = 1 \dots n \quad (\text{III. 40})$$

Le système éolien est linéaire autour de différents point de fonctionnement définis par rapport à la vitesse du vent .par conséquent, pour chaque point de fonctionnement choisi, un modèle linéaire local est défini.

A partir caractéristique de l'angle de calage par rapport au vent, n modèles locaux seront choisis pour constituer la base multi-modèle du correcteur. Le choix de ces modèles locaux se base essentiellement sur les vitesses du vent.

De ce fait, on peut choisir le vent comme la variable à utiliser pour le calcul des validités. A partir de cette base on choisit les 2 modèles locaux successifs les plus proches au système à chaque instant donnée. Le choix des modèles locaux valides se base sur un test sur la valeur instantanée de la vitesse du vent v :

Si $v \in [v_i; v_{i+1}]$ on choisit les modèles locaux M_i , et M_{i+1} correspondant aux vitesses du vent v_i et v_{i+1} respectivement. Les résidus sont alors donnés par l'expression suivante :

$$r_k = |v - v_k|; k \in \{i, i + 1\} \quad (\text{III. 41})$$

Ou :

r_k : est le résidu du modèle local M_k .

v : est la vitesse instantanée du vent.

v_k : est la vitesse du vent correspondant au modèle local M_k

Une fois les validités sont déterminées par la formule (III.40). Le modèle M qui représente le système à cet instant, est obtenu par une fusion linéaire des modèles locaux M_i , et M_{i+1} sous la forme :

$$M = \theta_k M_i + \theta_{k+1} M_{i+1} \quad (\text{III. 42})$$

III.8. Commande par action proportionnelle :

Le correcteur conçu dans cette partie fait partie de la stratégie de commande B :

Commande de la vitesse par β_{reg} et de la puissance par C_{em} .

La Figure précise la structure de la commande étudiée. L'angle pitch appliqué au système issu d'une action proportionnelle à laquelle nous ajoutons une action β_{i-nom} telle que définie au paragraphe III.6

D'après la définition de β_{i-nom} , la vitesse de rotation Ω_T est égale à Ω_{T-nom} pour $v = v_i$. Ainsi, le correcteur a uniquement pour rôle de limiter les fluctuations de vitesse pour les variations du vent.

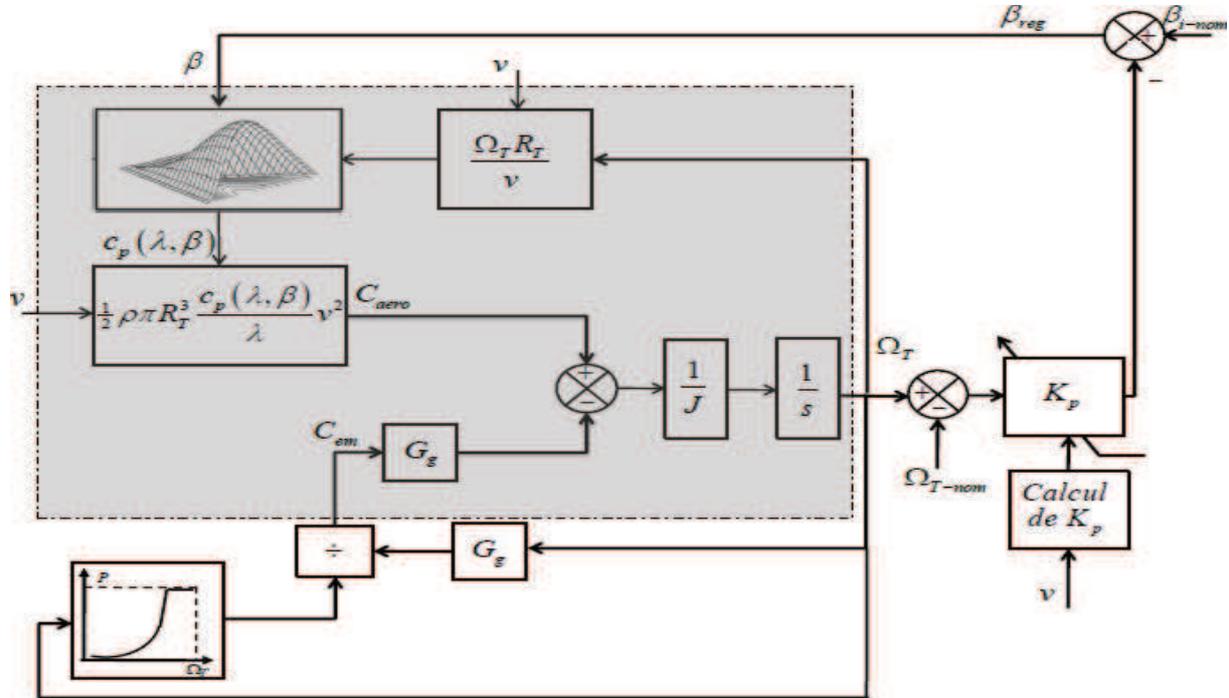


Figure III.4 Stratégie de commande B Structure du correcteur proportionnel multi modèle (rigide, sans pitch)

Avec la courbe de la puissance(P_T) en fonction de la vitesse de la turbine(Ω_T) se donne à Partir d'un programme MATLAB qui se trouve dans l'ANNEXE

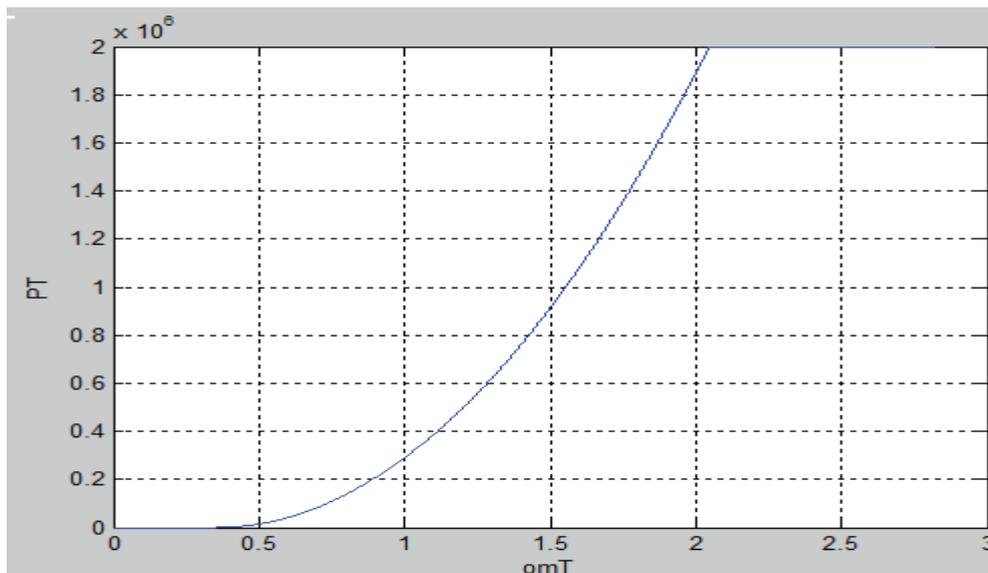


Figure.III.5 : la puissance (P_T) en fonction de la vitesse de la turbine(Ω_T)

Expression de la loi de commande avec un pitch assimilé à un gain unitaire :

Pour cette partie, nous allons considérer l'actionneur pitch comme étant à gain unitaire, ce qui revient à supposer que :

$$\beta = \beta_{reg} \quad (III.43)$$

On peut ainsi écrire :

$$\begin{aligned} J \frac{d\Delta\Omega_T}{dt} &= a_i \Delta\Omega_T + b_i \Delta\beta - G_g \gamma \Delta\Omega_T = (a_i - G_g \gamma) \Delta\Omega_T + b_i \Delta\beta \\ &= d_i \Delta\Omega_T + b_i \Delta\beta \end{aligned} \quad (III.44)$$

Avec

$$d_i = a_i - G_g \gamma$$

En négligeant la valeur du coefficient de frottement, on peut tout juste écrire:

Donc:

$$\frac{\Delta\Omega_T}{\Delta\beta} = \frac{\frac{b_i}{d_i}}{\frac{J}{d_i}S + 1} = \frac{k}{TS + 1} \quad (III.45)$$

On cherche une commande de la forme :

$$\Delta\beta = k_i \Delta\Omega_T \quad (III.46)$$

Il s'agit donc d'un correcteur proportionnel, où k_i est déterminé par la méthode de placement de pôles et est égal à l'expression suivante :

$$k_i = - \frac{J p_{des} - d_i}{b_i} \quad (III.47)$$

Où p_{des} est le pôle désiré.

Lorsque la vitesse du vent v est située entre deux points de la base multi modèle v_i et v_{i+1} ($v \in [v_i, v_{i+1}]$), le gain proportionnel qui sera appliqué est :

$$k_p = k_i \theta_i + k_{i+1} \theta_{i+1} \quad (III.48)$$

Avec:

$$\begin{cases} \theta_i = 1 - \frac{v - v_i}{v_{i+1} - v_i} \\ \theta_{i+1} = \frac{v - v_i}{v_{i+1} - v_i} \end{cases}$$

A partir d'un programme MATLAB et pour chaque valeur du vent on a trouvé les valeurs suivantes de K_i et K_p .

