

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



Département d'Automatique

Laboratoire de Commande des Processus

Mémoire pour l'obtention du diplôme
de master en Automatique

Etude Comparative des Techniques MPPT pour une Centrale Solaire à effet de Cheminée

Mohammed Sadiq FERDI

Sous la direction de

Mr. M. TADJINE Professeur

Mr. M. CHAKIR Magister

Présenté et soutenu publiquement le 26/06/2016

Composition du Jury :

Président	Mr. B. HEMICI	Professeur	Ecole Nationale Polytechnique
Promoteurs	Mr. M. TADJINE	Professeur	Ecole Nationale Polytechnique
	Mr. M. CHAKIR	Magister	Ecole Nationale Polytechnique
Examineur	Mr. M.S. BOUCHERIT	Professeur	Ecole Nationale Polytechnique

ENP 2016

Remerciement

Nous tenons à exprimer tous nos vifs remerciements et nos profondes Gratitudes à nos promoteurs : M.TADJINE et M. CHAKIR pour leurs disponibilités, aides et bonnes humeurs durant toutes les étapes de ce projet. Leurs dévouements, conseils scientifiques et suivis, nous ont permis de mener notre travail à terme.

ملخص:

يركز هذا العمل على دراسة مقارنة لعدة خوارزميات تتبع نقطة الطاقة القصوى مطبقة على برج الطاقة الشمسية الحرارية.

نحاول تحسين كفاءة الطاقة التي ينتجها برج الطاقة الشمسية من خلال التحكم في سرعة المولد الغير متزامن مزدوج التغذية وخوارزميات تتبع نقطة الطاقة القصوى وبالتالي أجرينا دراسة مقارنة لعدة خوارزميات تتبع نقطة الطاقة القصوى برهنا بمساعدة دراسة محاكاة قدرتهم على تحديد نقطة الاستطاعة القصوى العامة

كلمات مفتاحيه: الطاقة الشمسية الحرارية، مولد غير متزامن مزدوج التغذية، التوربينات، تحكم، خوارزميات تتبع نقطة الطاقة القصوى.

Abstract :

This work focuses on comparative study between several MPPT algorithms for solar updraft tower.

In the first part, we present the description of solar updraft tower, then we try to optimize the power produced by a solar tower through the speed control of an double-fed asynchronous machine and the maximum power point tracking strategy, then we propose some algorithms for the optimization of produced power.

Then, we undertook a comparative study between several MPPT algorithms. The simulation run on MATLAB and the results of their capacities to track the global maximum power point are shown in this work.

Keywords : thermal solar station, collector, tower, turbine, modeling, control, MPPT.

Résumé :

Ce travail concerne Etude comparative des techniques MPPT pour une centrale solaire à effet de cheminée.

On cherche à optimiser la puissance produite dans une centrale à effet de cheminée à travers la commande en vitesse d'une machine asynchrone doublement alimentée et des algorithmes d'optimisation.

Ainsi, nous avons procédé à une étude comparative entre plusieurs algorithmes MPPT. Nous montrons grâce à des études de simulations sous MATLAB leurs capacités à localiser le point de puissance maximale global.

Mots clé : Station solaire thermique, machine asynchrone à double alimentation, collecteur, turbine, modélisation, commande, MPPT.

Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction générale	7
Description de la cheminée solaire	9
1.1. Introduction.....	9
1.2. Historique	9
1.3. Principe de fonctionnement	10
1.4. Description de la cheminée solaire	11
2.1.1. Collecteur solaire	11
2.1.2. Tubes de stockage.....	12
2.1.3. Cheminée (la tour)	13
2.1.4. Turbine.....	13
1.5. Conclusion	14
Optimisation de la puissance d'une cheminée solaire	16
1.6. Introduction.....	16
1.7. Caractéristique de la puissance	16
1.8. Algorithmes MPPT	18
2.1.5. Méthode de Perturb & Observ (P&O).....	18
2.1.6. MPPT-flou	20
2.1.6.1. Principe de l'algorithme	21
2.1.7. MPPT par l'algorithme du gradient.....	23
2.1.8. MPPT par algorithme Newton	23
2.1.9. MPPT-MCR.....	25
1.9. Etude comparative	25
1.10. Conclusion	29
Conclusion générale.....	30
Bibliographie	31

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Différents cas de décision sur la référence	19
Tableau 2.2 : Décisions sur $\Delta\Omega_{\text{ref}}$ selon x	22
Tableau 2.3 : Temps de réponse des différentes méthodes.	26
Tableau 2.4 : Taux de dépassement pour les différentes méthodes	27
Tableau 2.5 : Taux d'oscillation pour les différentes méthodes	28

Liste des figures

Figure 1.1 : Centrale de Mansanares à effet de cheminée.	10
Figure 1.2 : Principe de fonctionnement de la cheminée solaire.	11
Figure 1.3 : Collecteur [11].	12
Figure 1.4 : Principe du stockage de chaleur (tubes noirs remplis d'eau) [3].	12
Figure 1.5 : Effet de stockage de chaleur dessous du toit du collecteur en utilisant le noir rempli d'eau tubes [3].	12
Figure 1.6 : Turbine pour cheminée solaire.	13
Figure 2.1 : Puissance en fonction de la vitesse de rotation	17
Figure 2.2 : Schéma de l'optimisation de la puissance.	18
Figure 2.3 : Principe de fonctionnement du MPPT-P&O	19
Figure 2.4 : Organigramme d'un algorithme MPPT-P&O	20
Figure 2.5 : Les fonctions d'appartenance.	22
Figure 2.6 : Variation de la vitesse de rotation.	26
Figure 2.7 : Variation de la puissance pour les différentes méthodes.	27
Figure 2.8 : Variation de la puissance pour les différentes méthodes.	28

Introduction générale

Ces dernières années, la tendance générale dans le monde est de s'orienter vers une économie durable, sachant que l'énergie est le moteur principal de l'économie, l'introduction de la durabilité dans l'économie ne peut être réalisée qu'avec des énergies renouvelables. Sans doute l'énergie renouvelable est le défi du 3ème millénaire car l'énergie a devenu le poumon de la vie quotidienne, et elle générée en grande partie par des sources épuisables, ce qui rend la vie sur notre planète en un vrai danger, donc il ne reste qu'un seul alternatif qui est également les énergies renouvelables. Par ailleurs, les énergies renouvelables sont la seule solution pour la problématique du réchauffement climatique, à savoir que les répercussions de cette problématique sont déjà visibles.

Parmi ces énergies on trouve l'énergie solaire qui renferme une vraie opportunité pour se débarrasser de la dépendance énergétique, vue la disponibilité des zones avec des irradiances solaire très élevées qui atteignent 1500 W/m^2 .

Notre travail qui concerne le domaine des énergies renouvelables, présente en premier temps le principe de fonctionnement et les caractéristiques des centrales solaires à effet de cheminée

Par la suite, on présente de la stratégie proposée pour l'optimisation de la puissance générée par une centrale à effet de cheminée et le réglage de la vitesse de rotation de la machine, par la suite on propose pour l'optimisation de la puissance générée plusieurs algorithmes MPPT, et finalement on effectue les simulations avec différentes caractéristiques pour valider la stratégie proposée.

On termine ce travail par une étude comparative des différentes techniques MPPT appliquées à une centrale solaire à effet de cheminée.

Chapitre 1

Description de la cheminée solaire

Chapitre 1

Description de la cheminée solaire

1.1. Introduction

Dans ce chapitre on va présenter une des ressources d'énergies renouvelables d'une nature solaire thermique, c'est la centrale solaire à effet de cheminée. Une description de ce système étudié sera présentée avec ses différents éléments.

1.2. Historique

Malgré l'existence importante de l'énergie solaire dans les régions chaudes, le vent est très faible. Donc l'exploitation d'énergie éolienne dans ces régions est impossible. Un type d'exploitation d'énergie solaire se fait par un dispositif appelé la cheminée solaire qui permet d'engendrer un mouvement d'air sous forme de vent artificiel à partir de l'énergie solaire. La cheminée solaire est une génératrice de la puissance électrique à partir de l'énergie solaire, elle utilise l'énergie solaire sous forme des radiations afin de transformer l'énergie cinétique d'écoulement de l'air chauffé en énergie électrique au moyen d'une ou des turbine. L'impact de la forme de la cheminée solaire sur les transferts de chaleur est très intéressante afin d'améliorer les performances de ces systèmes solaires.

