

## IV. 1 Introduction

Jusqu'à maintenant les régulateurs conventionnels restent largement utilisés dans les applications industrielles. Environ 90 % des contrôleurs industriels sont des contrôleurs PID [47]. Le reste est constitué de systèmes de contrôle dédiés basés sur différentes techniques de contrôle avancées. La simplicité du contrôleur PI, sa facilité d'exploitation, ces bonnes performances dans certaines conditions et son coût sont les principaux avantages de son utilisation.

Pour résoudre les problèmes de régulation dans le régime transitoire, face aux variations des paramètres de système, il est connu que le régulateur flou apporte des solutions efficaces. En particulier dans le cas de présence d'une dynamique non-linéaire dans le système.

Dans ce chapitre on représente les différentes structures de contrôleurs flous développés à savoir un régulateur PI-flou incrémental, en suite un contrôleur flou adaptatif, utilisés pour le réglage de la vitesse de la turbine. Les résultats de simulation seront aussi présentés afin de mettre en évidence l'amélioration du comportement dynamique.

## IV. 2 Commande par la logique floue

La commande par la logique floue est en pleine expansion. En effet, cette méthode permet d'obtenir une loi de réglage souvent très efficace sans devoir faire des modélisations approfondies. Par opposition à un régulateur standard ou à un régulateur à contre-réaction d'état, le régulateur par logique floue ne traite pas une relation mathématique bien définie, mais utilise des inférences avec plusieurs règles, se basant sur des variables linguistiques [42].

## IV. 3 Structure d'un régulateur flou

La conception d'un système flou est constituée de trois étapes principales: la conversion des entrées en valeurs floues, l'évaluation des règles et la conversion du résultat des règles en une valeur numérique de sortie. La première étape est donc la fuzzification; pour transformer les grandeurs physiques (entrées) en valeurs linguistiques (sous ensemble flou). La seconde étape concerne le module d'inférence, qui est constitué de deux blocs, le moteur d'inférence et la base des règles. Enfin, l'étape de défuzzification qui permet d'inférer une valeur nette (précise), utilisable en commande par exemple, à partir du résultat de l'agrégation des règles.

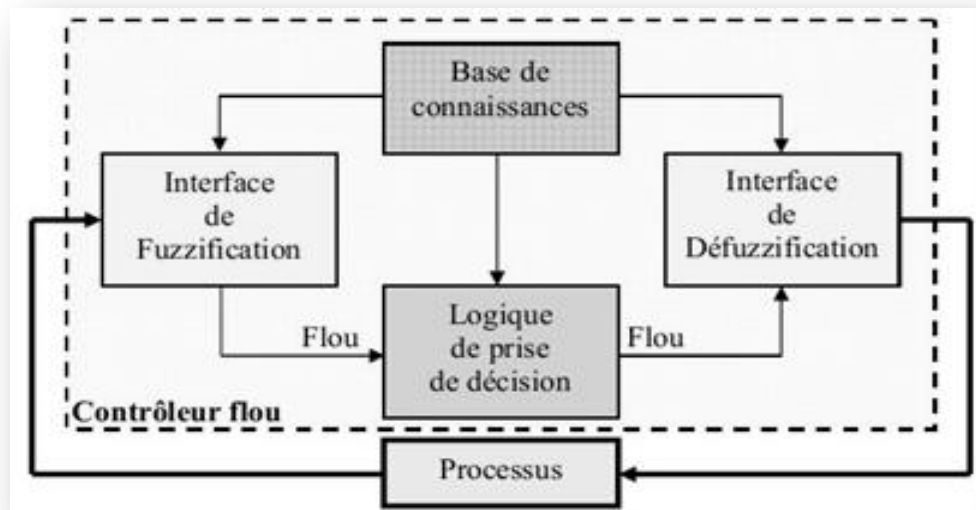


Figure. IV. 1: schéma général d'un contrôleur flou.