V_v	K_i	K_p
-------	-------	-------

12	7.9640	5.5034
15	3.0427	1.7213
18	-2.2429	-2.2429
22	-2.2429	-8.2040

Tableau .III.1 :les valeurs k_i et k_p pour chaque point de vent

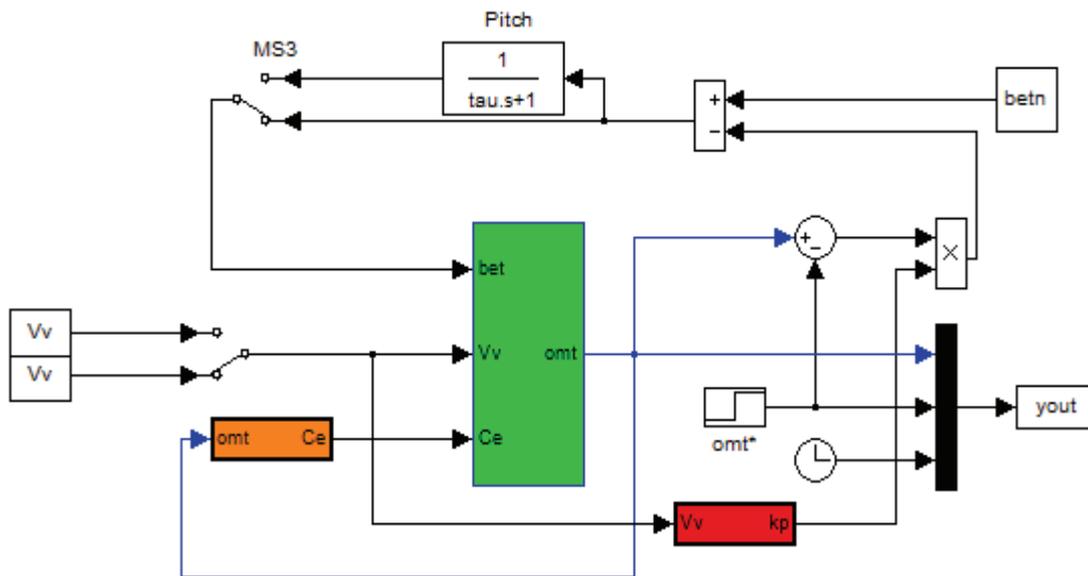


Figure III.6:schéma bloc multi-modèle

III.9.Conclusion :

Dans ce chapitre nous allons utiliser la deuxième méthode de multi-modèle c'est-à-dire la méthode de la linéarisation afin d'obtenir un moyen de commande basé sur un modèle mathématique, théoriquement il est possible de trouver une loi de commande à chaque instant ayant un modèle linéaire.

Chapitre IV

Représentations dans l'espace d'état

IV.1.Introduction :

Dans le cas des problèmes concernant des systèmes dynamiques de type SISO, il existe plusieurs types de représentations (équations différentielles, fonctions de transfert) qui d'une manière ou d'une autre permettent d'analyser et de synthétiser ces systèmes. Mais, dès qu'il s'agit de systèmes plus complexes ayant plusieurs entrées et sorties (MIMO), ces modèles ne peuvent plus convenir et on utilise le modèle de représentation dans l'espace d'état (state space representation).

La théorie moderne du système fait appelle a la notion des variables d'état. Le comportement d'un système peut être entièrement d'écrit a l'aide de ces variables.

L'étude se fais essentiellement dans le domaine temporelle ces variables d'état représente à chaque instant l'ensemble minimal d'informations nécessaire pour déterminé l'évolution interne d'un système. Cette représentation interne est importante dans l'étude des systèmes dynamique du fête quelle peut modéliser du système linéaire ou non linéaire, des systèmes invariant ou variant des systèmes mono ou multivariable, continue ou discret et utilise des programmes d'ordinateur qui permet l'analyse ou la synthèse des systèmes dynamique.

La représentation par l'espace d'état, l'état d'un système est défini par un ensemble de variables Internes notées généralement $x(t)$, tel que leur détermination résume le passé et permet de prédire l'état futur du système. L'état du système est décrit par un ensemble d'équations différentielles du premier ordre exprimées en termes de variables d'état($x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$). Ces équations sont couplées et peuvent être écrites sous une forme générale condensée par la notation matricielle:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (IV. 1)$$

Ou :

u : est le vecteur d'entrée.

x : est le vecteur d'état.

Et y : est le vecteur de sortie.

A, B, C et D sont des Matrices.

Nous allons nous intéresser au cas mono variable (SISO) quoique la théorie s'adapte particulièrement bien au cas multi variable (MIMO).

IV.2.État d'un système et variables d'état:

Considérons le système représenté sur la figure IV.1. Ce système est composé d'une cascade d'éléments différents (même si nous n'avons utilisé que des intégrateurs et des gains) et la commande automatique d'un tel système peut très bien aller beaucoup plus loin que la seule ambition de réguler le signal de sortie.

Un certain nombre de signaux, que l'on peut qualifier d'internes au système apparaissent nettement sur le schéma. Nous les avons baptisé x_1 , x_2 et x_3 . Quoi de plus naturel, en effet, que de vouloir commander ces différents signaux par l'intermédiaire du seul signal d'entrée e . Le problème de la commande du système ne se réduit donc plus au simple asservissement du signal de sortie mais peut donc être considéré comme la maîtrise simultanée de l'évolution des trois signaux x_1 , x_2 et x_3 . On dit que l'ensemble de ces trois signaux forment l'état du système et la modélisation que nous allons associer à cette représentation va nous permettre d'envisager la commande de cet état grâce au signal d'entrée, autrement dit nous formulons l'ambition (si cela est possible, bien entendu) d'amener le système dans un état donné (x_1 , x_2 et x_3 devant converger vers des valeurs préétablies) grâce au signal d'entrée du système. Les variables internes choisies sont appelées variables d'état du système.

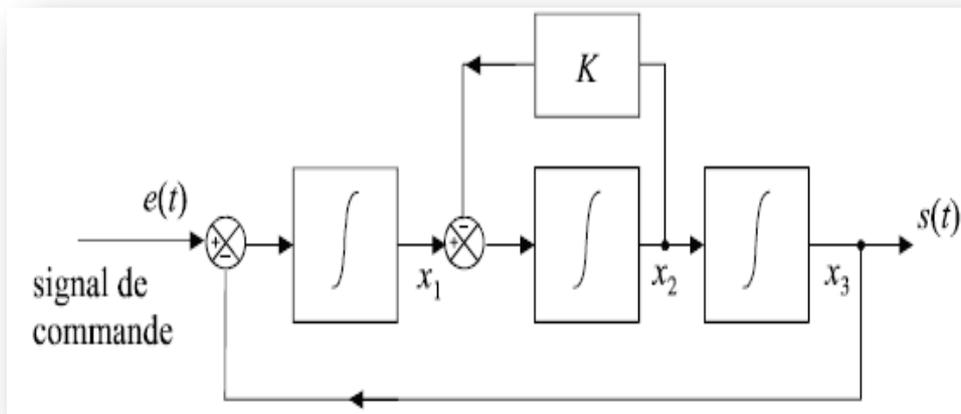


Figure IV.1: exemple représentation d'état d'un système.

L'état d'un système est en général représenté par un vecteur d'état que l'on note

par x en ce qui concerne notre exemple : $x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}$

IV.3. Modélisation du fonctionnement du système :

Lorsqu'un système est modélisé sous la forme d'une représentation d'état, on montre qu'il est possible d'exprimer l'état du système à un instant donné en fonction du signal d'entrée à ce même instant et en fonction de son « passé », autrement dit, de son état précédent. Comme nous avons affaire à des variables continues du temps, la notion d'état précédent n'existe pas vraiment. En revanche, ce concept est à rapprocher de l'évolution du système, autrement dit des variations de chaque variable d'état.

Cela signifie que, d'une manière générale, on peut exprimer l'évolution du système, modélisé par un vecteur constitué des dérivées premières des composantes du vecteur d'état, en fonction du vecteur d'état du système. L'objet qui lie ces deux vecteurs est appelé matrice de commande du système. Le vecteur d'état dépendant bien évidemment aussi du signal d'entrée, on a, pour notre exemple de la figure IV.1 la relation :

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{pmatrix} = \mathbf{A} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} + \mathbf{B} u(t)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 1 & -k & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} e$$

La matrice de commande \mathbf{A} est une matrice carrée, dans notre cas de dimension 3×3 ; \mathbf{B} est un vecteur colonne.

IV.4. Obtention de la matrice de transfert à partir de la représentation d'état

La représentation par matrice de transfert d'un système, est une description externe, de la forme générale suivante :

$$Y(s) = G(s).U(s) \tag{IV. 2}$$

Où

$Y(s)$: Représente-la transformée de Laplace du vecteur de sortie, de dimension r

$U(s)$: Est la transformée de Laplace du vecteur d'entrée, de dimension m

Et $G(s)$: la matrice de transfert du système, de dimension (r, m) .