Le premier concept de la tour solaire a été inventé en 1903 par le colonel espagnol *Isidoro Cabanyes* comme en atteste la publication « *La energía eléctrica* », puis décrit en 1931 par *Hanns Günther* et enfin fut formalisé en 1968 par Joorg Schlaich ingénieur et chercheur de nationalité allemande. La construction du premier pilote a commencé en 1981 à Manzanares en Espagne, financé par le Ministère Allemand de la Recherche et des Technologies (BMFT) et réalisé par la société d'ingénierie Schlaich Bergermann und Partner (SBP).

La centrale a pu fournir une puissance de 50 kW en pointe. La turbine a fonctionné 3067h de jour et 244h de nuit (grâce au stockage thermique du sol) en 1987, réalisant ainsi une moyenne de plus de 8h45 par jour. A la suite de cette série d'essais, de nombreuses recherches publiques et privées ont été menées jusqu'à aujourd'hui. Le bureau d'ingénierie d'OTH baptisé Elioth a breveté au début de l'année 2006 le concept de Montagnes Solaires. Fondé sur le même principe, la cheminée est ici remplacée par un conduit qui épouse le relief montagneux [10].



Figure 1.1 : Centrale de Manzanares à effet de cheminée.

1.3. Principe de fonctionnement

Une cheminée solaire met à profit le vent créé dans une cheminée, par les différences de densité due à l'échauffement de l'air, pour faire tourner une turbine et générer de l'électricité. Deux principes de base sont derrière la production d'électricité dans la tour solaire, l'effet de serre et l'écoulement de l'air. L'air chaud étant plus léger que l'air froid, donc il va être canalisé vers la tour et s'élève. L'irradiation solaire passe à travers le verre placé tout autour de la cheminée centrale, le collecteur, est absorbée par le sol au-dessous et réémise à l'air sous l'effet de serre, l'air est donc chauffé grâce au soleil et provoque un vent (la création d'une différence de pression dans la colonne de la tour, conduire l'air de la base de la tour à sa sortie supérieure). Une turbine éolienne, qui est généralement située à la base de la tour, est mise dans la trajectoire de l'écoulement de l'air pour convertir l'énergie cinétique de l'air écoulant en énergie mécanique, et le générateur entraîné par la turbine convertit l'énergie mécanique en énergie électrique (voir Figure 1.2).

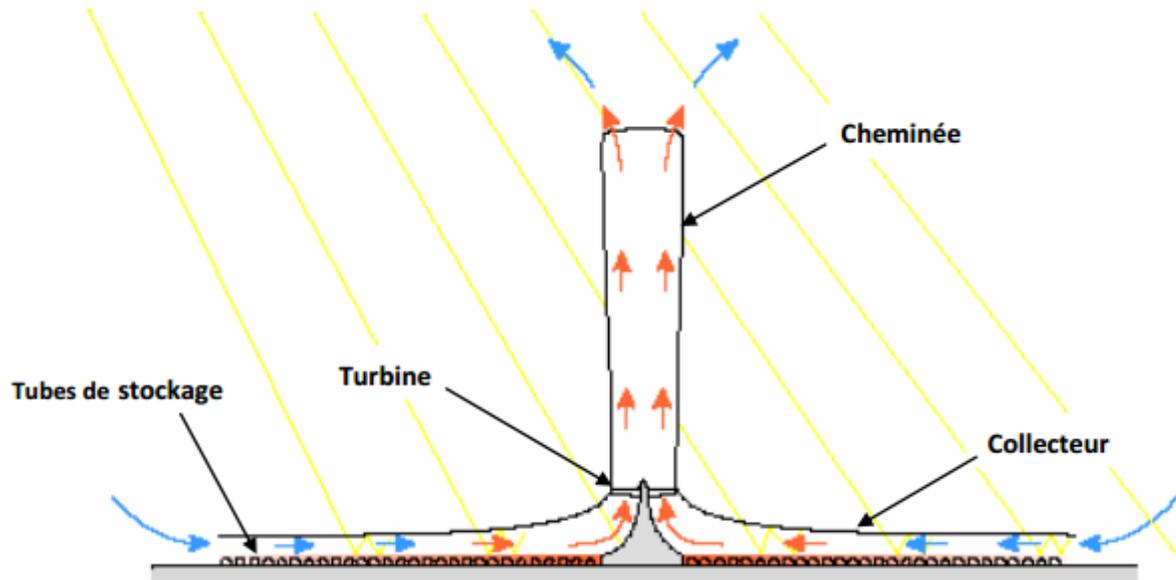


Figure 1.2: Principe de fonctionnement de la cheminée solaire.

1.4. Description de la cheminée solaire

La cheminée solaire est constituée de trois composants principaux qui sont le collecteur solaire, la cheminée ou la tour, et la turbine éolienne. Les sections suivantes décrivent l'importantes composants, leur rôle dans la tour, et de leurs matériaux et de la construction.

2.1.1. Collecteur solaire

Un toit en vitre ou en film plastique, avec une grande de transparence au spectre solaire, mais avec une faible transparence au rayonnement infrarouge émis depuis le sol chauffé, et la terre en dessous forment un collecteur d'air. Le collecteur est ouvert à la périphérie pour permettre d'introduction de l'air frais. Le toit du collecteur a pour but de capter l'irradiation solaire pour chauffer l'air à l'intérieur du collecteur. Cet ensemble du collecteur fonctionne sous le principe de la serre. Au milieu du collecteur, est placée une cheminée verticale avec un joint étanche entre sa base et le toit. La hauteur de toit augmente au voisinage de la base de cheminée, afin que l'air soit détourné en mouvement vertical.



Figure 1.3 : Collecteur [11].

2.1.2. Tubes de stockage

Le stockage de l'énergie thermique est assuré par des tubes noirs remplis d'eau, et mis côte à côte sur le sol. Ils sont remplis d'eau une seule fois et restent par la suite fermés, afin qu'aucune évaporation ne puisse avoir lieu. Le volume d'eau dans les tubes est choisi pour correspondre à une couche d'eau avec profondeur de 5 à 20 cm en fonction des caractéristiques de puissance de sortie désirés. Puisque la capacité calorifique de l'eau (4.2 kJ/kg) est beaucoup plus grande que celle du sol (0.75- 0.85 kJ/kg), l'eau à l'intérieur des tubes stocke une partie de la chaleur solaire et la libère pendant la nuit, quand l'air dans le collecteur se refroidit. Cela permet à la centrale de fonctionner pendant 24 h par jour en énergie solaire pure.

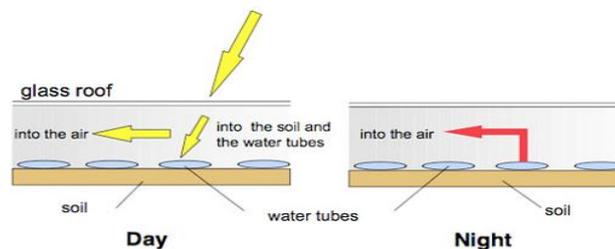


Figure1.4 : Principe du stockage de chaleur (tubes noirs remplis d'eau) [3].

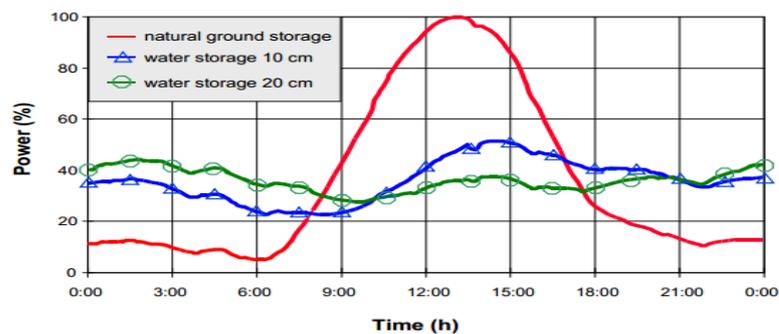


Figure 1.5 : Effet de stockage de chaleur dessous du toit du collecteur en utilisant le noir rempli d'eau tubes [3].