Comme il est indiqué sur la (figure IV.1), le régulateur par logique flou est composé donc de quatre éléments de base:

- Fuzzification
- Moteur d'inférence floue
- Base de connaissances (règles)
- Défuzzification

## IV. 4 Application des régulateurs flous de vitesse

Dans le but d'améliorer le comportement dynamique du réglage de la vitesse de la turbine, on introduit pour une variable  $x$  : trois, cinq ou sept ensembles flous. Une subdivision plus fine, compliquerait l'opération et influencerait sur le temps de calcul. Il existe plusieurs architectures qui sont recommandées et dont nous avons utilisé quelques unes.

### IV. 4. 1 Régulateur PI-flou (incrémental) à trois ensembles

Dans le système présenté dans cette étude, trois régulateurs indépendants à base de la logique floue sont utilisés pour la commande de vitesse de la turbine.

Le schéma de base du régulateur flou repose sur la structure d'un régulateur de la forme incrémentale (figure IV.3).

L'observation du processus montre que les grandeurs significatives pour le contrôle sont l'erreur de la vitesse et la variation de cette erreur. On adoptera donc, pour les entrées du

correcteur flou, ces deux grandeurs caractéristiques notées  $e$  et  $\Delta e$ . La sortie du régulateur sera l'incrément de la vitesse  $\Omega_{mec}$ . Il suffit d'intégrer cette grandeur pour avoir la valeur de la vitesse de référence  $\Omega_{ref}$

Les deux entrées du contrôleur flou sont l'erreur de vitesse et sa variation.

L'erreur de vitesse notée  $e$  est définie par :

$$e = \Omega_{ref} - \Omega_{mec} \quad (IV.3)$$

La variation de l'erreur de la vitesse notée  $\Delta e$  est définie par :

$$\Delta e = e(t + \Delta t) - e(t) = e(k + 1) - e(k) \quad (IV.4)$$

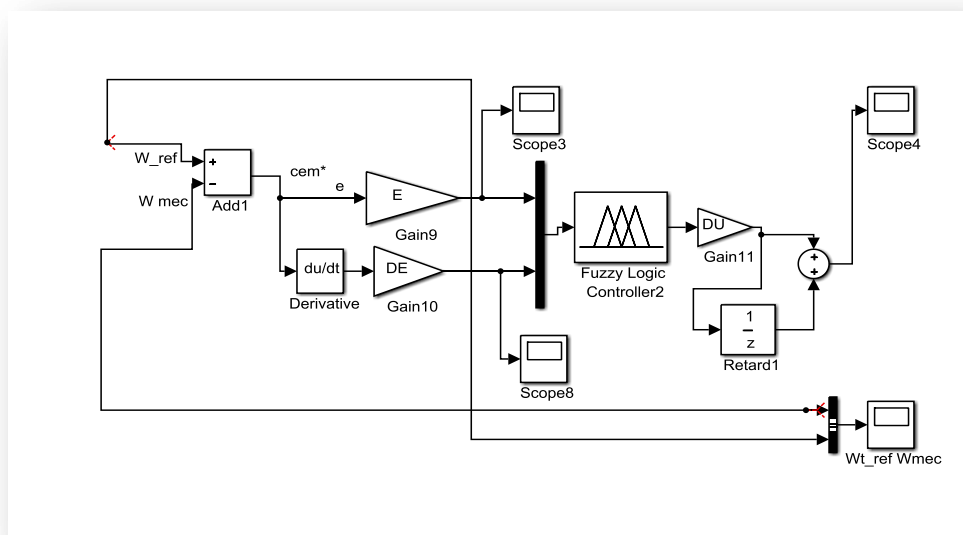
$$\begin{cases} E = K_e e \\ \Delta E = K_{\Delta e} \Delta e \\ \Delta U = K_{\Delta u} \Delta u \end{cases} \quad (IV.5)$$

La sortie du régulateur correspond à la variation de la commande notée  $\Delta u$ .

