

Stratégie d'optimisation floue du point d'extraction de la puissance maximale (MPPT) pour les petites éoliennes connectées à des sites isolés

Ch. GHABARA^{#1}, H. JOUINI^{#2}, M. LAHBIB^{#3}, A. MAMI^{#4}

[#]Université de Tunis El Manar, Faculté des sciences de Tunis,

Campus Universitaire 2092 - El Manar Tunis, Tunisie

Address Including Country Name

¹chamseddine.ghabara@gmail.com

²houda.jouini@gmail.com

Resumé— Ce papier présente une technique intelligente de capture de la puissance maximale MPPT (Maximum Power Point Tracking) d'une éolienne connectée à une batterie en utilisant une chaîne de conversion comme interface. Cette technique est basée sur la logique floue. Le principe de cet algorithme MPPT consiste à chercher une relation optimale de fonctionnement à la puissance maximale, puis traquer la puissance maximale en se basant sur cette relation. Son avantage principal est de ne pas nécessiter un anémomètre ou une connaissance préalable de la caractéristique de l'éolienne. La réponse du système avec cet algorithme est précise et rapide face aux fluctuations de la vitesse du vent. La validité et la performance de la technique proposée sont confirmées par simulation sur MATLAB/SIMULINK, et comparées par l'algorithme classique P&O.

Keywords— Logique Floue, MPPT, énergie éolienne, Vitesse du vent, P&O.

I. INTRODUCTION

Depuis l'éclatement du sujet de l'échauffement terrestre et de la préoccupation mondiale pour la protection de l'environnement d'une part et face à la flambée des prix du pétrole et l'épuisement, à plus ou moins long terme, des sources d'énergies fossiles d'autre part, différentes solutions de substitution ont été envisagées notamment les sources d'énergie renouvelables et le développement durable sont devenu une notion qui accompagne avec consistance toutes les filières industrielles et économiques et marque tous les nouveaux projets. Les opérateurs du secteur de l'énergie électrique s'acharnent à diversifier leur bouquet énergétique plus spécialement par une énergie propre et renouvelable de source géothermique, biomasse, solaire ou éolienne. L'énergie verte à base d'une éolienne semble une des plus prometteuses avec un taux de croissance mondial très élevé [1]. Ainsi son utilisation est devenu de plus en plus importante que ce soit son injection sur le réseau électrique que ce soit son utilisation dans des sites isolés. Si la filière du grand éolien (fermes de forte puissance, sites offshore,...) est en pleine expansion, l'idée de décentraliser l'énergie en produisant de petites quantités de façon localisée (proche du besoin) est de plus en plus présente, mais avec de fortes contraintes de coûts, et de performance, et de rendement énergétique et financière. C'est

dans le contexte des petites éoliennes, non raccordées au réseau, que se focalise l'objectif de ce papier. Ainsi, le but sera de recenser les solutions actuelles dans l'optique d'optimiser le compromis coût/performance au niveau système, c'est à dire en optimisant l'architecture (choix de convertisseur, minimisation des appareils de mesure,...), et en choisissant la méthode de contrôle d'énergie appropriée (Algorithme de maximisation de puissance). Ainsi, ce papier inclue les différentes parties suivantes : la première section du papier sera dédiée à la description de notre système d'étude. Une deuxième section est réservée à la description de la nécessité des algorithmes MPPT pour optimiser la puissance, les critères de classification de ces algorithmes et la présentation de l'approche classique P&O. Une troisième section sera réservée à la stratégie de contrôle floue ainsi son principe de fonctionnement. Les différentes simulations faites ainsi que la discussion des résultats trouvés feront l'objet de la quatrième section. Dans la cinquième section une conclusion est présentée.

II. SYSTÈME D'ÉTUDE

Dans une optique d'étudier le système de conversion d'énergie éolienne de petite de puissance et de tester l'algorithme de commande MPPT sur une plateforme de simulation, il est nécessaire de décrire le système d'étude constitué de l'éolienne, la génératrice synchrone à aimants permanents un redresseur triphasé à diodes et d'un hacheur Buck débitant sur une batterie de tension de 48V conformément au schéma synoptique de la figure Fig. 1.

La turbine éolienne convertit l'énergie aérodynamique en une énergie électrique. La puissance aérodynamique (disponible dans le vent) est d'abord converti en puissance mécanique. Ensuite, cette puissance mécanique est convertie en énergie électrique. La plage de puissances des systèmes éoliens varie entre quelques W (systèmes mini éoliens) jusqu'aux installations de quelques MW (grands systèmes éoliens). L'énergie cinétique présente dans le vent est convertie en énergie mécanique par le biais de la production de couple.