2.1.3. Cheminée (la tour)

La cheminée est le moteur thermique réel de l'équipement. Il s'agit d'un tube à faible frottement (comme hydro power station pressure tube). Pour créer un écoulement d'air sous forme de vent, Il faut que la hauteur de la cheminée soit plus élevée, pour atteindre un niveau de basse pression par rapport au niveau de la base. L'augmentation de La différence de pression entre l'air à la sortie de la cheminée et celle d'entrée entraine une augmente de la vitesse d'écoulement de l'air chaud dans la cheminée. La base de la cheminée est fixée sur la terre par des supports, dont une forme triangulaire et aérodynamique, ce qui évite la perte de charge cinétique et le décollement de l'air. La cheminée est construite généralement en béton armé son épaisseur varie en fonction de la hauteur, par exemple la cheminée du projet australien a un diamètre de 170 m et une épaisseur de 1 m en niveau de sa base puis diminue jusqu'à 0.25 m.

Plusieurs facteurs contribuent à la conception physique de la cheminée. La cheminée devraient être conçus pour minimiser les pertes par frottement et de maximiser la différence de pression dans la tour. La différence de pression dans la tour est proportionnelle à sa hauteur, donc la maximisation de la hauteur de la tour est essentielle pour l'amélioration de l'efficacité de la tour.

2.1.4. Turbine

Les turbines sont toujours placées à la base de la cheminée où la vitesse d'écoulement d'air est plus élevée, pour transformer le maximum d'énergie cinétique en énergie mécanique. La transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique se fait grâce au générateur entraîné par la turbine. La position des turbines à la base de la tour rend la maintenance et la connexion à l'équipement du générateur électrique plus facile. Une seule turbine peut être montée sur l'axe vertical à l'intérieur de la cheminée, tandis que plusieurs éoliennes peuvent être placées soit dans la cheminée ou dans la zone de transition entre la cheminée et le collecteur.

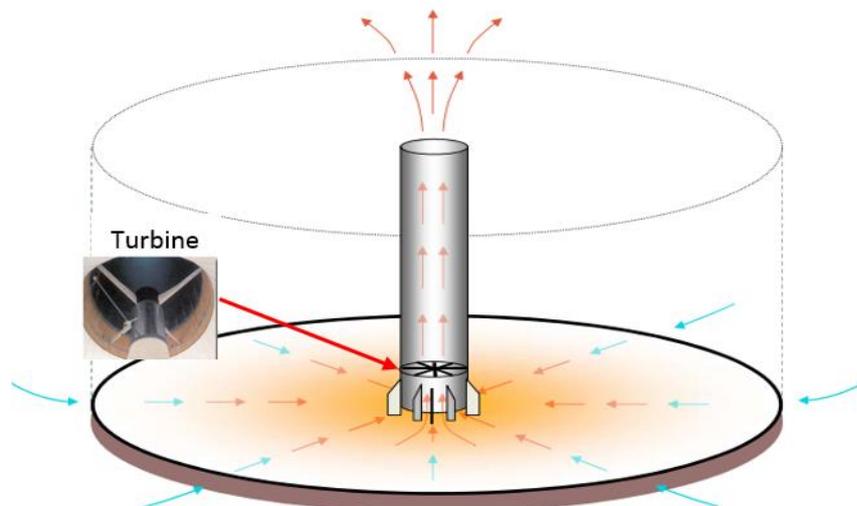


Figure 1.6 : Turbine pour cheminée solaire.

1.5. Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté une des ressources d'énergies renouvelables d'une nature solaire thermique, c'est la centrale solaire à effet de cheminée. Une description de ce système étudié e été présentée avec ses différents éléments.

Chapitre 2

Optimisation de la puissance d'une cheminée
solaire

Chapitre 2

Optimisation de la puissance d'une cheminée solaire

1.6. Introduction

Au contraire des centrales électriques classiques où la puissance de sortie est commandable, la puissance générée par une centrale à effet de cheminée dépend de l'irradiation solaire, qui est une entrée non-commandable ; le fait que la production de l'énergie dans ce type de centrale suit des perturbations, rend cette production non-commandable. En générale, dans ce type de centrale électrique le but est de maximiser la puissance produite au lieu de la commander.

Le problème lié à ce type d'installation est que les paramètres correspondants à la puissance maximale générée par la centrale varient avec l'irradiation solaire, en plus il est difficile de trouver une relation analytique qui lie ces paramètres avec l'irradiation solaire. L'approche que peut être utilisée est le suivi à travers des algorithmes de recherche basée principalement sur les règles d'optimisation. La méthode appelée généralement MPPT (maximum power point tracking) qui est largement utilisée dans le domaine des énergies renouvelables tel que les panneaux photovoltaïques et les générateurs éoliennes. Les algorithmes MPPT ne se basent pas sur des relations analytiques ou bien un modèle nominale mais plutôt sur les mesures prises du système.

Dans ce chapitre, on aborde en premier lieu le schéma global de l'optimisation de la puissance générée par une centrale à effet de cheminée, par la suite on élabore le schéma global avec des algorithmes de maximisation de la puissance. Pour cette partie on a utilisé et proposé plusieurs algorithmes d'optimisation de la puissance.

1.7. Caractéristique de la puissance

Dans une centrale à effet de cheminée la puissance produite est en fonction de la chute de pression à travers la turbine Δp et le débit volumique \dot{V} , le produit de la chute de pression par le débit volumique présente la puissance produite par la turbine, cette puissance est nulle pour les deux cas extrêmes où la chute de pression est nulle $\Delta p = 0$ ou bien la chute de pression est maximale $\Delta p = \Delta p_{\max}$. Entre ces deux extrémités il existe un point optimal pour la puissance produite, généralement ce point est situé à 80% de la chute de pression maximale, sachant que ce point optimal de fonctionnement est variable en fonction de l'irradiation solaire et les conditions climatiques le suivi de ce point à travers des relations analytique est difficile et moins efficace. L'approche que peut être utilisée est le suivi à travers des algorithmes de recherche basée principalement sur les règles d'optimisation.

La méthode appelée généralement MPPT (maximum power point tracking) largement utilisée dans le domaine des énergies renouvelables tel que les panneaux photovoltaïques et les générateurs éoliennes, les algorithmes MPPT ne se basent pas sur des relations analytiques ou bien un modèle nominale mais plutôt sur les mesures prises du système, ils permettent de se positionner au point optimal de la puissance générée sans avoir les paramètres qui correspondent à ce point.