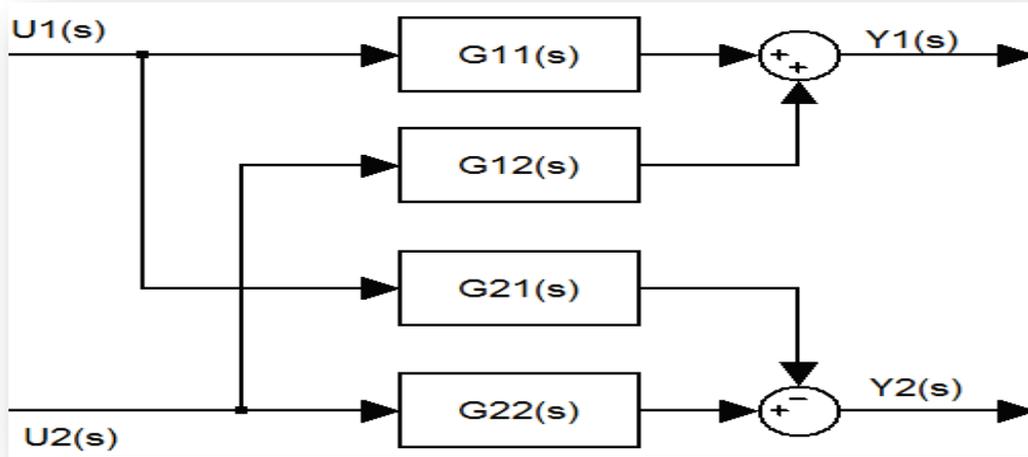


Figure IV.2 : Exemple de système multi variable à deux entrées et deux sorties

La représentation par matrice de transfert du système de la figure IV.1 est alors la suivante :

$$\begin{bmatrix} Y_1(s) \\ Y_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1(s) \\ U_2(s) \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 3})$$

De même que la fonction de transfert d'un système s'obtient en prenant la transformée de Laplace de l'équation différentielle pour des conditions initiales nulles, la matrice de transfert s'obtient en prenant la transformée de Laplace de la représentation d'état pour des conditions initiales nulles. En prenant la transformée de Laplace de la représentation d'état (4.1), on obtient :

$$\begin{cases} sX(s) = AX(s) + BU(s) \\ Y(s) = CX(s) + DU(s) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} X(s) = (sI - A)^{-1}BU(s) \\ Y(s) = CX(s) + DU(s) \end{cases} \quad (\text{IV. 4})$$

D'où :

$$Y(s) = [C(sI - A)^{-1}B + D]U(s)$$

La matrice de transfert du système s'écrit donc :

$$G(s) = [C(sI - A)^{-1}B + D] \quad (\text{IV. 5})$$

IV.5. Commandabilité et observabilité :

La commandabilité et l'observabilité sont deux concepts développés pour la représentation d'état des systèmes qui permettent de caractériser respectivement la possibilité que la commande exerce une influence sur un des états et la possibilité d'obtenir une certaine information d'un des états. Cependant leur concept peut être utilisé dans d'autres représentations.

IV.5.1 Commandabilité :

La commandabilité est une caractéristique d'une représentation d'état d'un système, ou d'un système en soi même, qui nous indique si une ou plusieurs de ces dynamiques peuvent être modifiées par les entrées.

IV.5.1.1 Définition :

Un état x_i est commandable en t_0 s'il est possible de déterminer $u(t)/[t_0 t_f]$ conduisant tout état initial $x_i(t_0)$ vers 0 en $t_0 \leq t_1 \leq t_f$.

Si cette propriété est vraie $\forall t_0$ et $\forall i = 1, \dots, n$ alors le système est complètement commandable.

Remarque:

- ✚ Si un système n'est pas complètement commandable alors pour certaines conditions initiales il n'existe pas d'entrée de commande pouvant ramener le système à l'origine.
- ✚ La commandabilité est une notion importante puisqu'elle établit le fait que l'on puisse commander le système afin de modifier son comportement (stabilisation d'un système instable, modification des dynamiques propres). Cette notion joue donc un rôle très important dans la théorie de la synthèse de systèmes de commande dans l'espace d'état.

IV.5.1.2 Critère de Commandabilité (Kalman) :

C'est un critère qui permet de définir la commandabilité d'un système LTI avec l'information des matrices A et B.

Un système LTI représenté par l'équation dynamique d'état,

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$$

Ou $A \in R^{n \times n}, B \in R^{n \times m}$ est commandable si et seulement si la matrice de commandabilité, \mathcal{C} est de rang n ,

$$\text{rang}(\mathcal{C}) = \text{rang}([B : AB : \dots : A^{n-1}B]) = n \quad (\text{IV. 6})$$

Remarque.

✚ La commandabilité d'un système de matrices caractéristiques (A, B) sera appelée commandabilité de la paire (A, B) .

Rappel.

Le rang d'une matrice A est: le nombre maximal de vecteurs lignes (ou colonnes) linéairement indépendants, et peu se calculer par la taille du plus grand mineur non nul de A .

IV.5.2. Observabilité

L'observabilité est une caractéristique structurelle complémentaire d'une représentation d'état d'un système, ou d'un système en soi même, qui nous indique la capacité pour un système à déterminer l'historique d'un état à partir de la seule connaissance des variables de sortie mesurées

IV.5.2.1 Définition

Un état x_i est observable en t_0 s'il est possible de déterminer $x_i(t)$ en connaissant $y(t)/[t_0 t_f]$.

Si cette propriété est vraie $\forall t_0$ et $\forall i = 1, \dots, n$ alors le système est complètement observable.

Remarque :

La notion d'observabilité est cruciale pour les systèmes où il est impossible de mesurer tout le vecteur d'état, et doit être estimé à partir des données fournies par la sortie.

IV.5.2.2 Critère D'observabilité (Kalman)

La notion d'observabilité et fait intervenir la matrice dynamique A et la matrice de sortie C .

Un système LTI représenté par l'équation dynamique d'état, et de mesure.

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases}$$

Ou $A \in R^{n \times n}, c \in R^{r \times m}$ est observable si et seulement si la matrice d'observabilité, \mathcal{O} est de rang n :

$$\text{rang}(\mathcal{O}) = \text{rang} \begin{pmatrix} c \\ \vdots \\ \mathcal{C}A \\ \vdots \\ \mathcal{C}A^{n-1} \end{pmatrix} = n \quad (\text{IV.7})$$

IV.5.3. Forme canonique commandable :

Dans cette section, on généralisera la représentation d'état à un système dynamique d'ordre n pour la forme canonique de commande. Soit un système décrit sous la forme:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases}$$

Pour que le système soit commandable, il faut qu'il vérifie la condition de commandabilité :

$\text{rang}C_{(A,B)} = n$; $C_{(A,B)}$ S'appelle la matrice de commandabilité du système. Dans le cas mono variable, cette condition devient : $C_{(A,B)} = [B \ AB \ \dots \ A^{n-1}B] \neq 0$

Si cette condition est vérifiée, un système linéaire peut donner, par une transformation de variables, se mettre sous la forme canonique commandable.

Soit l'exemple du système :

$$\frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{dy^{n-1}}{dt^{n-1}} + \dots + a_0 y = b_n \frac{du^n}{dt^n} + b_{n-1} \frac{du^{n-1}}{dt^{n-1}} + \dots + b_0 u$$

On détermine la fonction de transfert correspondante de ce système :

$$G = \frac{Y}{U} = \frac{b_0 + b_1 s^1 + \dots + b_{n-1} s^{n-1}}{a_0 + a_1 s + \dots + a_{n-1} s^{n-1} + s^n} \quad (\text{IV.8})$$

Pour obtenir la représentation d'état, on introduit une variable intermédiaire V tel que :

$$G = \frac{Y}{U} \cdot \frac{V}{V} = \frac{b_0 + b_1 s^1 + \dots + b_{n-1} s^{n-1}}{a_0 + a_1 s + \dots + a_{n-1} s^{n-1} + s^n}$$

En divisant par s^n le numérateur et le dénominateur, on a : (voir doc chap13_staterep-mono)

$$\frac{Y}{U} \cdot \frac{V}{\bar{V}} = \frac{b_0 s^{-n} + b_1 s^{1-n} + \dots + b_{n-1} s^{-1}}{a_0 s^{-n} + a_1 s^{1-n} + \dots + a_{n-1} s^{-1} + 1}$$

$$\frac{Y}{\bar{V}} \cdot \frac{V}{U} = \frac{b_0 s^{-n} + b_1 s^{1-n} + \dots + b_{n-1} s^{-1}}{a_0 s^{-n} + a_1 s^{1-n} + \dots + a_{n-1} s^{-1} + 1}$$

$$\begin{cases} \frac{Y}{\bar{V}} = (b_0 s^{-n} + b_1 s^{1-n} + \dots + b_{n-1} s^{-1}) \\ \frac{U}{\bar{V}} = (a_0 s^{-n} + a_1 s^{1-n} + \dots + a_{n-1} s^{-1} + 1) \end{cases}$$

$$Y = (b_0 s^{-n} + b_1 s^{1-n} + \dots + b_{n-1} s^{-1}) V$$

$$Y = (b_0 x_1 + b_1 x_2 + \dots + b_{n-1} x_n)$$

$$U - V = (a_0 s^{-n} + a_1 s^{1-n} + \dots + a_{n-1} s^{-1}) V$$

Et

$$V = U - (a_0 s^{-n} + a_1 s^{1-n} + \dots + a_{n-1} s^{-1}) V$$

On effectue le changement de variable suivant :

$$\begin{cases} \dot{x}_i = x_{i+1} = V^{(i)} & \text{pour } i = 1, 2, \dots, n-1 \\ \dot{x}_n = v = u - (a_0 x_1 + a_1 x_2 + \dots + a_{n-1} x_n) \end{cases}$$

Et la sortie :

$$y = (b_0 x_1 + b_1 x_2 + \dots + b_{n-1} x_n)$$

A l'aide de ces changements de variables, l'équation différentielle peut se mettre sous la forme matricielle. En posant la transposée du vecteur d'état x par :

$$x^T = [x_1, x_2, \dots, x_n],$$

Les matrices A, B, C, D sont :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -a_0 & -a_1 & -a_2 & \dots & -a_{n-1} \end{bmatrix}$$

$$B^T = [0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 1]$$

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_n \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -a_0 & -a_1 & -a_2 & \dots & -a_{n-1} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix} U$$

$$y = [b_0 \ b_1 \ \dots \ b_{n-1}] \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$$