On retrouve en entrée et en sortie du régulateur flou des gains dits « gains d'adaptation » ou gains de normalisation. Ces derniers jouent un rôle très important puisqu'ils permettent de fixer les performances statiques et dynamiques de la commande (sensibilité du régulateur) et une flexibilité dans l'implémentation du régulateur tout en limitant les univers de discours des variables (d'entrée et de sortie) à un intervalle déterminé, par la normalisation des entrées et de sortie, d'où l'appellation « gain de normalisation ». Il n'existe aucune méthode systématique qui permet de déterminer ces paramètres, on doit donc procéder par la méthode « essai-erreur » (tâtonnement). [48].

**Tableau IV. 1** Valeurs de tâtonnement des gains de normalisation.

| $K_e$ | $K_{\Delta e}$ | $K_{\Delta u}$ | $\Omega_{ref}$ | $\Omega_{mec}$ |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 e3  | 1 e 6          | 1 e3           | 150 (rad/sec)  | 245 (rad/sec)  |
| 1 e2  | 1 e 6          | 1 e3           | 150 (rad/sec)  | 145 (rad/sec)  |
| 0.001 | 1 e3           | 10 e1          | 150 (rad/sec)  | 170 (rad/sec)  |
| 0.001 | 0.0001         | 10 e4          | 150 (rad/sec)  | 149 (rad/sec)  |
| 0.01  | 0.0001         | 10 e6          | 150 (rad/sec)  | 150 (rad/sec)  |

**Figure. IV. 2:** Schéma synoptique d'un régulateur PI-flou incrémental de vitesse.

#### IV. 4. 1.1 Fuzzification

Nous introduisons, pour les variables d'entrées et de sortie du RLF, trois ensembles représentés par des fonctions d'appartenance de forme triangulaire. Sauf pour les extrémités où la forme trapézoïdale

Le régulateur admet pour chaque variable les trois ensembles flous N (négatif), Z (zéro) et P (positif) [41].

Les fonctions d'appartenance des variables floues de l'entrée se recouvrent à 1 (Figure IV.4). Ainsi une matrice d'inférence qui illustre ce régulateur (tableau IV.3).

Les fonctions Les d'appartenance pour les entrées  $E$  et  $\Delta E$  sont définies dans l'intervalle  $[-1 \ 1]$ .