Le problème peut être posé comme suit, puisque la chute de pression à travers la turbine et le débit volumique dans la cheminée sont en fonction de la vitesse de la turbine, donc le produit de la chute de pression et le débit volumique qui présente la puissance générée par une centrale à effet de cheminée est liée à la vitesse de rotation de la turbine, la figure donnée au dessous présente la puissance à la sortie de la turbine pour des irradiations solaire différentes :

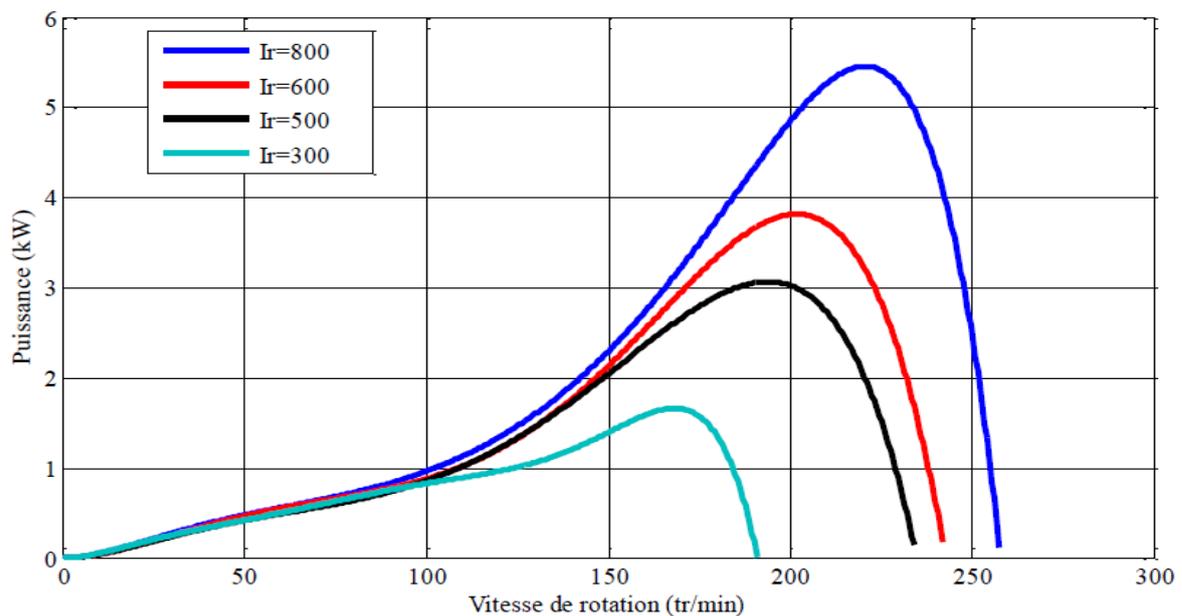


Figure 2.1 : Puissance en fonction de la vitesse de rotation

Cette caractéristique montre l'existence d'un point qui optimise la puissance produite par la turbine par rapport de la vitesse de rotation, ce point varie avec la variation de l'irradiation solaire ce qui mène à varier la vitesse de rotation de la turbine pour pouvoir traquer ce point qui définit l'objectif principal de l'optimisation de la puissance produite.

La possibilité d'agir sur la vitesse de rotation de la turbine à travers l'asservissement de la machine asynchrone doublement alimentée permet de parcourir la caractéristique puissance-vitesse dans le sens puissance croissante ce qui permet finalement de tomber sur le optimum, la décision sur la référence de la vitesse de rotation sera basée sur la mesure de la valeur de la puissance générée à l'instant présent et celle de l'instant précédent.

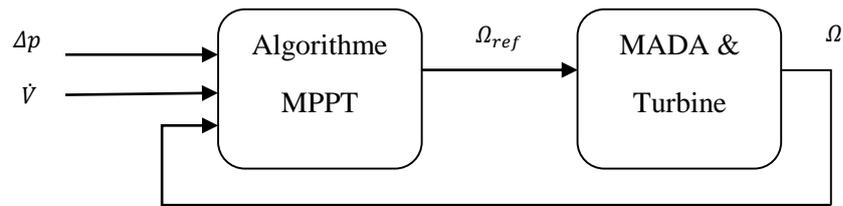


Figure 2.2 : Schéma de l'optimisation de la puissance.

Sachant que la chute de pression Δp et le débit volumique \dot{V} sont disponibles à la mesure, la mesure de la chute de pression à travers la turbine Δp et le débit volumique \dot{V} , donne la puissance générée par la turbine $P = \Delta p \cdot \dot{V}$, cette puissance est enregistrée dans une mémoire à chaque instant t afin de la comparer à la valeur suivante, la valeur de la vitesse de rotation est aussi enregistrée à chaque fois pour pouvoir déterminer le sens qu'avec lequel on parcourt la caractéristique puissance-vitesse. La référence de vitesse sera fonction de la différence entre la puissance actuelle et la puissance précédente, et la différence entre vitesse actuelle et la vitesse précédente. Le schéma donné au dessus est valable pour tous les algorithmes MPPT.

1.8. Algorithmes MPPT

Les algorithmes MPPT sont généralement applicables à tout système dont l'énergie d'entrée est variable, et inconnue. On peut ainsi faire le parallèle avec des applications aussi diverses que l'éolien, l'énergie marine sous différentes formes. Plusieurs approches existent pour ce qui concerne les algorithmes MPPT.

2.1.5. Méthode de Perturb & Observ (P&O)

La méthode P&O est sans doute la plus naturelle qui vient à l'esprit pour faire une recherche du point maximal de puissance (*MPP*, *Maximum Power Point*). Dans le cas d'une centrale à effet de cheminée, il s'agit en fait d'un algorithme qui va chercher la valeur optimale par 'essai-erreur' : en faisant varier la valeur de la vitesse de rotation Ω , et en analysant la puissance de sortie avec l'objectif de maximiser la puissance produite, la variation de la vitesse sera dans le sens où la variation de la puissance est positive. Le sens de variation de la vitesse est inversé chaque fois que la puissance décroît, la figure suivante illustre le principe de fonctionnement d'un algorithme MPPT-P&O :

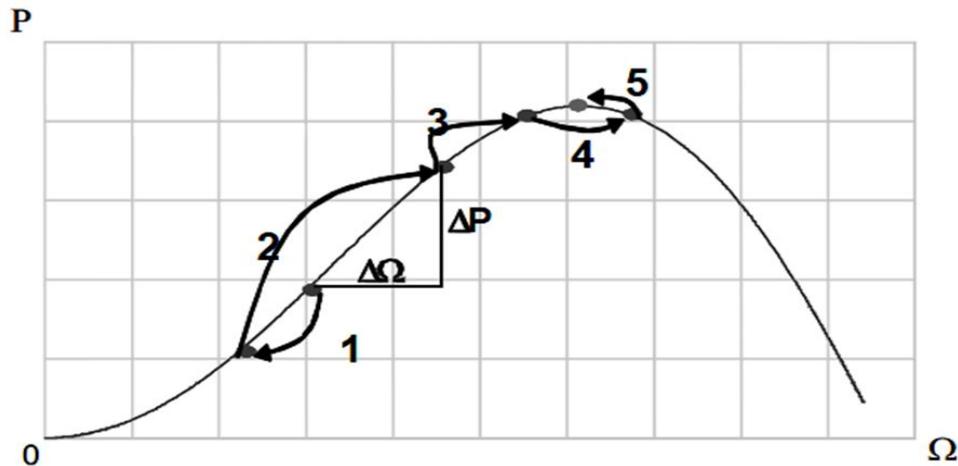


Figure 2.3 : Principe de fonctionnement du MPPT-P&O

Selon la figure au dessus, on peut distinguer les cas de fonctionnement d'un algorithme MPPT-P&O en donnant la décision sur la référence de vitesse, les différents cas peuvent être résumés dans le tableau suivant :

Tableau 2.1 : Différents cas de décision sur la référence

Variation de puissance	Variation de vitesse	Décision sur la référence
Positive	Positive	Incrémentation
Négative	Positive	Décrémentation
Positive	Négative	Décrémentation
Négative	Négative	Incrémentation

D'après le tableau on remarque que la variation de la référence de vitesse est celle de la précédente pour une variation positive de la puissance. Au contraire pour une variation négative de la puissance la variation de la référence est l'inverse de la précédente. Le principe de fonctionnement d'un algorithme MPPT-P&O peut être représenté par organigramme suivant :