C'est alors à la forme :

$$C = [b_0 \ b_1 \ \dots \ b_{n-1}]$$

IV.5.4. Forme canonique observable :

Soit l'exemple du système :

$$\frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{dy^{n-1}}{dt^{n-1}} + \dots + a_0 y = b_n \frac{du^n}{dt^n} + b_{n-1} \frac{du^{n-1}}{dt^{n-1}} + \dots + b_0 u$$

On détermine la fonction de transfert correspondante de ce système :

$$G = \frac{Y}{U} = \frac{b_0 + b_1 s^1 + \dots + b_{n-1} s^{n-1}}{a_0 + a_1 s + \dots + a_{n-1} s^{n-1} + s^n}$$

En divisant par s^n le numérateur et le dénominateur, on a :

$$\frac{Y}{U} = \frac{b_0 s^{-n} + b_1 s^{-n+1} + \dots + b_{n-1} s^{-1}}{a_0 s^{-n} + a_1 s^{-n+1} + \dots + a_{n-1} s^{-1} + 1}$$

On obtient :

$$Y(1 + a_{n-1} s^{-1} + \dots + a_0 s^{-n}) = U(b_{n-1} s^{-1} + \dots + b_0 s^{-n})$$

$$Y + Y(a_{n-1} s^{-1} + \dots + a_0 s^{-n}) = U(b_{n-1} s^{-1} + \dots + b_0 s^{-n})$$

$$Y = -Y(a_{n-1} s^{-1} + \dots + a_0 s^{-n}) + U(b_{n-1} s^{-1} + \dots + b_0 s^{-n})$$

$$Y = s^{-1}(-a_{n-1} Y + b_{n-1} U) + s^{-2}(-a_{n-2} Y + b_{n-2} U) + \dots + s^{-n}(-a_0 Y + b_0 U)$$

On pose :

$$x_1 = Y$$

$$s x_1 = s Y = (-a_{n-1} Y + b_{n-1} U) + s^{-1}(-a_{n-2} Y + b_{n-2} U) + \dots + s^{-n+1}(-a_0 Y + b_0 U)$$

Donc :

$$s x_1 = (-a_{n-1} Y + b_{n-1} U) + x_2$$

$$s x_2 = (-a_{n-2} Y + b_{n-2} U) + x_3$$

$$s x_n = (-a_0 Y + b_0 U) + x_3$$

Finalement en les résultats suivent :

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_n \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -a_{n-1} & 1 & 0 & \dots & 0 \\ -a_{n-2} & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \vdots & \dots & 0 & 1 & 0 \\ \vdots & 0 & 0 & \dots & \vdots \\ -a_0 & 0 & \dots & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_{n-1} \\ b_{n-2} \\ \vdots \\ b_0 \end{pmatrix} U$$

$$y = [0 \dots 0 \ 1] \begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_n \end{pmatrix}$$

Pour cette forme particulière, les matrices A, B, C, D s'écrivent :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & \dots & -a_n \\ 1 & 0 & \dots & \dots & -a_{n-1} \\ 0 & 1 & \dots & \dots & -a_{n-2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & -a_1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} c_n \\ c_{n-1} \\ \vdots \\ c_2 \\ c_1 \end{bmatrix}$$

$$C = [0 \dots 0 \ 1] \quad D = 0$$

Cette méthode consiste à partir du schéma analogique et à prendre comme variables d'états les sorties des intégrateurs et à construire ainsi les matrices A, B, C, et D

IV.6.Introduction au découplage:

Les procédés industriels au niveau des variables stratégiques sont très fréquemment multi variables. En effet, la quasi-totalité des procédés industriels comprennent au moins deux variables de sortie : le débit de matière produite ainsi que sa qualité.

La commande algébrique utilisant la représentation par fonction de transfert et la conception de régulateurs par réponse en fréquences est étudiée. Il existe essentiellement deux structures pour commander les procédés multi variable : la commande distribuée et la commande multi variable. La commande distribuée consiste à utiliser des régulateurs mono variables pour commander un procédé multi variable

Cette commande distribuée est donc formée de n_y régulateurs pour un procédé à n_y sortie. La commande multi variable consiste à utiliser un régulateur à n_y entrées et n_u sorties pour commander un procédé à n_y sortie et n_u entrées.

Lorsque la commande est algébrique, elle consiste habituellement en l'introduction de découpleurs entre les régulateurs monovariabiles et le procédé.

IV.7.Choix des couples (entrée/sortie):

Lors de la conception d'une commande distribuée pour un procédé à deux entrées et deux sorties il existe deux combinaisons possibles de couples entrée /sortie tel que montre aux figure IV.3 et IV.4 ce choix des couples entrée /sortie est primordial et déterminant pour les performances recherchées ainsi que pour la stabilité du système .l'analyse par les gains relatifs et leurs extensions permet cette étude.

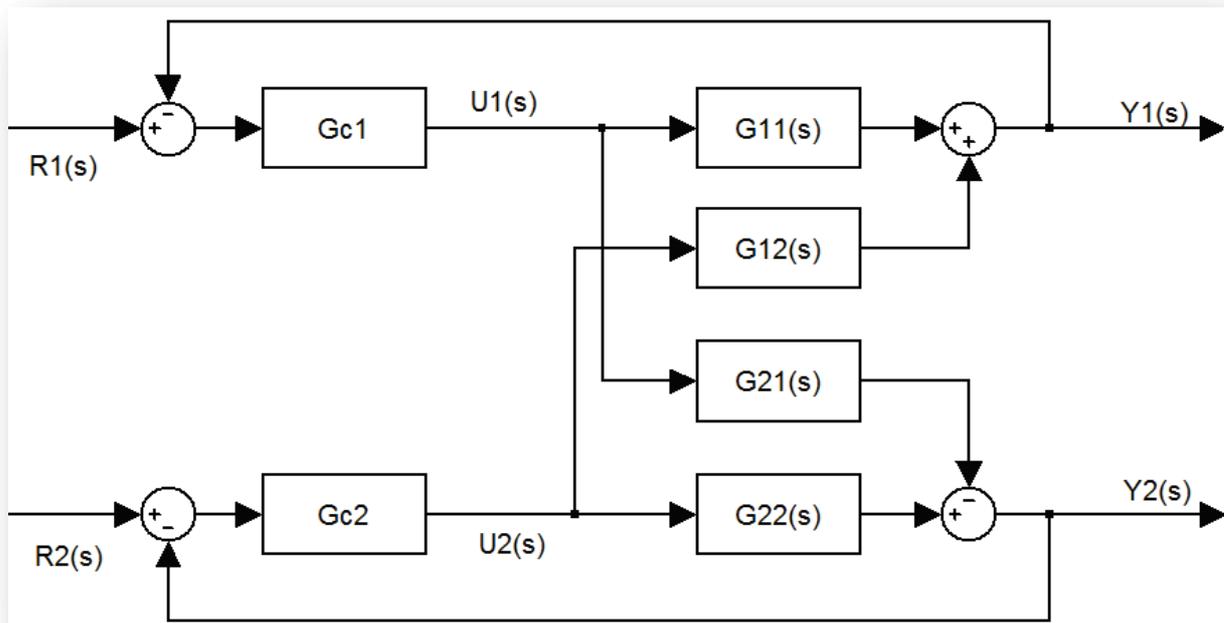


Figure IV.3 commande distribuée ($Y_1 U_1, Y_2 U_2$)

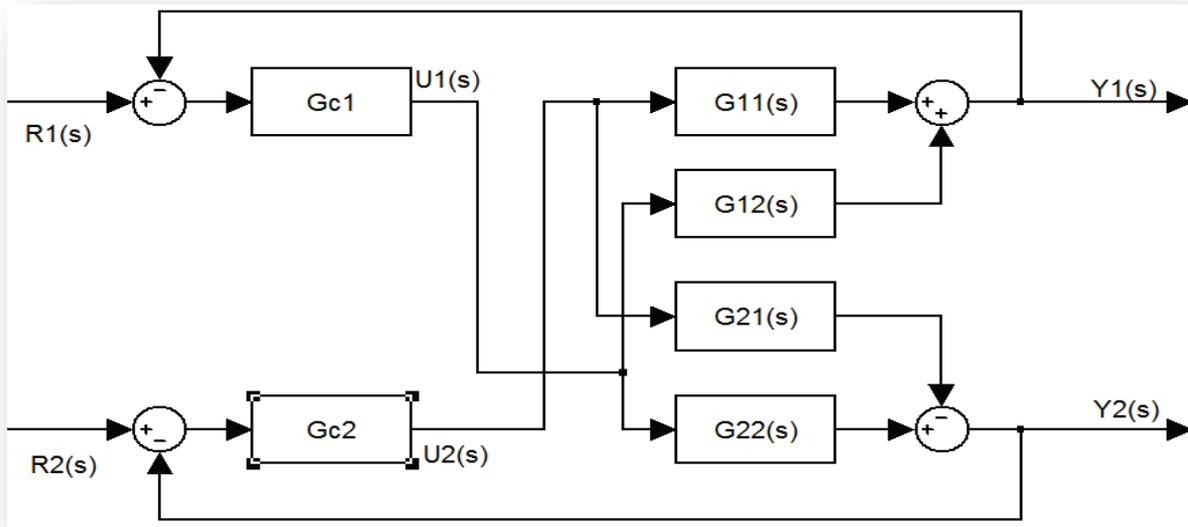


Figure IV.4 commande distribuée ($Y_1 U_2, Y_2 U_1$)