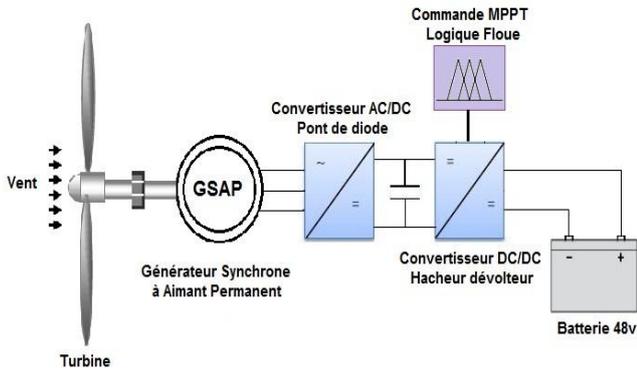


Fig. 1 Schéma synoptique du modèle de la chaîne de conversion étudiée

Cette énergie cinétique dépend de la densité de l'air et de la vitesse du vent. Son expression mathématique est donnée par l'équation :

$$E_c = \frac{1}{2} m V^2 \quad (1)$$

Où

- m : Masse volumique de l'air = $\rho \times V \times S \times \Delta t$
- ρ : Densité de l'air, S : Surface des pales (m^2)
- V : Vitesse du vent (m/s)

De ce fait la puissance mécanique développée par la turbine est donnée par la relation

$$P_m = \frac{1}{2} \times C_p \times \rho \times S \times V^3 \quad (2)$$

Cette puissance mécanique extraite P_m est inférieure à la puissance du vent P_w à cause du coefficient de puissance C_p définie par :

$$C_p = \frac{P_m}{P_w} < 1 \quad (3)$$

Plusieurs approximations numériques ont été développées dans la littérature [ref] pour déterminer une expression du coefficient C_p . Parmi ces approximations celle de [12] :

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \times \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \times \beta - c_4 \right) \times e^{-\frac{c_5}{\lambda_i}} + c_6 \times \lambda \quad (4)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08 \times \beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (5)$$

Avec

$$C_1 = 0.5176; C_2 = 116; C_3 = 0.4$$

$$C_4 = 5; C_5 = 21; C_6 = 0.0068$$

λ : Vitesse spécifique qui représente le rapport entre la vitesse linéaire de l'extrémité d'une pale et de la vitesse du vent.

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} \times R}{V} \quad (6)$$

$\Omega_{turbine}$: vitesse de rotation de la turbine (rad/seconde)

P_m : Puissance mécanique de la turbine.

C_p : Coefficient de performance de la turbine.

- ρ : Densité de l'air (Kg/m^3)
- S : Aire des pales de la turbine (m^2)
- V : Vitesse du vent (m/s)
- λ : Vitesse spécifique
- β : Angle de calage (deg)

Le coefficient de puissance C_p donne la fraction de l'énergie cinétique qui est convertie en énergie mécanique par l'éolienne. L'éolienne est caractérisée par la courbe de C_p coefficient de puissance en fonction de λ et l'angle d'orientation β de pales (figure 2). Théoriquement selon la loi de Betz, ce coefficient peut atteindre une valeur maximale de 59%, mais pratiquement cette valeur est 40% pour les éoliennes les plus performantes et 30% pour les plus communes.

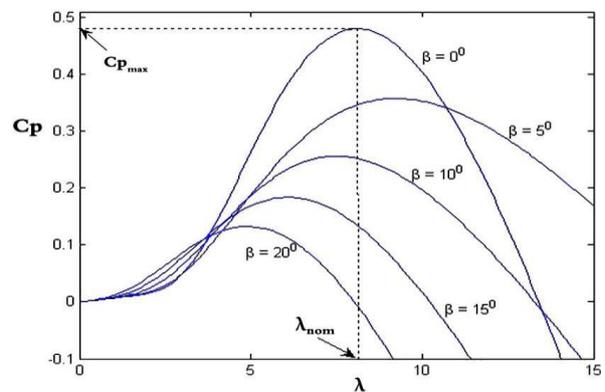


Fig. 2 Coefficient de puissance en fonction de λ pour des différentes valeurs de β

Généralement les turbine de petite puissance ont des pales fixes, pour cela on a considéré que l'angle de calage β n'intervient pas dans notre modèle (pitch angle $\beta = 0$).

La vitesse angulaire mécanique de la turbine peut être obtenue par la relation entre le couple électrique et le couple mécanique y compris les masses de la génératrice et de la turbine représentées par cette équation:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_m - F \cdot \omega_m \quad (7)$$

Avec T_e est le couple électromagnétique (N.m), J l'inertie combiné de la turbine et le rotor ($kg.m^2$) et F est le coefficient de frottement visqueux (N.m.s/rad).

III. GENERALITES SUR LES TECHNIQUES D'EXTRACTION DE LA PUISSANCE MAXIMALE (MPPT)

A. Nécessité d'une méthode MPPT

L'aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en une énergie mécanique disponible sur l'arbre de transmission, puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. L'énergie produite par l'aérogénérateur dépend principalement du vent, qui est un facteur climatique imprévisible, notamment

la vitesse du vent [1]. La figure suivante donne la courbe de puissance d'une éolienne en fonction de la vitesse du vent.