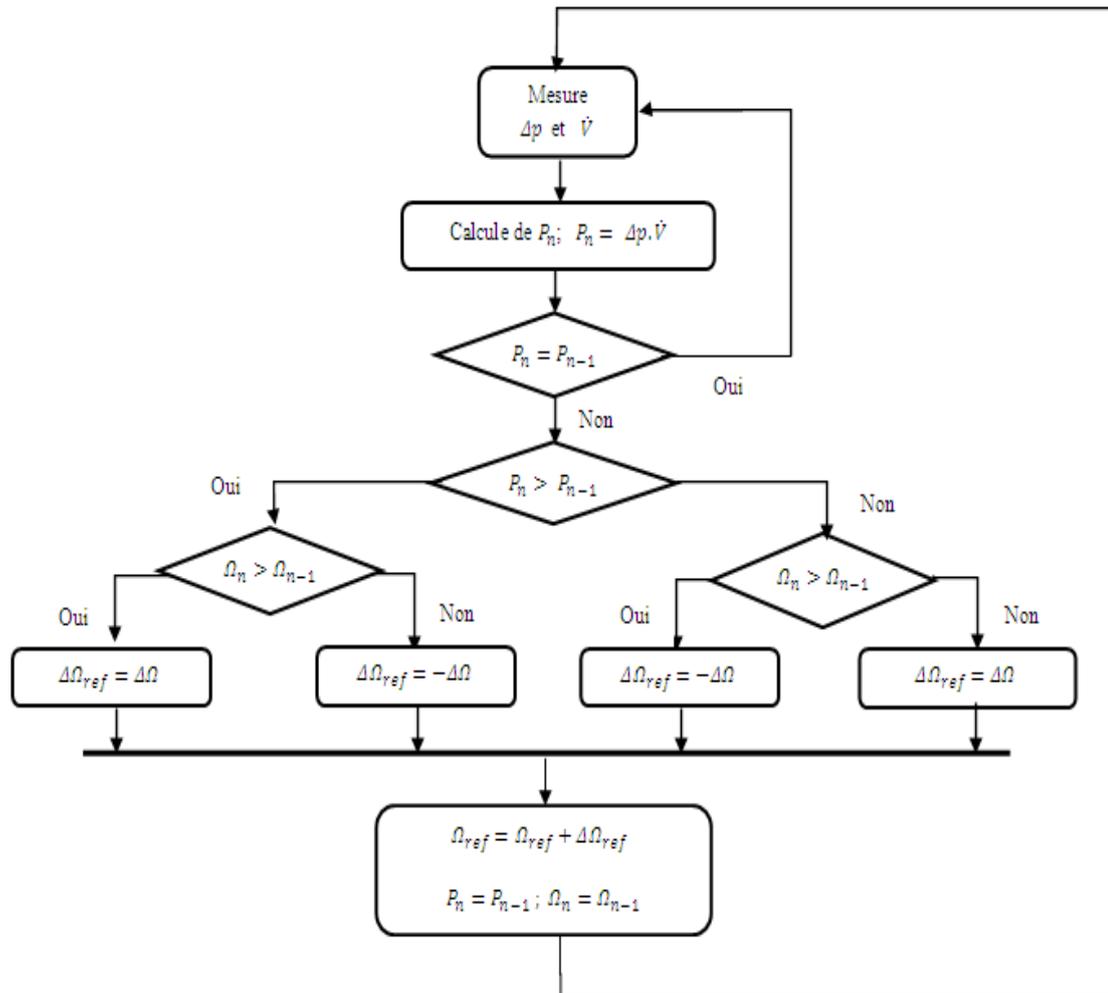


Figure 2.4 : Organigramme d'un algorithme MPPT-P&O

Le pas de l'incrément (décrément) de la référence de vitesse est choisi de telle manière à accélérer la recherche et garder la stabilité du système, pour un pas très grand la recherche du MPP sera rapide mais le système sera moins stable car l'algorithme donne des références très élevées loin de la plage nominale de fonctionnement, ce qui à un effet déstabilisant sur le système.

2.1.6. MPPT-flou

L'algorithme d'optimisation de la puissance MPPT-flou présente plusieurs avantages par rapport à l'algorithme P&O, contrairement à l'algorithme P&O qui se base juste sur le signe de la variation de la puissance de la vitesse de rotation, l'algorithme MPPT-flou tient en compte la valeur de la dérivée de la puissance par rapport à la vitesse de rotation, ce qui rend le calcul du pas d'incrément variable avec le taux de variation de la puissance par rapport à la vitesse cette valeur du taux de variation de la puissance sera fuzzifiée selon un ensemble des règles de base permettant d'avoir une décision sur la variation de la référence de vitesse de rotation.

2.1.6.1. Principe de l'algorithme

En absence de toute connaissance sur la caractéristique puissance-vitesse, des règles de comportement à appliquer afin de converger vers le point optimal sont relativement simples à établir. Ces règles dépendent des variations de puissance ΔP et de vitesse $\Delta\Omega$. A partir de l'existence des règles linguistiques, l'utilisation d'un algorithme MPPT basé sur le principe des ensembles flous est mise en place. Pour un algorithme MPPT à base de mesure des variations de puissance et de vitesse de rotation, les variations ΔP et $\Delta\Omega$ sont calculées selon les équations suivantes :

$$\Delta P[k] = P[k] - P[k - 1] \quad (2.1)$$

$$\Delta\Omega[k] = \Omega[k] - \Omega[k - 1] \quad (2.2)$$

On définit la variable $y[k]$ qui approxime la dérivée de la puissance par rapport à la vitesse de rotation :

$$y[k] = \frac{\Delta P[k]}{\Delta\Omega[k]} \quad (2.3)$$

Afin de construire les règles de base sur la variable $x[k]$ on normalise la variable $y[k]$ de telle sorte qu'elle sera comprise entre -2 et 2 :

$$x = 2 \cdot \frac{y[k]}{y_{max}} \quad (2.4)$$

Dans la logique floue, un élément appartient à plusieurs ensembles en même temps avec un certain degré d'appartenance, les ensembles flous sont définies par leurs éléments et le degré d'appartenance de l'élément à l'ensemble, contrairement à la logique classique qui définit un ensemble juste par ses éléments. Dans notre cas les ensembles flous reflètent une valeur linguistique de x . On définit les ensembles flous $(x, \mu(x))$: Très positif, positif, Zéro, négatif, Très négatif, et leurs fonctions d'appartenance :

$\mu_{tp}(x)$: Fonction d'appartenance de x à l'ensemble "Très positif"

$\mu_p(x)$: Fonction d'appartenance de x à l'ensemble "Positif"

$\mu_z(x)$: Fonction d'appartenance de x à l'ensemble "Zéro"

$\mu_n(x)$: Fonction d'appartenance de x à l'ensemble "Négatif"

$\mu_{tn}(x)$: Fonction d'appartenance de x à l'ensemble "Très négatif"

Les fonctions d'appartenance associées à chaque ensemble flou sont choisies trapézoïdales, les fonctions sont représentées par la figure suivante :

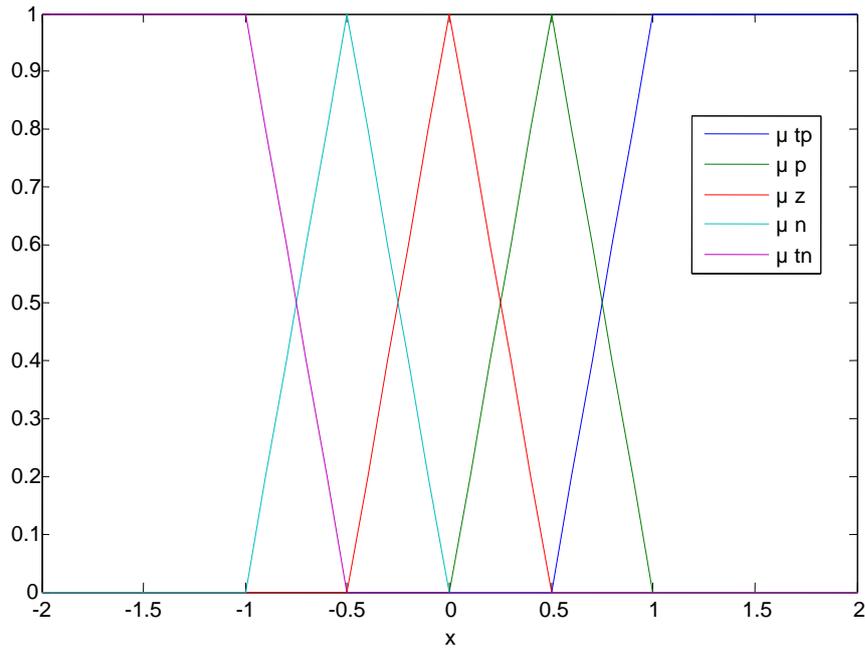


Figure 2.5 : Les fonctions d'appartenance

Sur la base de la valeur linguistique de x on construit l'ensemble des règles linguistiques, afin de converger x vers 0 qui correspond à l'optimum de la puissance produite par la turbine. Si x est très positif on donne le pas le plus grand $\Delta\Omega$. En faisant la même chose avec les autres cas, on obtient le tableau suivant qui donne les différentes décisions sur le pas d'incrémentation selon la valeur linguistique de x .