Le découplage statique en amont d'un procédé multi-variable $G_p(s)$, nécessite la conception d'une matrice de transfert $D(s)$ tel que $D(s)$ en série avec $G_p(s)$, produit une matrice de transfert $T(s)$ diagonale

$$T(s) = G_p(s).D(s) \quad (IV. 9)$$

Dans le cas d'un procédé possédant deux entrées et deux sorties, il est possible de définir :

$$D(s) = \begin{bmatrix} D_{11}(s) & D_{12}(s) \\ D_{21}(s) & D_{22}(s) \end{bmatrix}, G_p(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (IV. 10)$$

Et

$$T(s) = \begin{bmatrix} T_{11}(s) & 0 \\ 0 & T_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (IV. 11)$$

La figure IV.5 montre un système de contrôle, avec découplage en amont d'un procédé possédant deux entrées et deux sorties. la matrice de transfert $G_c(s)$ du contrôleur est diagonale et définie comme suit :

$$G_c(s) = \begin{bmatrix} G_{c1}(s) & 0 \\ 0 & G_{c2}(s) \end{bmatrix} \quad (IV. 12)$$

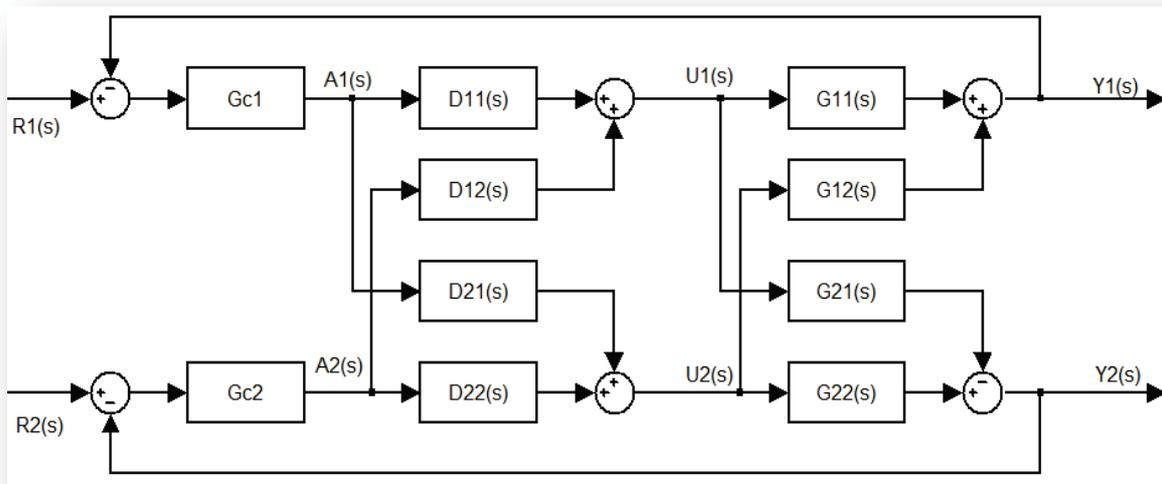


Figure IV.5 : commande multi variable

A partir des matrices de transfert de l'équation (IV.9), l'équation (IV.10) permet d'obtenir :

$$D(s) = \frac{T(s)}{G_p(s)} = G_p(s)^{-1}T(s) \quad (IV.13)$$

On a :

$$G_p(s)^{-1} = \frac{1}{\det G_p(s)} \text{Adj}G_p(s)$$

Avec:

$$\det G_p(s) = G_{11}(s)G_{22}(s) - G_{21}(s)G_{12}(s)$$

$$\text{Adj}G_p(s) = \begin{bmatrix} G_{22}(s) & -G_{12}(s) \\ -G_{21}(s) & G_{11}(s) \end{bmatrix}$$

Donc:

$$G_p(s)^{-1} = \frac{1}{G_{11}(s)G_{22}(s) - G_{21}(s)G_{12}(s)} \begin{bmatrix} G_{22}(s) & -G_{12}(s) \\ -G_{21}(s) & G_{11}(s) \end{bmatrix}$$

$$G_p(s)^{-1}T(s) = \frac{1}{G_{11}(s)G_{22}(s) - G_{21}(s)G_{12}(s)} \begin{bmatrix} G_{22}(s) & -G_{12}(s) \\ -G_{21}(s) & G_{11}(s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_{11}(s) & 0 \\ 0 & T_{22}(s) \end{bmatrix}$$

Alors on obtient le résultat suivant :

$$D(s) = \frac{1}{G_{11}(s)G_{22}(s) - G_{21}(s)G_{12}(s)} \begin{bmatrix} G_{22}(s)T_{11}(s) & -G_{12}(s)T_{22}(s) \\ -G_{21}(s)T_{11}(s) & G_{11}(s)T_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (IV.14)$$

Les termes $G_{11}(s)$, $G_{12}(s)$, $G_{21}(s)$, $G_{22}(s)$ représentent les fonctions de transfert du procédé.

Les termes $T_{11}(s)$, $T_{22}(s)$ représentent les fonctions de transfert désirées du système découplé en boucle ouvert.

IV.8. Les types de découplages de la commande multi variable

IV.8.1. Découplage idéal:

Le découplage idéal c'est la première méthode pour analyser un système de control avec découplage consiste a distinguer les fonctions de transfert $T_{11}(s)$, $T_{22}(s)$ sur lesquelles les contrôleurs vont être réglés, puis a compter a partir de l'équation (IV.14) la matrice de transfert $D(s)$ requise pour le découplage.

Un choix judicieux est $T_{11}(s) = G_{11}(s)$ et $T_{22}(s) = G_{22}(s)$. Ce choix permet d'utiliser le même réglage pour la matrice de transfert $G_c(s)$ du contrôleur indépendamment que l'une ou plusieurs des boucles soient en mode manuel. Ce choix appelé découplage idéal, conduit cependant d'après l'équation IV.14 à des expressions complexes pour la matrice de transfert $D(s)$, qui sont souvent difficiles à réaliser.

IV.8.2. Découplage simplifié:

Ce découplage utile pour simplifier la réalisation de la matrice de transfert $D(s)$, une autre méthode de conception consiste à choisir les éléments de la matrice $D(s)$ et à régler les contrôleurs suivant la matrice de transfert $T(s)$ résultante. Un choix judicieux pour la matrice $D(s)$ appelé «découplage simplifié» et largement utilisé est :

D'après la figure (IV.5) On a :

$$G_p(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} Y_1 = G_{11}U_1 + G_{12}U_2 \\ Y_2 = G_{21}U_1 + G_{22}U_2 \end{cases} \quad (\text{IV. 15})$$

$$\begin{cases} U_1 = A_1 + D_{12}A_2 \\ U_2 = A_2 + D_{21}A_1 \end{cases} \quad (\text{IV. 16})$$

On remplace (IV.16) dans (IV.15) en trouve :

$$\begin{cases} Y_1 = G_{11}(A_1 + D_{12}A_2) + G_{12}(A_2 + D_{21}A_1) \\ Y_2 = G_{21}(A_1 + D_{12}A_2) + G_{22}(A_2 + D_{21}A_1) \end{cases} \quad (\text{IV. 17})$$

$$\begin{cases} Y_1 = (G_{11} + G_{12}D_{21})A_1 + (G_{11}D_{12} + G_{12})A_2 \\ Y_2 = (G_{21} + G_{22}D_{21})A_1 + (G_{21}D_{12} + G_{22})A_2 \end{cases} \quad (\text{IV. 18})$$

$$\begin{cases} (G_{11}D_{12} + G_{12})A_2 = 0 \\ (G_{21} + G_{22}D_{21})A_1 = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} D_{12} = -\frac{G_{12}}{G_{11}} \\ D_{21} = -\frac{G_{21}}{G_{22}} \end{cases}$$

Donc :

$$D(s) = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{G_{12}(s)}{G_{11}(s)} \\ -\frac{G_{21}(s)}{G_{22}(s)} & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 19})$$

$$\begin{cases} Y_1 = (G_{11} - \frac{G_{12}G_{21}}{G_{22}})A_1 \\ Y_2 = (G_{22} - \frac{G_{12}G_{21}}{G_{11}})A_2 \end{cases}$$

On obtient alors :

$$T(s) = \begin{bmatrix} G_{11} - \frac{G_{12}G_{21}}{G_{22}} & 0 \\ 0 & G_{22} - \frac{G_{12}G_{21}}{G_{11}} \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 20})$$

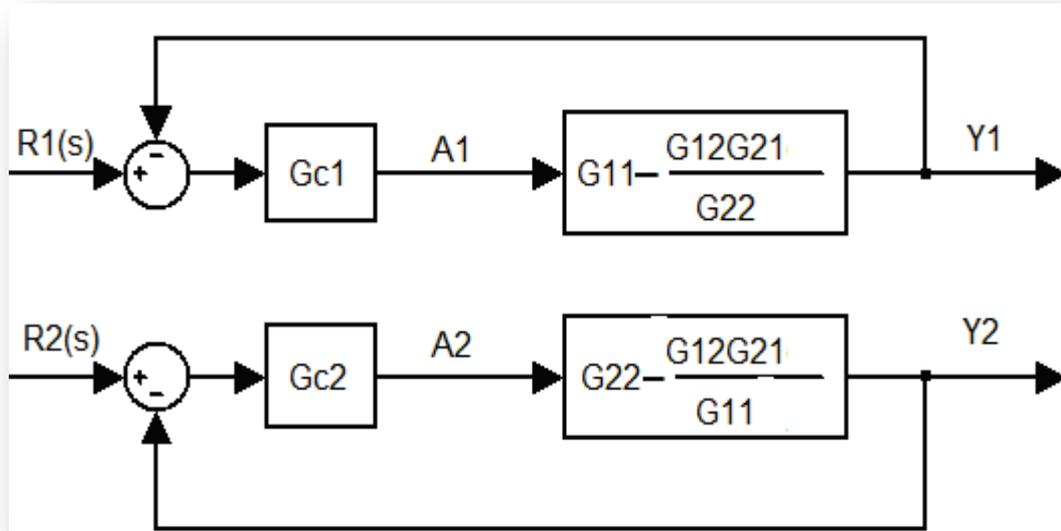


Figure (IV.6): Découplage simplifié

Ce choix facilite effectivement la réalisation du système de découplage. Cependant, la matrice de diagonale $T(s)$ obtenue est beaucoup moins intéressante que la matrice diagonale $T(s)$ obtenue dans le cas du «découplage idéal». En effet la matrice de transfert $T(s)$ de l'équation (IV.11) renferme des sommes de fonctions de transfert qui doivent être approximées par des fonctions de transfert plus simples pour permettre le réglage de la matrice de transfert $G_c(s)$ du contrôleur.