Dans la partie (I), aucune puissance n'est délivrée pour des vitesses de vent inférieures à la vitesse de démarrage V_{min} . Pour la partie (II), la puissance évolue selon le cube de la vitesse du vent (Equation (2)). Quand la puissance nominale P_m est atteinte, elle doit être limitée (III). Au-delà d'une certaine limite de vitesse du vent (IV), la turbine doit être arrêtée [2].

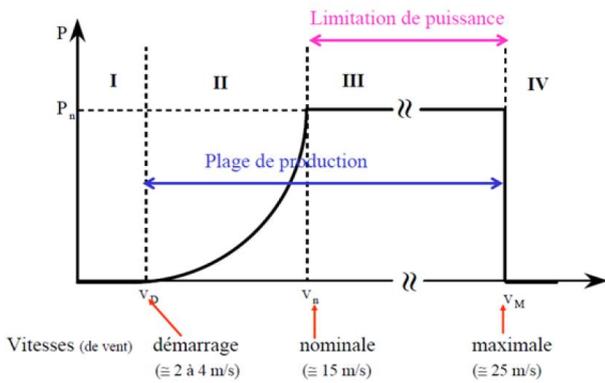


Fig. 3 Les différentes zones de fonctionnement d'une éolienne

Ainsi au cours de la phase II, l'aérogénérateur doit produire un maximum de puissance en exploitant au mieux l'énergie disponible dans le vent. De ce fait et dans une optique d'assurer le maximum de productivité énergétique, nous avons besoin de la recherche du point de fonctionnement à puissance maximale MPPT (Maximum Power Point Traking). Cette méthode permet de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale de l'aérogénérateur.

B. Classification des algorithmes MPPT dédiée à une éolienne

Divers algorithmes ou stratégies MPPT pour les éoliennes de petites puissances ont été élaborés dans la littérature [3-7]. Ces stratégies peuvent être classés en deux grandes catégories selon la connaissance préalable ou non de la caractéristique de l'éolienne. En fait, on trouve des méthodes de commande MPPT avec connaissance des caractéristiques de l'éolienne souvent intitulées contrôle basé sur la relation optimale, ORB (Optimum Relationship-Based Control), ce méthode se servent de la caractéristique de l'éolienne $C_p(\lambda)$ afin de déterminer la vitesse spécifique optimale qui permettra de dresser la relation optimale entre puissance maximale et vitesse de rotation du rotor optimale [2]. Et ce pour retrouver rapidement la consigne à appliquer au régulateur pour traquer en permanence et efficacement la puissance maximale tels que la commande celle en vitesse, en couple et commande indirecte par le pilotage du courant. On trouve aussi les stratégies MPPT sans connaissance des caractéristiques de l'éolienne telles que la

méthode P&O basique, la méthode P&O évolué combinée à l'ORB et la méthode INC (Incrémentation de la conductance).

C. Approche classique du MPPT Perturbation et Observation (P&O)

L'algorithme P&O (Pertub and Observe) est l'un des plus simples algorithmes. Il consiste à l'introduction d'une petite perturbation du rapport cyclique. Son effet est par la suite remarqué au niveau de la puissance de sortie de la GSAP. Si une augmentation de la puissance électrique est enregistrée par l'augmentation du rapport cyclique, alors ce dernier va être augmenté encore une fois avec le même pas que le précédent. Si par contre une diminution de la puissance est enregistrée suite à l'augmentation du rapport cyclique, la consigne suivante du rapport cyclique est alors inversée. Il est clair que cette méthode ne nécessite aucune connaissance préalable des paramètres mécaniques ou électriques du système éolien [8].

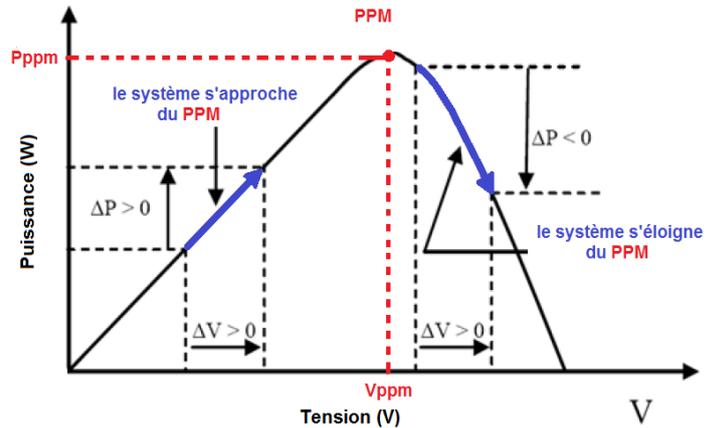


Fig. 4 Caractéristique de Puissance d'une éolienne en fonction de Tension

Ainsi, l'algorithme décrivant la technique P&O est donnée par l'organigramme ci-dessous:

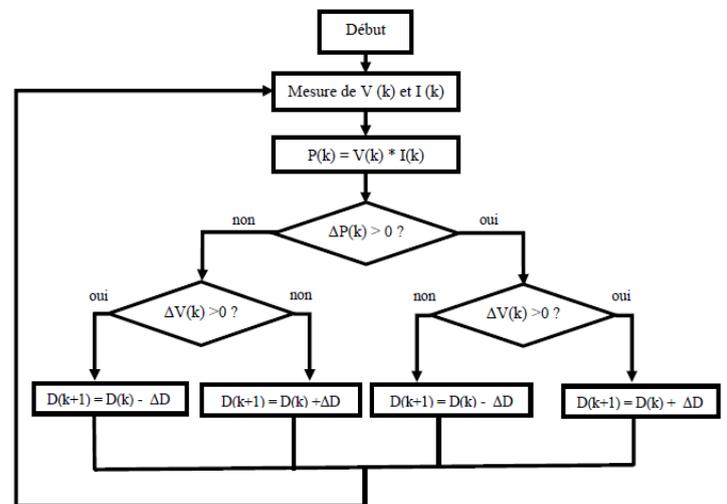


Fig. 5 Organigramme d'algorithme MPPT P&O

Le contrôle P&O présente toutefois quelques inconvénients liés à :

- L'oscillation de la puissance de sortie est permanente même pendant les vitesses de vents fixes.
- La lenteur de retrouver le point d'extraction de la puissance maximale par rapport aux stratégies avec connaissance de la caractéristique de l'éolienne, car le pas de variation du rapport cyclique est fixe.
- D'autant plus cette stratégie de recherche de puissance maximale ne permet pas la détection, des petites variations passagères du vent. Chose qui peut engendrer des variations de puissance non souhaitées et erronées.

C'est les raisons pour lesquelles, on est intéressé aux méthodes intelligentes telles que la logique floue qui sera détaillé dans la section suivante.

IV. STRATÉGIE DE CONTRÔLE FLOUE

Introduction sur la logique floue

La théorie du flou (Fuzzy theory) est presque devenue une mode pendant les années 90. Beaucoup de chercheurs, dans différents domaines scientifiques, utilisant la théorie formulée par le professeur Lotfi Zadeh de l'université de Berkeley [9]. Les systèmes flous appartiennent à la classe des "systèmes à base de connaissance". Leur but principal consiste à implémenter un savoir faire humain, ou des règles heuristiques, sous forme d'un programme informatique. La logique floue fournit un formalisme mathématique pour réaliser ce but. Les régulateurs flous modélisent l'expérience humaine sous forme de règles linguistiques "Si...alors" ; un moteur d'inférence calcule les actions de commande pour chacune des situations données. Les algorithmes basés sur la logique floue sont considérés comme une solution très intéressante pour le réglage des systèmes non linéaires pour lesquels il n'existe pas de modèle mathématique. Cette théorie est très attractive, parce qu'elle est basée sur le raisonnement intuitif et prend en compte la subjectivité et l'imprécision. Mais ce n'est pas une théorie imprécise [9]. C'est une théorie mathématique rigoureuse, adaptée au traitement de tout ce qui est subjectif et/ou incertain.

Un régulateur flou peut être présenté de différentes façons, mais en général la présentation adoptée se scinde en trois parties [10] : la fuzzification qui permet de passer de variables réelles à des variables floues, le cœur du régulateur représenté par les règles reliant les entrées et sorties, et enfin l'inférence et la défuzzification qui permettent à partir des ensembles flous d'entrée de déterminer la valeur réelle de sortie. Ainsi La mise en place d'un contrôleur flou se réalise en trois étapes, qui sont : la fuzzification, l'inférence et la défuzzification comme montre la figure suivante.

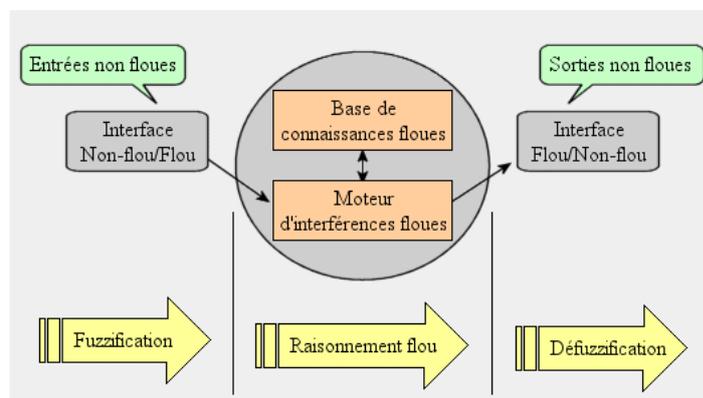


Fig. 6 Schéma de principe de la commande à logique floue

1) Fuzzification :

A cette étape nous les variables physiques sont transformées en variables linguistiques. A chaque variable physique correspond un degré d'appartenance à une variable linguistique qui peut avoir plusieurs formes : triangulaire, trapézoïdale, d'une cloche ou d'autres.