Tableau 2.2 : Décisions sur $\Delta\Omega_{ref}$ selon x

Valeur linguistique de x	Très positif	Positif	Zéro	Négatif	Très négatif
Décision sur $\Delta\Omega_{ref}$	$\Delta\Omega$	$\Delta\Omega/2$	0	$-\Delta\Omega/2$	$-\Delta\Omega$

Selon l'approche TSK les différents cas obtenus dans le tableau au-dessus vont activés selon les degrés d'appartenance pour chaque ensemble flou.

$$\Delta\Omega_{ref} = \frac{\sum \mu_i \Delta\Omega_i}{\sum \mu_i} \quad (2.5)$$

$$\Omega_{ref}(k+1) = \Omega_{ref}(k) + \Delta\Omega_{ref} \quad (2.6)$$

Sachant que $\sum \mu_i(x) = 1, \forall x \in [-2; 2]$, on obtient la décision réelle à partir des décisions linguistique sous la formule suivante :

$$\Delta\Omega_{ref} = \sum \mu_i \Delta\Omega_i \quad (2.7)$$

2.1.7. MPPT par l'algorithme du gradient

Autre solution qui peut être utile pour ce genre de problème, l'utilisation des algorithmes d'optimisation offre aussi une solution efficace pour le problème de l'optimisation de la puissance générée dans une centrale à cheminée solaire. Parmi ces algorithmes, le plus connu est l'algorithme du gradient. Largement utilisée dans le domaine de l'optimisation, l'algorithme du gradient optimise une fonction par rapport à son argument, en se basant sur la valeur de sa dérivée (gradient).

Mathématiquement le problème de la recherche de l'optimum (maximum) d'une fonction dérivable à une ou plusieurs variables suit l'algorithme suivant :

$$x_{i+1} = x_i + K \left. \frac{df}{dx} \right|_{x_i} \quad (2.8)$$

Où K représente le gain d'algorithme, est choisi d'une façon à balancer entre le compromis rapidité-stabilité. Cet algorithme se base essentiellement sur la direction du gradient, et la convergence est atteinte lorsque le gradient serait nul. Un algorithme MPPT est donné généralement sous la forme suivante :

$$\omega_{ref}(k+1) = \omega_{ref}(k) + K \frac{\Delta P(k)}{\Delta\Omega(k)} \quad (2.9)$$

$$\Delta P = P(k) - P(k-1) \quad (2.10)$$

$$\Delta\Omega = \Omega(k) - \Omega(k-1) \quad (2.11)$$

Ce type d'algorithme est appelé la montée de gradient, puisque il s'agit de la recherche d'un maximum au contraire de la descente du gradient qui cherche le minimum, le gradient qui est approximé par $(\Delta P/\Delta\Omega)$ vaut 0 lorsque l'on a atteint le maximum de la courbe de la caractéristique, ce qui correspond à la vitesse qui donne la puissance extraite maximale.

2.1.8. MPPT par algorithme Newton

L'algorithme de Newton utilisé dans plusieurs domaines, la recherche opérationnelle, il optimise une fonction réelle par rapport à son argument. En générale pour chercher l'optimum d'une fonction non-linéaire où la solution analytique n'existe pas. Le principe de l'algorithme peut être utilisé pour des fonctions à une variable ou plusieurs variables, pour le cas d'un MPPT la recherche de l'optimum se fera par rapport une seule variable. Contrairement à l'algorithme du gradient qui donne juste la direction de la recherche, l'algorithme de Newton présente l'avantage en termes de la stabilité car le gain est ajusté par le Hessien de la fonction. Pour une fonction f à plusieurs variables, l'algorithme de Newton est donné par la formule suivante :

$$x_{i+1} = x_i + H_{x_i}^{-1} J_{x_i} \quad (2.12)$$

J_{x_i} : Le gradient de la fonction f au point x_i

H_{x_i} : Le Hessien de la fonction f au point x_i

La formule donnée au-dessus correspond à la recherche du minimum pour la recherche du maximum on modifie la formule en remplaçant le signe “+” par le signe “-”. Pour une fonction f à une seule variable, l’algorithme de Newton pour la recherche du maximum, peut se mettre sous la forme suivante :

$$x_{i+1} = x_i + \left(\frac{d^2 f}{dx^2} \Big|_{x_i} \right)^{-1} \frac{df}{dx} \Big|_{x_i} \quad (2.13)$$

De la même manière on fait pour la recherche de la vitesse qui correspond à la puissance maximale générée par la turbine, on parcourt la caractéristique vitesse-puissance jusqu’à arriver à l’optimum de la puissance. La référence de la vitesse de rotation sera calculée sur la base de l’algorithme donné au-dessus, à chaque mesure de la puissance générée par la turbine, on décide sur la référence de la vitesse à travers l’utilisation de la mesure de la puissance actuelle et la vitesse actuelle et les mesures qui correspondent aux deux instants précédents.

Soit les puissances mesurées aux différents instants : $P(k)$; $P(k-1)$; $P(k-2)$ et les vitesses $\Omega(k)$; $\Omega(k-1)$; $\Omega(k-2)$, la dérivée première et la deuxième peuvent être approximée par :

$$\frac{dP}{d\Omega} \approx \frac{P(k) - P(k-1)}{\Omega(k) - \Omega(k-1)} = \frac{\Delta P(k)}{\Delta \Omega(k)} \quad (2.14)$$

$$\frac{d^2 P}{d^2 \Omega} \approx \frac{P(k) - 2P(k-1) + P(k-2)}{(\Omega(k) - \Omega(k-1))(\Omega(k-1) - \Omega(k-2))} = \frac{\Delta^2 P(k)}{\Delta^2 \Omega(k)} \quad (2.15)$$

Finalement on aura la relation qui donne la référence de la vitesse de rotation en fonction des mesures précédentes :

$$\omega_{ref}(k+1) = \omega_{ref}(k) + \left(\frac{\Delta^2 P(k)}{\Delta^2 \Omega(k)} \right)^{-1} \frac{\Delta P(k)}{\Delta \Omega(k)} \quad (2.16)$$

On peut vérifier la convergence de l’algorithme vers l’optimum à travers l’annulation de la dérivée de la puissance par rapport à la vitesse au voisinage de l’optimum, ce qui donne $\omega_{ref}(k+1) = \omega_{ref}(k)$ d’où la stabilisation à l’optimum. Le terme qui représente la dérivée deuxième est similaire à un gain adaptatif par l’analogie avec l’algorithme de gradient, ce terme devient très faible pour les zones linéaires de la caractéristique puissance-vitesse, ce qui a pour effet d’augmenter le pas d’incrément de la référence de vitesse et accélérer la convergence. Pour les zones où la courbure de la caractéristique puissance-vitesse est très importante la dérivée deuxième sera plus grande, par conséquent la variation de la référence de vitesse devient faible, ce qui stabilise l’algorithme lorsqu’on se rapproche de l’optimum.