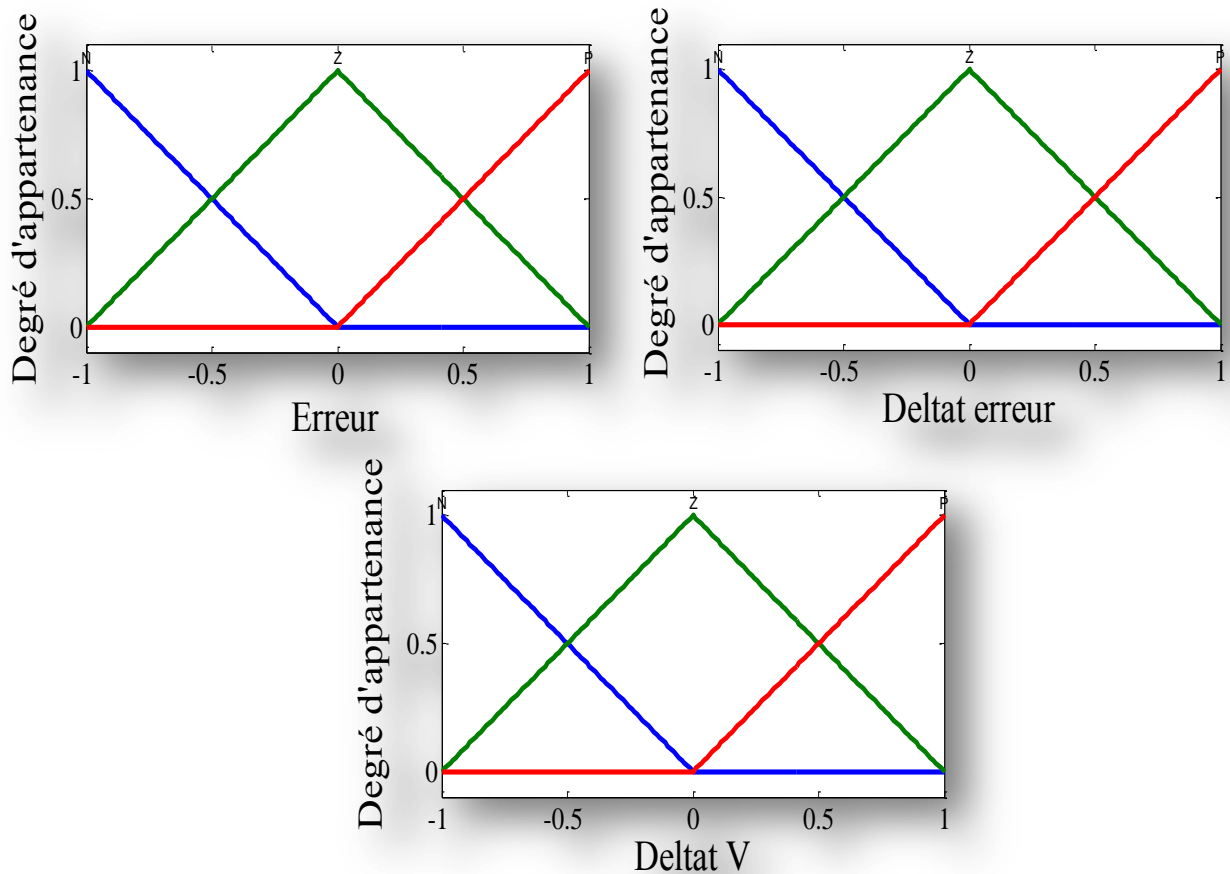


Figure. IV. 2 : fonctions d'appartenance de contrôleur PI-flou incrémental à trois ensembles.

#### IV. 4.1.2 Base de règles

La base des règles représente la stratégie de commande et le but désiré par le biais des règles de commande linguistiques [42]. Elle permet de déterminer la décision ou l'action à la sortie du contrôleur flou et exprimer qualitativement la relation qui existe entre les variables d'entrées et la variable de sortie.

A partir de l'étude du comportement du système, nous pouvons établir les règles de commande, qui relient la sortie avec les entrées. Comme nous l'avons mentionné, chacune des deux entrées linguistiques du contrôleur flou possède trois ensembles flous, ce qui donne un ensemble de quinze règles floues. Ces règles sont représentées dans une matrice dite « matrice d'inférence » (Tableau IV.2).

**Tableau IV. 2:** Matrice d'inférence du régulateur flou à trois fonctions d'appartenance.

|     |          | $dE$     |          |          |
|-----|----------|----------|----------|----------|
|     |          | <b>N</b> | <b>Z</b> | <b>P</b> |
| $E$ | <b>N</b> | <b>N</b> | <b>N</b> | <b>Z</b> |
|     | <b>Z</b> | <b>N</b> | <b>Z</b> | <b>P</b> |
|     | <b>P</b> | <b>Z</b> | <b>P</b> | <b>P</b> |

D'après cette matrice, on peut définir les 15 règles, par exemple :

$R_1$  : Si  $E$  est  $N$  et  $\Delta E$  est  $N$  Alors  $\Delta V$  est  $N$ .

$R_8$  : Si  $E$  est  $P$  et  $\Delta E$  est  $N$  Alors  $\Delta V$  est  $Z$ .

$R_{15}$  : Si  $E$  est  $P$  et  $\Delta E$  est  $P$  Alors  $\Delta V$  est  $P$ .

#### IV. 4.1.3 Mécanisme d'inférence

A partir de la base des règles et les sous-ensembles flous correspondant à la fuzzification, le mécanisme d'inférence flou permet la détermination des variables floues de sortie. En effet, la traduction des opérateurs "ET", "OU" et "Alors" par des fonctions et la combinaison de ces différentes fonctions donnent la sortie floue du régulateur. Comme on l'a mentionné précédemment, plusieurs méthodes d'inférence ont été élaborées pour réaliser les opérateurs flous. Dans notre travail on a adopté la méthode d'inférence utilisée est celle de Mamdani (Max-Min), où l'opérateur «ET » est réalisé par la fonction Min, l'opérateur «Alors » de chaque règle par la fonction Min et la liaison entre toutes les règles (l'opérateur OU) par la fonction Max.