IV.8.3. Découplage inversé :

Le découplage inverse est proposé pour les systèmes multi viables stables même en présence des temps de retards et des zéros instables.

La méthode étudie le système (2×2) , car la plupart des systèmes dont la dimension est supérieur à (2×2) en pratique sont traités comme plusieurs sous systèmes (2×2) [25] [26]

Dans le cas de découplage conventionnel, le decoupleur est simple mais le système découplé est complexe et donc il est difficile à contrôler

On note: le processus découplé, $G = [G_{ij}(i, j = 1, 2)]_{2 \times 2}$ le système à découpler,

$D = [D_{ij}(i, j = 1,2)]_{2 \times 2}$ le découpleur et $C = \text{diag}(C_1, C_2)$ le contrôleur de système découplé.

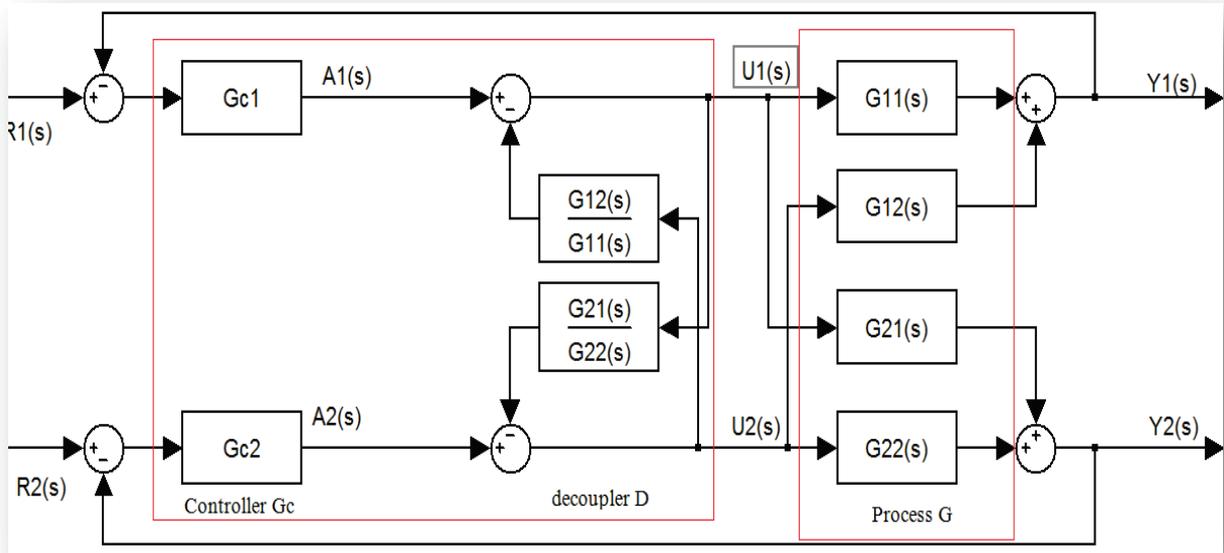


Figure IV.7: Le découplage inversé

La structure de découplage est simple.

Le système découplé obtenu est simple $G = \text{diag}(G_{11}, G_{22})$

La relation entre les entrées du système u_i et les sorties de contrôleur A_i est donnée par :

$$\begin{cases} U_1 = A_1 - \frac{G_{12}}{G_{11}} U_2 \\ U_2 = A_2 - \frac{G_{21}}{G_{22}} U_1 \end{cases} \quad (\text{IV. 22})$$

$$\begin{cases} U_1 = -\left(-\frac{G_{21}}{G_{22}} U_1 + A_2\right) \frac{G_{12}}{G_{11}} + A_1 \\ U_2 = -\left(-\frac{G_{12}}{G_{11}} U_2 + A_1\right) \frac{G_{21}}{G_{22}} + A_2 \end{cases} \quad (\text{IV. 13})$$

$$\begin{cases} U_1 \left(1 - \frac{G_{21} G_{12}}{G_{22} G_{11}}\right) = -\frac{G_{12}}{G_{11}} A_2 + A_1 \\ U_2 \left(1 - \frac{G_{12} G_{21}}{G_{11} G_{22}}\right) = -\frac{G_{21}}{G_{22}} A_1 + A_2 \end{cases} \quad (\text{IV. 14})$$

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{G_{11}G_{22}}{G_{11}G_{22} - G_{12}G_{21}} & \frac{-G_{12}G_{22}}{G_{11}G_{22} - G_{12}G_{21}} \\ \frac{-G_{11}G_{21}}{G_{11}G_{22} - G_{12}G_{21}} & \frac{G_{11}G_{22}}{G_{11}G_{22} - G_{12}G_{21}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.15})$$

Donc :

$$D(s) = \begin{bmatrix} \frac{G_{11}G_{22}}{G_{11}G_{22} - G_{12}G_{21}} & \frac{-G_{12}G_{22}}{G_{11}G_{22} - G_{12}G_{21}} \\ \frac{-G_{11}G_{21}}{G_{11}G_{22} - G_{12}G_{21}} & \frac{G_{11}G_{22}}{G_{11}G_{22} - G_{12}G_{21}} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.16})$$

Cas 1 : Un processus dont les éléments $G_{ij} = G_{ij}$ ($i, j = 1, 2$), avec g_{ij} différent de zéros, Stable, et il ne contient ni un zéro instable ni un temps de retard.

si $\frac{G_{12}}{G_{11}}$ et $\frac{G_{21}}{G_{22}}$ Sont propres, on utilise la configuration présentée. Figure (IV.6)

si $\frac{G_{12}}{G_{11}}$ et $\frac{G_{21}}{G_{22}}$ Sont non propres, on utilise la configuration de découplage inversé alternatif. Figure (IV.7).

Les éléments de découpleur deviendront $\frac{G_{12}}{G_{11}}$ et $\frac{G_{21}}{G_{22}}$.

La relation entre la sortie Y_i et la commande C_i sera

$$\begin{cases} Y_1 = G_{12}C_1 \\ Y_2 = G_{21}C_2 \end{cases}$$

Le système découplé sera :

$$G = \begin{bmatrix} g_{12} & 0 \\ 0 & g_{21} \end{bmatrix}$$

si $\frac{G_{12}}{G_{11}}$ et $\frac{G_{21}}{G_{22}}$ sont bi propres, on peut utiliser les deux configurations celle de la figure (IV.6) ou celle la figure (IV.7)

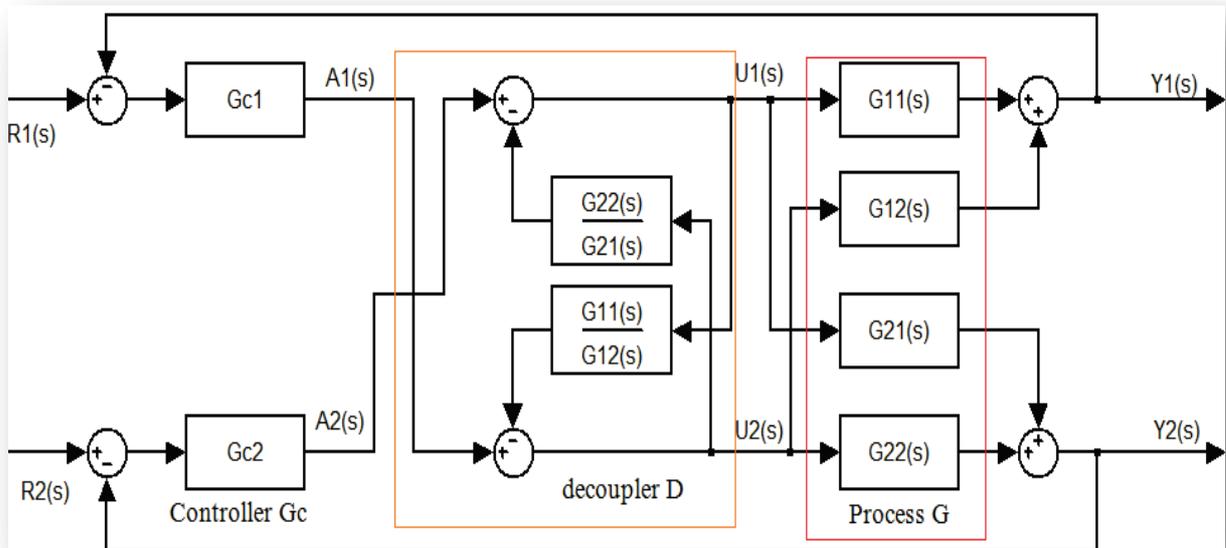


Figure IV.8: le découplage inversé alternatif

IV.9.Conclusion :

L'objectif de ce chapitre c'est que nous avons donné une généralité sur la représentation d'état des systèmes multi variable, et on base sur le découplage a partir de la simulation d'un système comporte deux entrées (β, C_{em}) et deux sorties (Ω_T, P_e)

Conclusion générale :

L'objectif de ce mémoire est l'étude de la commande multi-modèle de la vitesse d'une éolienne avec une représentation d'état à partir d'un modèle de connaissance linéarisé.