2) Règles d'inférence:

Ces règles permettent de déterminer le signal de sortie du contrôleur flou en fonction des signaux d'entrée, elles sont exprimées sous la forme «SI ALORS». Dans les règles floues interviennent les opérateurs "ET" et "OU". L'opérateur "ET" s'applique aux variables à l'intérieur d'une règle, tandis que l'opérateur «OU» lie les différentes règles. Il existe plusieurs possibilités pour interpréter ces deux opérateurs. La méthode d'inférence Max-Min réalise, au niveau de la condition, l'opérateur "ET" par la formulation du minimum. La conclusion dans chaque règle, introduite par «ALORS», lie le facteur d'appartenance de la prémisse avec la fonction d'appartenance de la variable de sortie, réalisé par la formation du minimum. Enfin l'opérateur "OU", qui lie les différentes règles est réalisé par la formation du maximum [11].

3) Défuzzification:

La Défuzzification permet de convertir les ensembles flous de sortie en variables physiques adaptées à un tel processus. Plusieurs stratégies de Défuzzification existent, nous avons choisi la méthode du «centre de gravité» donnée par l'équation suivante :

$$X_{out} = \frac{\int x \mu x d(x)}{\int \mu x d(x)} \quad (8)$$

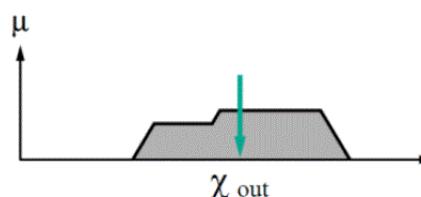


Fig. 6 Défuzzification par la méthode de "centre de gravité"

Le contrôleur MPPT flou intégrée dans notre système d'étude admet deux variables d'entrées $E_p(k)$ et $E_v(k)$ matérialisées respectivement par l'erreur de la tension entre l'instant k et $k-1$ et l'erreur de la puissance entre l'instant k et $k-1$. Ces variables sont données par les relations suivantes :

$$E_v(k) = V(k) - V(k-1) \quad (9)$$

$$E_p(k) = P(k) - P(k-1) \quad (10)$$

La variable de sortie du régulateur flou D représente le rapport cyclique entrée de hacheur Buck.

Afin d'attribuer plus de précision à notre stratégie floue, nous avons choisi 5 variables linguistiques pour chaque entrées. Les variables linguistiques sont données par l'ensemble $\{NG : \text{Négatif Grand}, N : \text{Négatif}, Z : \text{Zéro}, P : \text{Positif}, PG : \text{Positif Grand}\}$. Les variables linguistiques de la sortie D sont données par l'ensemble $\{TP : \text{Très Petit}, P : \text{Petit}, M : \text{Moyen}, G : \text{Grand}, TG : \text{Très Grand}\}$.

Les figures suivantes montrent les fonctions d'appartenance des différentes variables.