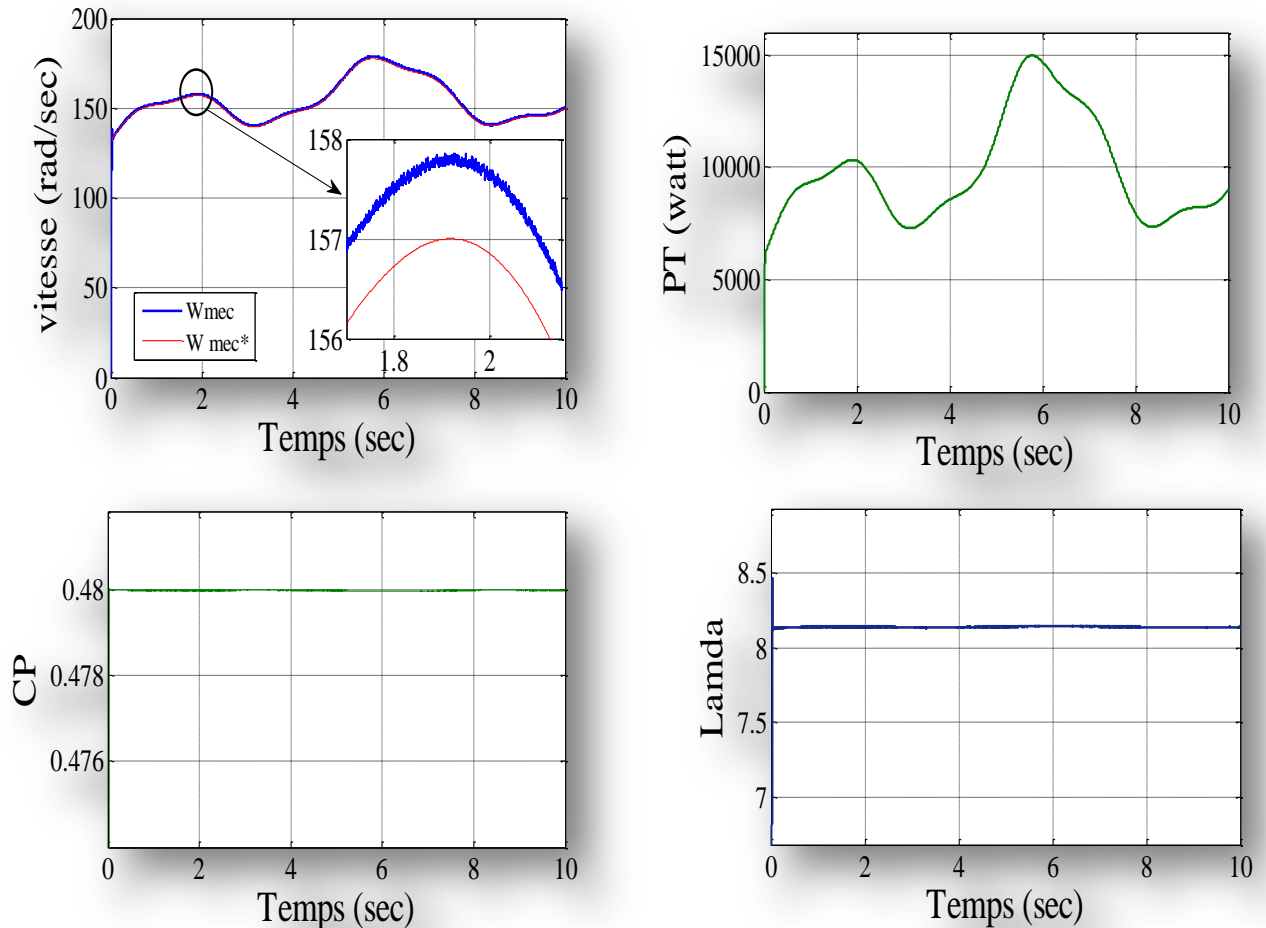
Alors la sortie floue résultante du régulateur c'est la contribution des 15 règles floues de la matrice d'inférence.