Dans le premier chapitre nous avons donné des généralités sur les systèmes éoliens sans oublier la réalité d'énergie éolienne en Algérie et les différents paramètres relatifs à leur fonctionnement.

Dans le second chapitre nous avons présenté la modélisation mathématique et la simulation du sous-système turbine, système d'accouplement (souple et rigide) et la génératrice électrique et on a terminé ce chapitre par un modèle du vent.

Dans le troisième chapitre nous avons étudié la commande multi-modèle, trois cas méthodes peuvent être utilisées, dans notre cas nous avons choisi la méthode de la linéarisation autour d'un point.

Et dans le dernier chapitre nous avons introduit les systèmes multi variables, le découplage a été abordé en se basant sur une représentation matricielle du système dans notre cas deux entrées (β , C_{em}) et deux sorties (Ω_T , P_e).

ANNEXE 1 :

ρ	1.22 kg/m ³
R_T	40m
P_{nom}	2Mw
Ω_{T-nom}	18 tr/min
G_g	92.6
J_T	4.9×10^6 N.m.s ²
J_{g-BV}	0.9×10^6 N.m.s ²

$$C_p = 0.18 \left(\frac{90}{0.4 + 0.5\lambda} - 6.8 - 0.115\beta^2 \right) e^{\frac{-8}{0.4+0.5\lambda} + 0.16}$$

ANNEXE 2 :

Les blocks de simulation développée sous MATLAB-SIMULINK

Modèle du vent :

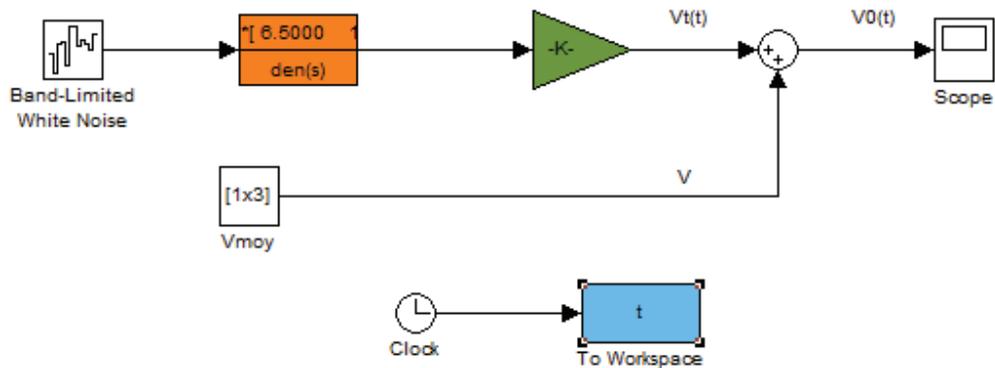
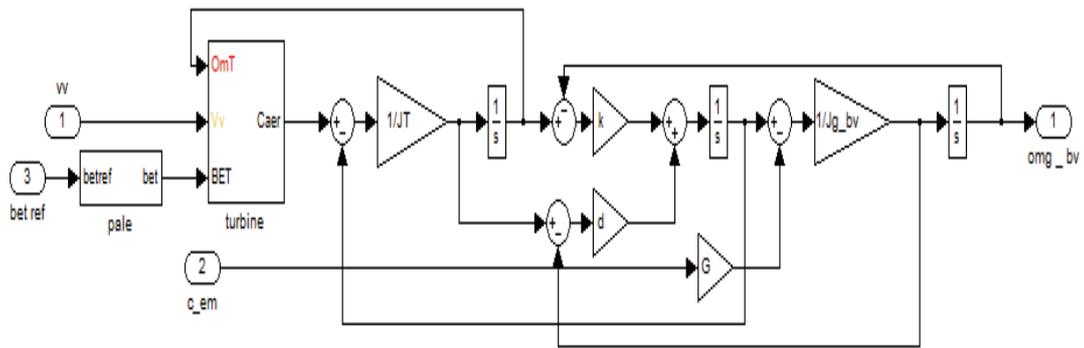


FIG1: modèle SIMULINK du vent de NICHITA

Modèle de régime souple



Modèle de la turbine :

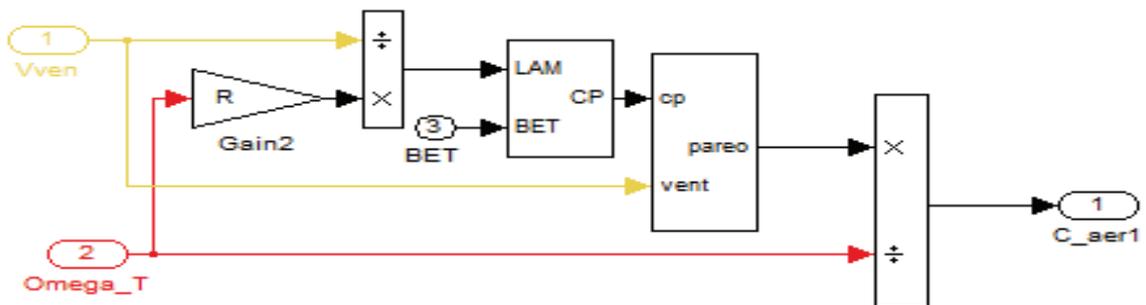


FIG3 :modele SIMULINK de la turbine

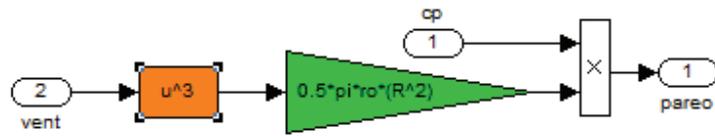


FIG3.1 :Block de calcule de Paero

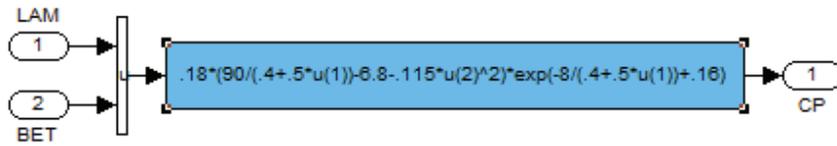
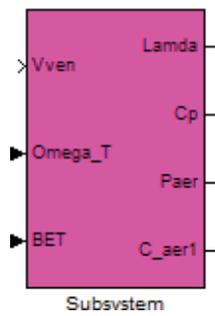
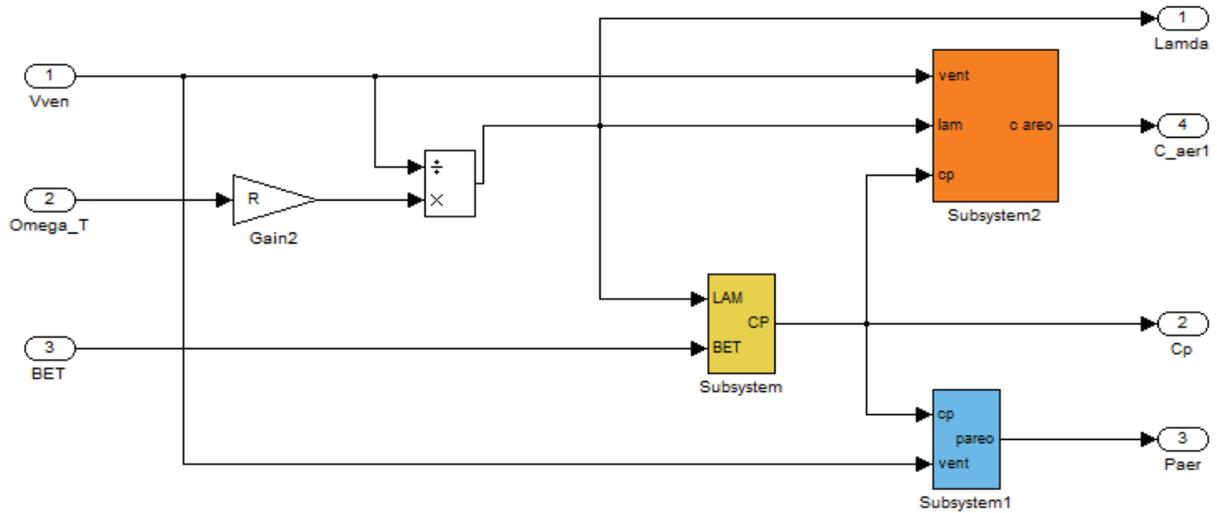


FIG3.2 :Blok du calcule de Cp



Block de turbine.