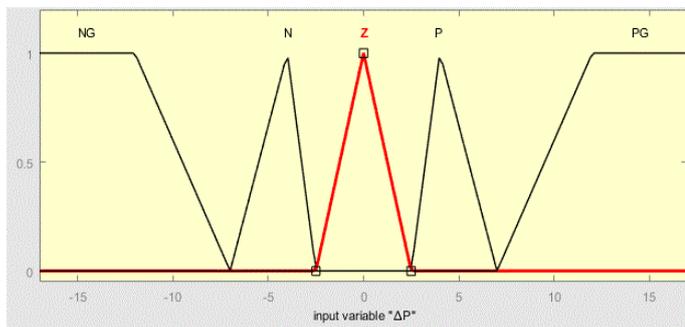


Fig. 7 Fonctions d'appartenance de variable d'entrée ΔP

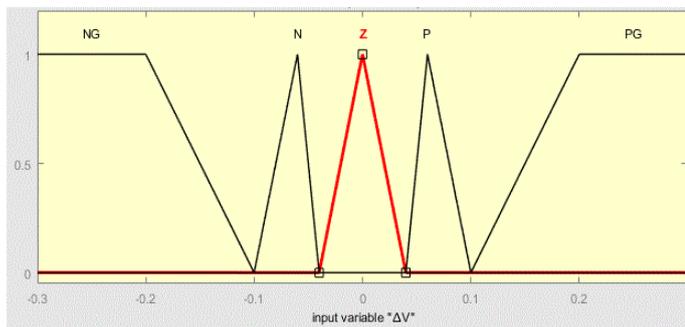


Fig. 8 Fonctions d'appartenance de variable d'entrée ΔV

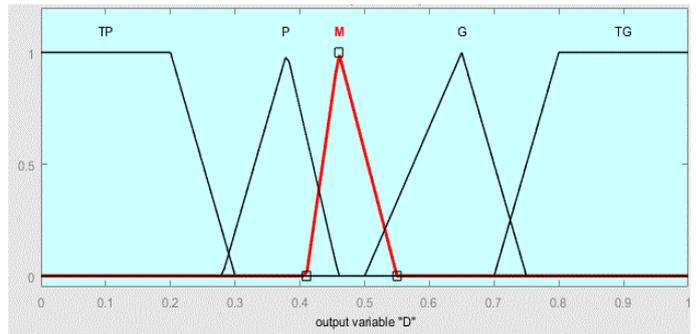


Fig. 9 Fonctions d'appartenance de variable de sortie D

La combinaison des différentes variables linguistiques des variables d'entrées E_p et E_v engendre 25 solutions possibles du rapport cyclique. Les règles d'inférence pour ce correcteurs sont prestées dans le tableau suivant :

TABLE I
RÈGLES D'INFÉRENCES FLOUES

E_v/E_p	NG	N	Z	P	PG
NG	TG	TG	P	TP	P
N	TG	TG	P	P	P
Z	P	P	Z	G	G
P	TG	G	G	TP	TP
PG	TG	G	G	P	TP

À titre d'exemple pour le cas d'une erreur de puissance NG (-13.7) et une erreur de tension PG (0.254) on aura comme rapport cyclique TG ($D= 0.876$). Ce cas d'exemple est illustré par la figure suivante :

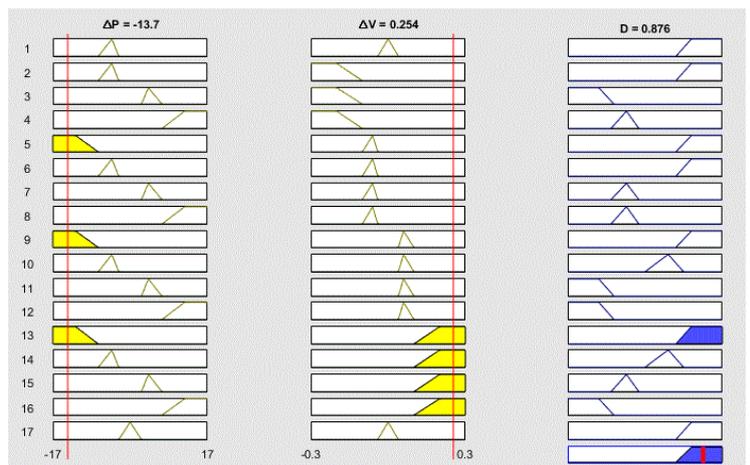


Fig. 10 Résultat numérique fourni par le bloc d'inférence

V. SIMULATIONS ET RÉSULTATS

En vue de tester les performances de la stratégie MPPT floue, nous avons effectué plusieurs cas de simulations suivant plusieurs valeurs de la vitesse du vent de l'éolienne. Les simulations ont été faites sur l'environnement Matlab/Simulink. La chaîne de conversion de l'énergie éolienne débitant sur une batterie de 48V est donnée par la figure suivante :

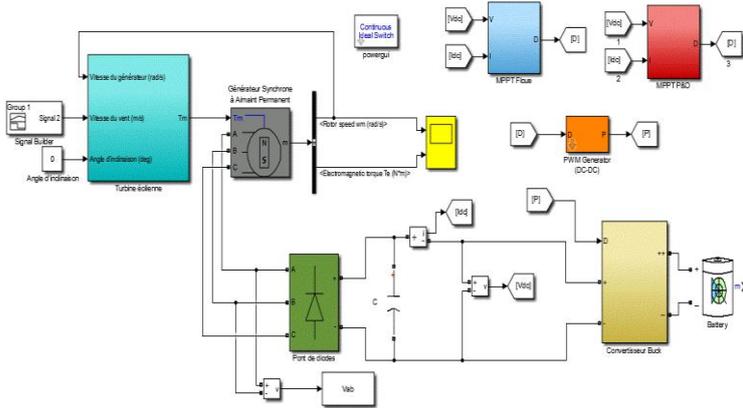


Fig. 11 Schéma de la chaîne de conversion d'énergie éolienne sous Simulink

La structure de la commande MPPT floue conçu pour notre modèle est donnée sous Matlab/Simulink conformément au schéma de principe de la figure suivante :