#### IV. 4.1.4 Défuzzification

L'étape de la défuzzification est la dernière étape pour la conception d'un régulateur flou. Lorsque la sortie floue est calculée, il faut la transformer en une valeur numérique. Il existe plusieurs méthodes pour réaliser cette transformation. La plus utilisée est la méthode du centre de gravité, qu'on a adoptée dans notre travail.

#### IV. 4.1.5 Résultats de simulation

On va illustrer les résultats de simulation de la commande de la vitesse par un PI flou, qui nous permet d'évaluer les performances apportées par le système de réglage considéré.



**Figure IV. 5 :** Evolution des grandeurs mécaniques de la chaîne de conversion.

La (Figure IV. 5) représente l'évolution des grandeurs mécaniques de la chaîne de conversion, la puissance (PT), le coefficient aérodynamique ( $C_p$ ) et la vitesse spécifique ( $\lambda$ ), ainsi la vitesse de rotation de la turbine on remarque que ( $C_p$ ) prend une forme d'allure croissante pendant le temps de démarrage, puis il se met à sa valeur optimale (0.48), ainsi que la vitesse spécifique est asservi à sa valeur optimale aussi (8.1), La vitesse suit sa référence parfaitement mais avec un erreur statique. On remarque aussi la présence de chattering (harmoniques) qui sont dus à la commutation des semi- du redresseur de puissance.

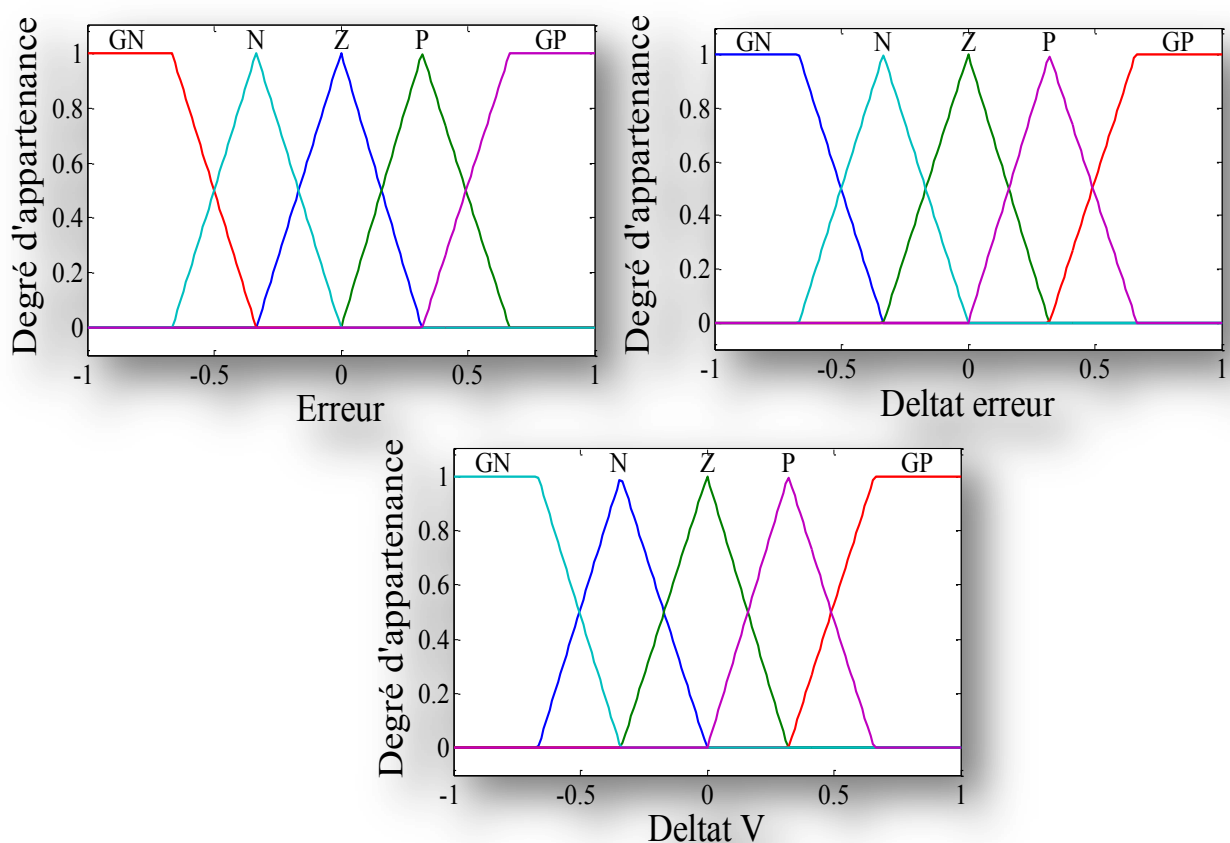
#### IV.4 .2. Régulateur PI-flou (incrémental) à cinq ensembles