2.1.9. MPPT-MCR

La méthode des moindres carrés récursive, est semblable à l'algorithme du gradient abordé précédemment, à la différence que le gain est variable. Cette méthode est basée sur les mesures de la variation de la puissance générée et la variation de la vitesse dans le but de parcourir la caractéristique puissance-vitesse dans le sens puissance croissante. La référence de la vitesse de rotation utilisée dans l'asservissement de vitesse sera calculée en fonction du rapport $(\Delta P/\Delta \Omega)$ en se basant sur la recherche de l'optimum par l'algorithme du MCR, ce qui donne la relation suivante pour la référence de vitesse :

$$\omega_{ref}(n+1) = \omega_{ref}(n) + k(n) \frac{\Delta P(n)}{\Delta \Omega(n)} \quad (2.17)$$

Le gain de l'algorithme MCR est variable, et il change sa valeur à chaque itération en fonction de $Q(n)$, on donne la formule suivante pour la valeur de $k(n)$:

$$k(n) = \frac{\lambda^{-1}Q(n-1)}{1 + \lambda^{-1}Q(n-1)} \quad (2.18)$$

Tel que $Q(n)$: est initialisé à $Q(0) = \delta^{-1}$, avec δ une constante positive. Avec la relation suivante qui donne la formule récurrente pour la valeur de $Q(n)$:

$$Q(n) = \lambda^{-1}Q(n-1) - \lambda^{-1}k(n)Q(n-1) \quad (2.19)$$

La stabilité est assurée par le terme $\Delta P/\Delta \Omega$ qui s'annule au voisinage de l'optimum et donne la convergence de la vitesse vers la vitesse optimale, En plus l'algorithme des moindres carrés récursif permet de converger vers la puissance maximale plus rapidement que l'algorithme du gradient, car il permet d'initialiser le gain avec des valeurs plus importantes et qui seront réduites par la suite au cours de la recherche, ce qui donne la rapidité dans la phase de la recherche et la stabilité au voisinage de l'optimum.

1.9. Etude comparative

Dans cette partie on va comparer les méthodes d'optimisation de la puissance afin de sortir par une conclusion sur les performances des différents algorithmes MPPT, pour cela donne les différentes réponses obtenues précédemment,

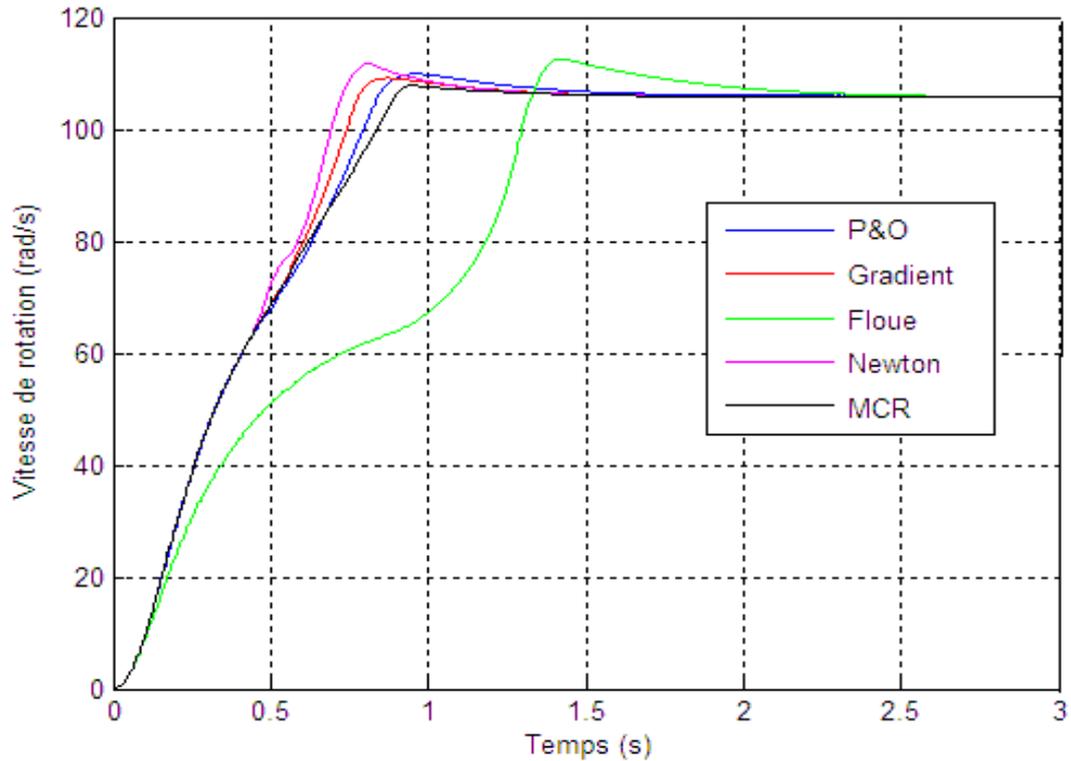


Figure 2.6 : Variation de la vitesse de rotation.

A travers la figure précédente on remarque l'algorithme MPPT par logique floue est lent par rapport aux autres algorithmes, on remarque aussi que l'algorithme des moindres carrés récursif a donné la meilleure convergence vers la vitesse optimale vue l'absence du dépassement.

Tableau 2.3 : Temps de réponse des différentes méthodes.

Méthode	P&O	Floue	Gradient	Newton	MCR
Temps de réponse (s)	0.76	1.3	0.75	0.7	0.76

Pour la traque de la vitesse optimale, on remarque que la méthode Newton est la plus rapide et l'algorithme par logique floue est le plus lent.

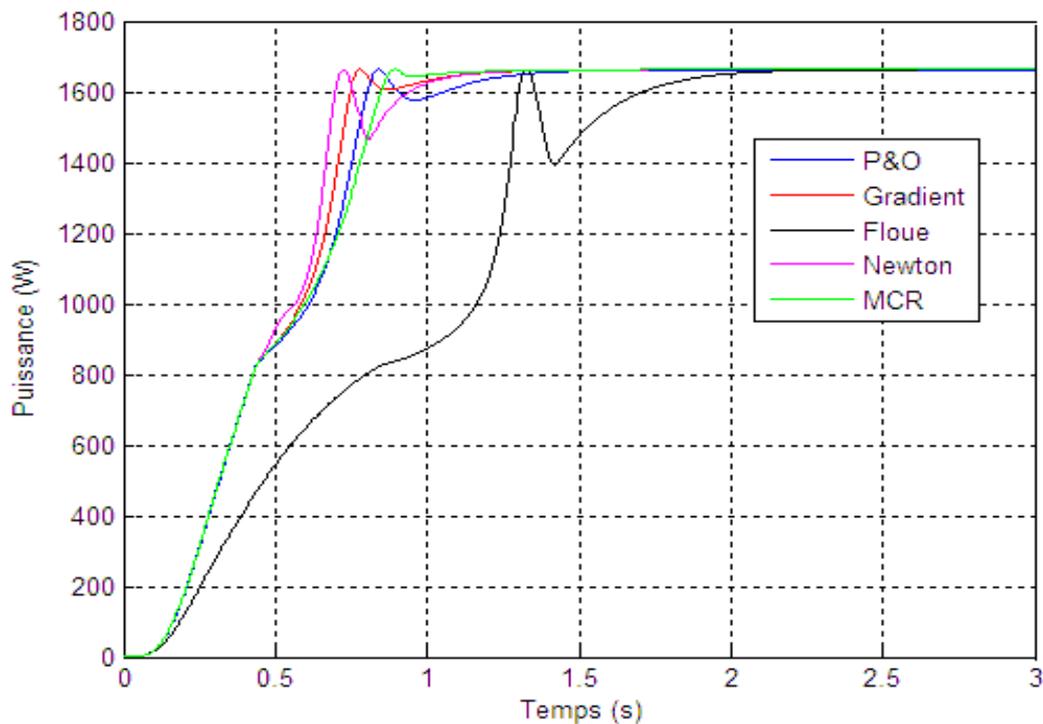
A travers les réponses des différentes méthodes on remarque elles présentent une différence en terme de dépassement au voisinage de l'optimum. On compare les réponses à travers les dépassements, ce qui donne le tableau suivant :

Tableau 2.4 : Taux de dépassement pour les différentes méthodes

Méthode	P&O	Floue	Gradient	Newton	MCR
Taux de dépassement (%)	3	7	3	7	0

D'après ce tableau on remarque que l'algorithme des moindres carrés récursif ne présente aucun dépassement au voisinage de l'optimum, au contraire de l'algorithme par logique floue qui donne un dépassement très important par rapport aux autres méthodes.