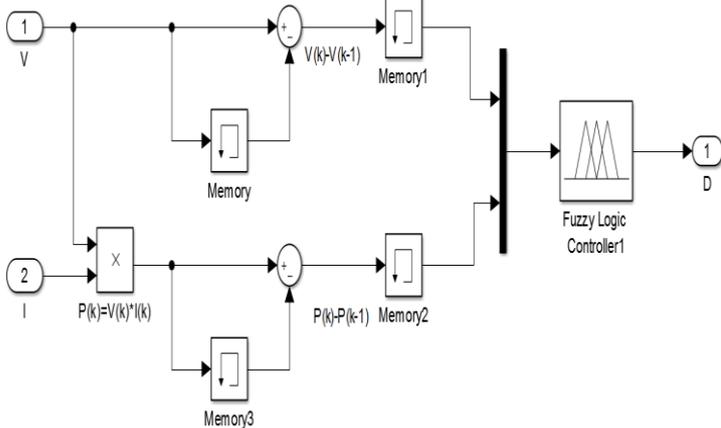


Fig. 12 Schéma de la commande floue sous Matlab-Simulink

Les différents paramètres de notre système d'étude est illustré dans le tableau suivant :

TABLE II

LES DIFFERENTS PARAMETRES DU SYSTEME ETUDIE

Sous systèmes	Paramètres
Turbine éolienne	$\theta = 0^\circ$ $C_1 = 0.5176; C_2 = 116; C_3 = 0.4$ $C_4 = 5; C_5 = 21; C_6 = 0.0068$
Génératrice synchrone à aimant permanent	Puissance nominale : 3 KW Tension Nominale : 220 V Résistance Statorique : 0.49 Ohm Inductance Statorique : 5.35 mH Constante de couple : 2.4 Nm/A Nombre de paires de pôles : 4
Tension redressée	$V_{dc} : 120V$ $C : 20 \cdot 10^{-3} F$
Hacheur Buck	$C : 220 \cdot 10^{-6} F$ $L : 5 \cdot 10^{-3} H$
Tension de la Batterie	$V_{bat} = 48V$

Nous avons simulé tout d'abord le comportement de l'éolienne pour une plage de vitesse de vent variable (7m/s, 9m/s et 12 m/s). Ainsi, nous trouvons les figures suivantes montrons respectivement les vitesses de vent, le comportement de la tension, du rapport cyclique, et la puissance débitée par la génératrice éolienne.

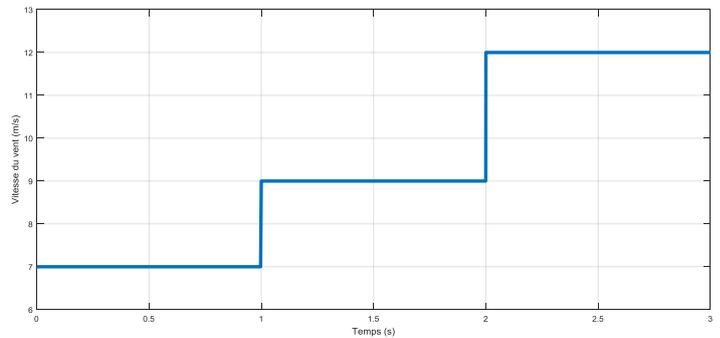


Fig. 13 Variation du vent au cours du temps

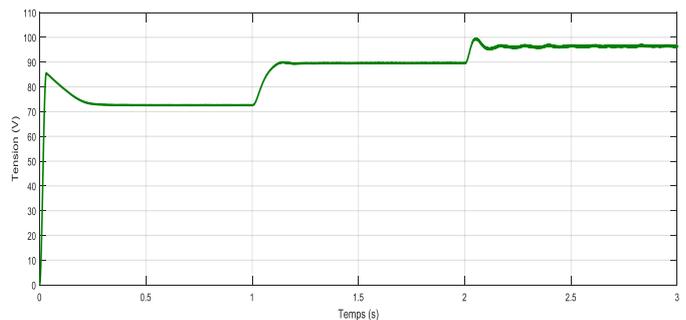


Fig. 14 Variation de la tension Vdc

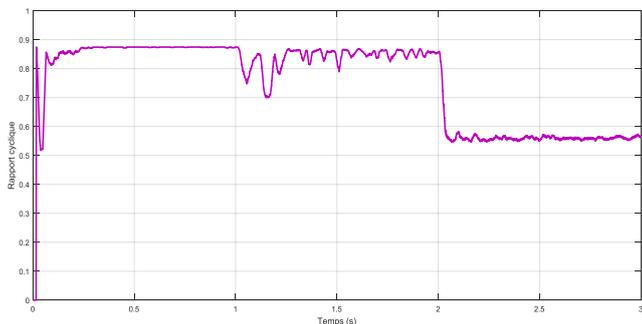


Fig. 15 Evolution du rapport cyclique D

Afin d'évaluer les performances de notre stratégie MPPT floue nous avons fait une comparaison de cette dernière à celle de l'approche classique P&O. de ce fait, nous refait la même simulation pour les deux MPPT flou et MPPT selon la P&O.