Modèle rigide

ANNEXE 3 :

Les programmes MATLAB:

%Les paramètres

`G=92.6;R=40;k=114e6;Jgbv=.9e6;JT=4.9e6;fv=2.3;ro=1.22;`

`al=.5*ro*pi*R^2;Jg=Jgbv/G^2;tobt=2;`

`Vv=15;`

%données nominales

`pn=2e+6; omtn=pi*18/30; Caen=pn/omtn;lamn=(omtn*R)/Vv;bet=9.25;`

`omgn=omtn*G;omgbvn=omgn/G;cmn=.19;cen=G*cmn`

`cpn=Caen*omtn/(al*Vv^3);`

%détermination de la dérivée de cp par rapport à beta:

`lm=.4+.5*lamn;`

`dcpbt=-.18*0.23*bet*exp(-8/lm+.16);`

%détermination de la dérivée de lambda par rapport à de omT_n:

`dcplm=.18*exp(-8/lm+.16)*(-72.2+360/lm-.46*bet^2)/lm^2;`

%détermination des coefficients de linéarisations

`ai=al*R*Vv^2*(dcplm-cpn/lamn)/omtn;`

`bi=al*Vv^3*dcpbt/omtn;`

`a11=ai/JT;a12=0;a13=bi/JT;a14=-1/JT;`

`a21=0;a22=0;a23=0;a24=1/(Jg*G);`

`a31=0;a32=0;a33=-1/tobt;a34=0;`

```

a41=k+ai*fv/JT;a42=-k/G;a43=fv*bi/JT;a44=-fv*(1/JT+1/Jgbv);
A=[a11 a12 a13 a14;a21 a22 a23 a24;a31 a32 a33 a34;a41 a42 a43 a44]
b11=0;b12=0;b21=0;b22=G/Jg;b31=1/tobt;b32=0;b41=0;
b42=fv*G/Jgbv;
B=[b11 b12;b21 b22;b31 b32;b41 b42]
c11=1;c12=0;c13=0;c14=0;c21=0;c22=cn;c23=0;c24=0;
C=[c11 c12 c13 c14;c21 c22 c23 c24]
D=[0 0;0 omgn]

```

Programme de calcule Cp

```

clc,clear all,close all
lam=0:.01:15;bet=[0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22];
for jj = 1:length(bet)
    for ii = 1:length(lam)
        cp(ii)=.18*(90/(.4+.5*lam(ii))-6.8-.115*bet(jj)^2)*exp(-
8/(.4+.5*lam(ii))+.16);
    end
    figure(1),hold on,plot(lam,cp)
end
ylabel('cp'),xlabel('lam'),grid
AXIS([min(lam) max(lam) 0 .5]) ,hold off

```

Programme du vent

```

clc,clear all,close all
open('vent'),sim('vent')
figure(1),plot(sort(:,4),sort(:,1),'r',sort(:,4),sort(:,2),'g',sort(:,4),
sort(:,3),'b')

```

programme de calcul de ki et kp

```

VW=[10 14 18 25];
for c = 1:length(VW)
    lamn(c)=(omtn*R)/VW(c);
    cpn(c)=Caen*omtn/(al*VW(c)^3);
    % dérivée de cp par rapport à beta:
    lm(c)=.4+.5*lamn(c);dcpbt(c)=-.18*0.23*bet*exp(-8/lm(c)+.16);
    %dérivée de lambda par rapport à de omT_n:
    dcplm(c)=.18*exp(-8/lm(c)+.16)*(-72.2+360/lm(c)-.46*bet^2)/lm(c)^2;
    ai(c)=al*R*VW(c)^2*(dcplm(c)-
cpn(c)/lamn(c))/omtn;bi(c)=al*VW(c)^3*dcpbt(c)/omtn;
    di(c)=ai(c)-G*gamma;Tdes=JT/di(c)/2,Ki(c)=(JT/Tdes-di(c))/bi(c);
end
for c = 1:length(VW)
    if Vv >= VW(c)
        Vi=VW(c),Vi1=VW(c+1)
        ki=Ki(c),
        ki1=Ki(c+1)
    end
end

```

```

end
%-----p multimodel
tetal=(Vv-Vi)/(Vi1-Vi);teta=1-tetal;
kp=ki*teta+kil*tetal

```

%Calcule les fonctions de transfert

```

gss=ss(A,B,C,D),g=tf(gss),g11=g(1,1),g12=g(1,2),g21=g(2,1),g22=g(2,2),
[n11,d11] = TFDATA(g11,'v');[n12,d12] = TFDATA(g12,'v');
[n21,d21] = TFDATA(g21,'v');[n22,d22] = TFDATA(g22,'v');
t_f=80;n11=[-0.01616 -4.129e-008 -2.047];n12=1*[-6.727e-005 -3334];n21=1*[-
4.829e-011 -0.2217];n22=[174.5 -5.478 2.617e004 911.1];d1=[1 0.5575 150 82.25
3.644];d2=[1 0.05754 149.9 7.289];

```

%decouplage

```

Gc1=dcgain(tf(conv(n12,d1),conv(n11,d2))),Gc2=dcgain(tf(conv(n21,d1),conv(n22,
d2)))
Gcd1=tf(conv(n12,d1),conv(n11,d2)),Gcd2=tf(conv(n21,d1),conv(n22,d2))
open('decoul_khizami'),sim('decoul_khizami')

```

Bibliographie

- [1] MAGHSEL SALIHA, «Contribution a la modélisation et la commande d'une turbine éolienne», mémoire de magister en électrotechnique, université de Skikda.
- [2] <http://www.éolienne>, « Un article de Wikipédia, l'encyclopédie libre »Article de Scientifique American sur l'invention de Brush (1890).
- [3] Adam MIRECKI, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de doctorat, L'institut National Polytechnique de Toulouse avril 2005.
- [4] M. AHMED, « Simulation et diagnostic d'une machine asynchrone à double alimentation d'une éolienne », mémoire de magister en électrotechnique université Ferhat Abbas- Sétif, 07/06/2011.
- [5] B. ABDELHAKIM, « Contrôle des puissances active et réactive de la machine à double alimentation (DFIM) », mémoire de doctorat en électrotechnique, université de Batna, 10/02/2010
- [6] Nachida KASBADJI MERZOUK, « Evaluation du gisement énergétique éolien contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie », Thèse de doctorat, L'université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen 2006.
- [7] Khaled FERKOUS, «Etude d'une chaine de conversion d'énergie éolienne »Mémoire de Magister, Université Mentouri Constantine, 2009.
- [8] M. S. ABDOULAZIZ, « Etude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne », mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique, 2007.
- [9] RANDEE HOLMES et SUSAN EDWARDS, « L'ABC des technologies de l'énergie renouvelable », <http://www.pollutionprobe.org>, septembre2003.
- [10] G. ABDELKADER, R. M. ILYAS, « Commande par modes glissants d'une éolienne basé sur machine asynchrone à double alimentation », mémoire de master en automatique, octobre 2011.
- [11] RANDEE HOLMES et SUSAN EDWARDS, « L'ABC des technologies de l'énergie renouvelable », <http://www.pollutionprobe.org>, septembre2003.
- [12] « Rapport Mondial 2010 sur l'énergie Eolienne », 10th. world windenergyconference&renewableenergy exhibition, 31 oct. au 2 nov. 2011.

- [13] « Baromètre éolien Wind power baromètre », euroobserver'ER , journal de l'éolien n°12 – février 2013
- [14] NAOUEL HAMDI, « Modélisation et commande des génératrices éolienne », mémoire de magister en électrotechnique, université MENTOURI de Constantine, 24/01/2008
- [15] A.DIOP, « Contribution au développement d'un simulateur électromécanique d'aérogénérateur : Simulation et commande en temps réel d'une turbine de puissance moyenne à angle de calage variable », Thèse de Doctorat de l'Université de Havre, 1999.
- [16] N. Laverdure, « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaire », Thèse Doctorat de l'INPG ; Spécialisé : Génie électrique ; 09 décembre 2005
- [17] H. Camblang, « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la production d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable », Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (ENSAM) Bordeaux 2004
- [18] D. Marin, « Intégration des éoliennes dans les réseaux électriques insulaire », Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2009
- [19] F. D. Bianchi, H. De Battista, et and R. J. Mantz, « Wind turbine control systems : principles , modeling and gain scheduling design », Springer-Verlag. Londres, 2007.
- [20] F. Lescher, « Commande LPV d'une éolienne à vitesse variable pour l'optimisation énergétique et la réduction de la fatigue mécanique », Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2006.
- [21] G. Cunty, « Eolienne et aérogénérateurs : guide de l'énergie éolienne », Edisud, 2001
- [22] H. Camblang, « Digital robust control of a variable speed pitch regulated wind turbine for above rated wind speeds », Control Engineering Practice, vol. 16, pp:946-958, 2008.
- [23] C. Nichita, D. Luca, B. Dakyo et E. Ceanga « Large band simulation of the wind speed for real time wind turbine simulators », IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 17, pp : 523-529, 2002.
- [24] V. Rogez, « Modélisation simplifiée de sources de production décentralisée pour des études de dynamique de réseaux. Application à l'intégration d'une production éolienne dans un réseau de distribution insulaire », Thèse de doctorat, Université d'Artois, Faculté des sciences appliquées, 2004.

- [25] F. Morilla, F. Vázquez, J. Garrido. « Centralized PID Control by Decoupling for TITO Processes ». UNED. Dpto. de Informática Madrid (Spain). Universidad de Córdoba Dpto. de Informática y Automática. Córdoba (Spain), 2008 IEEE.
- [26] P. Chen, W. Zhang. « Improvement on an inverted decoupling technique for a class of stable linear multivariable processes». Department of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, PR China. ISA Transactions 46 (2007) 199–210.