On compare aussi les différentes méthodes à travers le comportement de la puissance produite, la traque de la puissance optimale des différentes méthodes est donnée par la figure suivante :

**Figure 2.7** : Variation de la puissance pour les différentes méthodes.

A travers la figure précédente, on remarque que les différentes méthodes présentent des différences en termes de la traque de la puissance optimale. Les différentes méthodes traquent cette puissance avec un temps de réponse qui se diffère d'une méthode à l'autre.

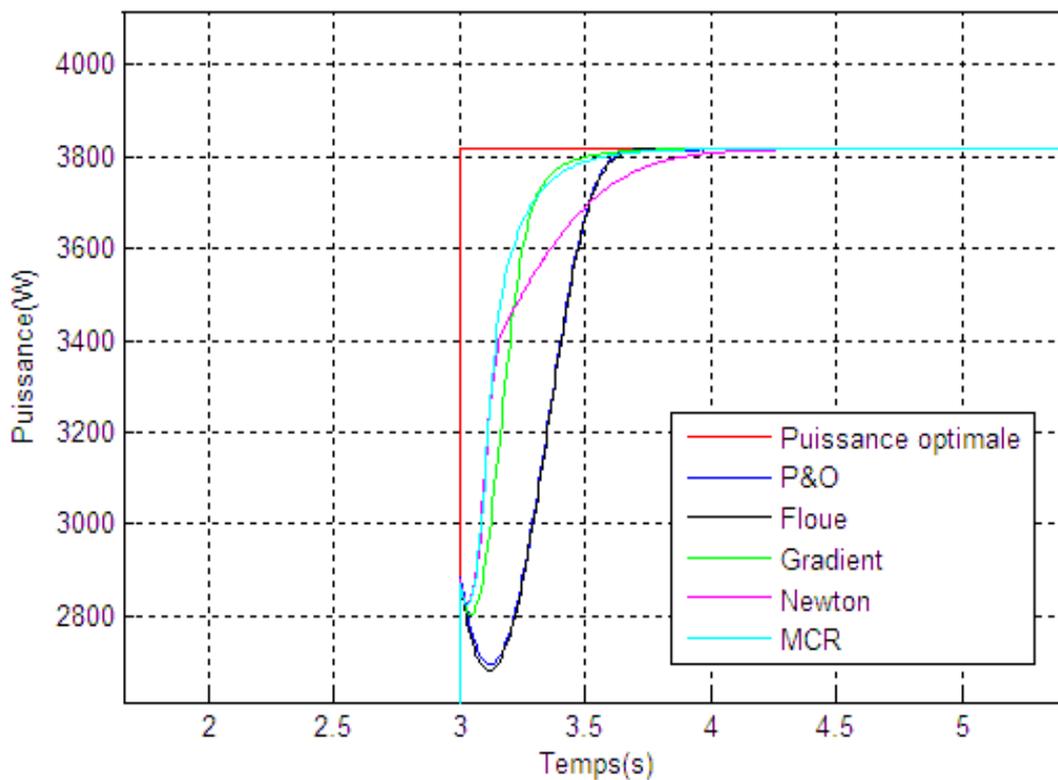
Les réponses se diffèrent aussi par rapport aux oscillations au voisinage de la puissance optimale, le tableau suivant donne les différents taux d'oscillation pour les différentes méthodes :

Tableau 2.5 : Taux d'oscillation pour les différentes méthodes

Méthode	P&O	Floue	Gradient	Newton	MCR
Taux d'oscillation (%)	8	23.5	4.3	15	0

D'après ce tableau on remarque que l'algorithme des moindres carrés récursif ne présente aucune oscillation après arrivé à l'optimum, au contraire de l'algorithme par logique floue qui présente une oscillation très important par rapport aux autres méthodes.

La robustesse des algorithmes MPPT peut être testée sous les cas extrêmes de fonctionnement, pour cela les variations brusques de la caractéristiques puissance-vitesse sont proposées pour tester la robustesse de l'algorithme, car il s'agit d'une décision prise sur une caractéristique différente. On varier brusquement la caractéristique afin de tester la réaction de l'algorithme, ce qui donne les réponses suivantes :

**Figure 2.8** : Variation de la puissance pour les différentes méthodes.

A travers la figure précédente on remarque que les algorithmes de Newton et moindres carrés récursif donnent des bonnes résultats par rapport l'algorithme de P&O et l'algorithme flou,

1.10. Conclusion

A partir de ce chapitre on conclut que les algorithmes, moindres carrés récursif a donné des meilleur résultats par rapport les autres méthodes, en terme de rapidité et de et oscillation autour de la puissance optimale, on conclut aussi que l'algorithme de newton était performant, cette

Conclusion générale

Ce travail a été consacré à l'étude comparative des techniques MPPT pour une centrale solaire à effet de cheminée, ce système solaire thermique présente une source d'énergie propre et durable dans le moment où les émissions à effet de serre risquent à détruire l'équilibre naturel dans la planète.

Par la suite on a présenté la stratégie de l'optimisation de la puissance produite dans une centrale à effet de cheminée. Cette stratégie basée sur le réglage de la vitesse de rotation de la turbine à travers l'asservissement de la machine, elle ne nécessite que des mesures contrairement aux autres stratégies qui exigent la connaissance de la caractéristique puissance-vitesse. Pour cette stratégie on a utilisé plusieurs algorithmes, du classique P&O jusqu'au l'algorithme du Newton et l'algorithme des moindres carrés récursif, où ces derniers sont plus performants que l'algorithme du P&O.

On a terminé ce travail par une étude comparative entre les techniques MPPT, où on a constaté que les MPPT basées sur les algorithmes d'optimisation étaient plus performantes que les MPPT classiques.

Bibliographie

- [1] TALBIS RIAH.R "*Comparaison et Synthèse d'un Nouvel Algorithme MPPT Robuste pour une Chaîne de Production d'Énergie Photovoltaïque*" Projet de fin d'étude-École Nationale Polytechnique. juin 2011
- [2] A. BOUHARCHOUCHE. "*Etude et Commande d'un Système de Production Hybride Éolien Photovoltaïque*". Thèse de Magister, EMP, Alger, juin 2013.
- [3] BENESTY.J "*recursive least-squares*"
- [4] Fu-Sheng Pai, Member, IEEE, Ru-Min Chao, Shin Hong Ko, and Tai-Sheng Lee, "Performance Evaluation of Parabolic Prediction to Maximum Power Point Tracking for PV Array", IEEE Transactions on Sustainable Energy, VOL.2, NO.1, January 2011.
- [5] Chian-Song Chiu, Member, IEEE, and Ya-Lun Ouyang, Student Member, IEEE, "Robust Maximum Power Tracking Control of Uncertain Photovoltaic Systems: A Unified T-S Fuzzy Model-Based Approach", IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY, 2011.
- [6] M. Hatti, IEEE Member, « *Contrôleur Flou pour la Poursuite du Point de Puissance Maximum d'un Système Photovoltaïque* », JCGE'08 LYON, 16 et 17 décembre 2008.
- [7] M. Nasser. "*Supervision de sources de production d'électricité hybrides éolien/hydraulique dans les réseaux d'énergie interconnectés ou isolés*". Doctorat, CNAM, Paris , 2011.
- [8] A.BAHLLOUL, O.BELAOUDMOU. "*Etude et Commande d'un Système Hybride éolien-Photovoltaïque Connecté au Réseau*". Projet de Fin d'Etude, Ecole Nationale Polytechnique, Juin 2012.
- [9] B. M. Wilamowski and X. Li, "Fuzzy system based maximum power point tracking for PV systems", 28 th Annual Conference of the Industrial Electronics Society, IECON 2002, Vol. 4, pp. 3280-3284, Nov. 2002.
- [10] Koonsrisuk, Atit. "*Mathematical modeling of sloped solar chimney power plants.*" Energy 47.1 (2012): 582-589.
- [11] Tingzhen, Ming, et al. "*Numerical simulation of the solar chimney power plant systems coupled with turbine*". Renewable Energy 33.5 (2008): 897-905.