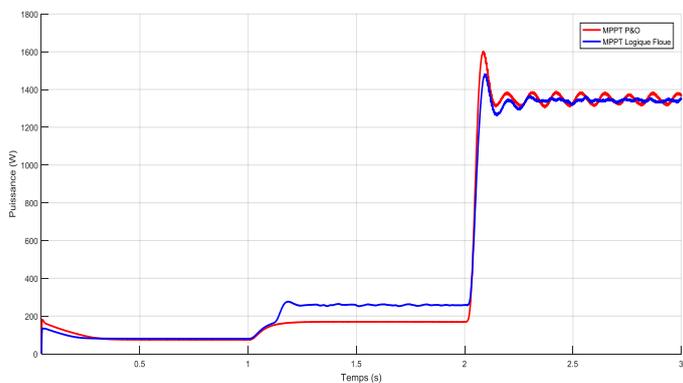


Fig. 16 Puissance éolienne

Nous constatons d'après la figure de la puissance que notre approche MPPT floue a pue contribuer d'une manière plus efficace à l'extraction de la puissance maximale pour chaque vitesse du vent en ce comparant à la stratégie MPPT basée sur l'approche classique P&O. en effet, nous constatons que pour des plages de vent faibles voir moyennes il y a une différence remarquable alors que pour les plages de vent assez grande on trouve que les puissances sont presque semblables.

VI. CONCLUSIONS

Dans le but d'améliorer l'efficacité des systèmes éoliennes, notamment la production énergétique nous avons développé une stratégie intelligente, basée sur la logique floue, de l'extraction de la puissance maximale MPPT générée par la génératrice éolienne. Cette stratégie permet d'optimiser à chaque instant et pour n'importe quelle vitesse de vent la puissance débitée par l'éolienne. Ainsi nous avons commencé par la présentation de l'utilité des algorithmes MPPT. Ensuite nous avons présenté le principe de technique de perturbation et observation. Puis, nous avons conçu un régulateur flou à base de la logique floue. Les résultats de simulation prouvent bien l'efficacité de la stratégie adoptée. En effet le MPPT floue a

permet d'une part la poursuite du point maximum selon la variation de vent et d'autres part sa performance par rapport à l'approche classique P&O avec un taux d'ondulation de la tension et de la puissance minime.

REFERENCES

- [1] M.A. Abdullah, A.H.M. Yatim , C.W. Tan, " Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC 2014, Australia, 28 September–1 October 2014.
- [2] Y. A. Kaplan, "Overview of wind energy in the world and assessment of current wind energy policies in Turkey," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 43, pp 562–568, (2015).
- [3] Engr. G. Ofualagba and Dr. E. U Ubeku, "Wind Energy Conversion System- Wind Turbine Modeling," IEEE 2008.
- [4] D. Kumar and K. Chatterjee, "A review of conventional and advanced MPPT algorithms for wind energy systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 55, pp. 957–970, 2016.
- [5] K. E. Johnson, L. Y. Pao, M. J. Balas, and L. J.Fingersh, "Control of Variable-Speed Wind Turbines: Standard and Adaptive Techniques for Maximizing Energy Capture," *IEEE Control Syst.*, vol. 26, no. 3, pp. 70–81, Jun. 2006.
- [6] J. Hussain and M. K. Mishra, "Adaptive Maximum Power Point Tracking Control Algorithm for Wind Energy Conversion Systems," *IEEE Transactions on energy conversion*, vol. 31, no. 2, June 2016.
- [7] Y. Zou, M. E. Elbuluk and Y. Sozer, " Stability Analysis of Maximum Power Point Tracking (MPPT) Method in Wind Power Systems," *IEEE Transactions on industry applications*, vol.49, no. 3, may/june 2013.
- [8] I. Buehring and L. Freris, "Control policies for wind-energy conversion systems," *IEEE Proceedings C (Generation, Transmission and Distribution)*, vol. 128, no. 5. IET, 1981, pp. 253–261.
- [9] J. S. Thongam and M. Ouhrouche, "MPPT Control Methods in Wind Energy Conversion Systems, Fundamental and Advanced Topics in Wind Power," Dr. Rupp Cariveau (Ed.), ISBN: 978-953-307-508-2, InTech, pp 339-360.
- [10] J. C. Peña, "A Comparative Study of MPPT Strategies and a Novel Single-phase Integrated Buck-Boost Inverter for Small Wind Energy Conversion Systems," *Power Electronics Conference (COBEP)*, Brazil, 2011.
- [11] L.A. Zadeh, "Information and Control, Fuzzy Sets", vol 8, pp 338- 353, 1965.
- [12] M. Sugeno, "Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control," *IEEE Transactions on systems Man and Cybernetics*, vol 15, n°1, pp 116-132, 1985. 2004.
- [13] H.Othmani, "Optimisation de la Technique de Perturbation et Observation par la Logique Floue," *International Journal of Scientific Research & Engineering Technology (IJSET)*, 2015.
- [14] S. Heier, "Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems. Chicester," U.K.: John Wiley & Sons Ltd, 1998.