Pour le régulateur incrémentale on a réfère les mêmes étapes que trois ensembles.

Nous introduisons, pour les variables d'entrées et de sortie du RLF, cinq ensembles représentés par des fonctions d'appartenance de forme triangulaire.

Les fonctions d'appartenance des variables floues de l'entrée se recouvrent à (Figure IV.6). Ainsi une matrice d'inférence qui illustre ce régulateur (tableau IV.3).

Les fonctions d'appartenance pour les entrées  $E$  et  $\Delta E$  sont définies dans l'intervalle  $[-1, 1]$ .



**Figure IV. 6:** fonctions d'appartenance de contrôleur PI-flou incrémental à trois ensembles.

A partir de l'étude du comportement du système, nous pouvons établir les règles de commande, qui relie la sortie avec les entrées. Comme nous l'avons mentionné, chacune des deux entrées linguistiques du contrôleur flou possède cinq ensembles flous, ce qui donne un ensemble de vingt-cinq règles floues. Ces règles sont représentées dans une matrice se dessus (Tableau IV.3).



**Tableau IV. 3:** Matrice d'inférence du régulateur flou à cinq fonctions d'appartenance.

|              |          |          |           |          |           |
|--------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|
| $E_v$        | <b>Z</b> | <b>P</b> | <b>GN</b> | <b>N</b> | <b>GP</b> |
| $\Delta E_v$ | $d_v$    |          |           |          |           |
| <b>GN</b>    | GN       | GN       | N         | N        | Z         |
| <b>Z</b>     | GN       | N        | N         | Z        | P         |
| <b>GP</b>    | N        | N        | Z         | P        | P         |
| <b>N</b>     | GP       | P        | P         | Z        | N         |
| <b>P</b>     | Z        | P        | P         | GP       | GP        |

**Tableau IV. 4:** Valeurs de tâtonnement des gains de normalisation.

| $K_e$ | $K_{\Delta e}$ | $K_{\Delta u}$ | $\Omega_{ref}$ | $\Omega_{mec}$ |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 0.1   | 0.1            | 100            | 150 (rad/sec)  | 300 (rad/sec)  |
| 0.2   | 0.2            | 100            | 150 (rad/sec)  | 254 (rad/sec)  |
| 0.3   | 0.3            | 150            | 150 (rad/sec)  | 165 (rad/sec)  |
| 0.5   | 0.4            | 180            | 150 (rad/sec)  | 159 (rad/sec)  |
| 0.6   | 0.6            | 200            | 150 (rad/sec)  | 150 (rad/sec)  |

#### IV.4.2.1 Résultats et interprétation de simulation

On va illustrer les résultats de simulation de la commande de la vitesse par un PI flou incrémentale à cinq ensembles, qui nous permet d'évaluer les performances apportées par le système de réglage considéré.

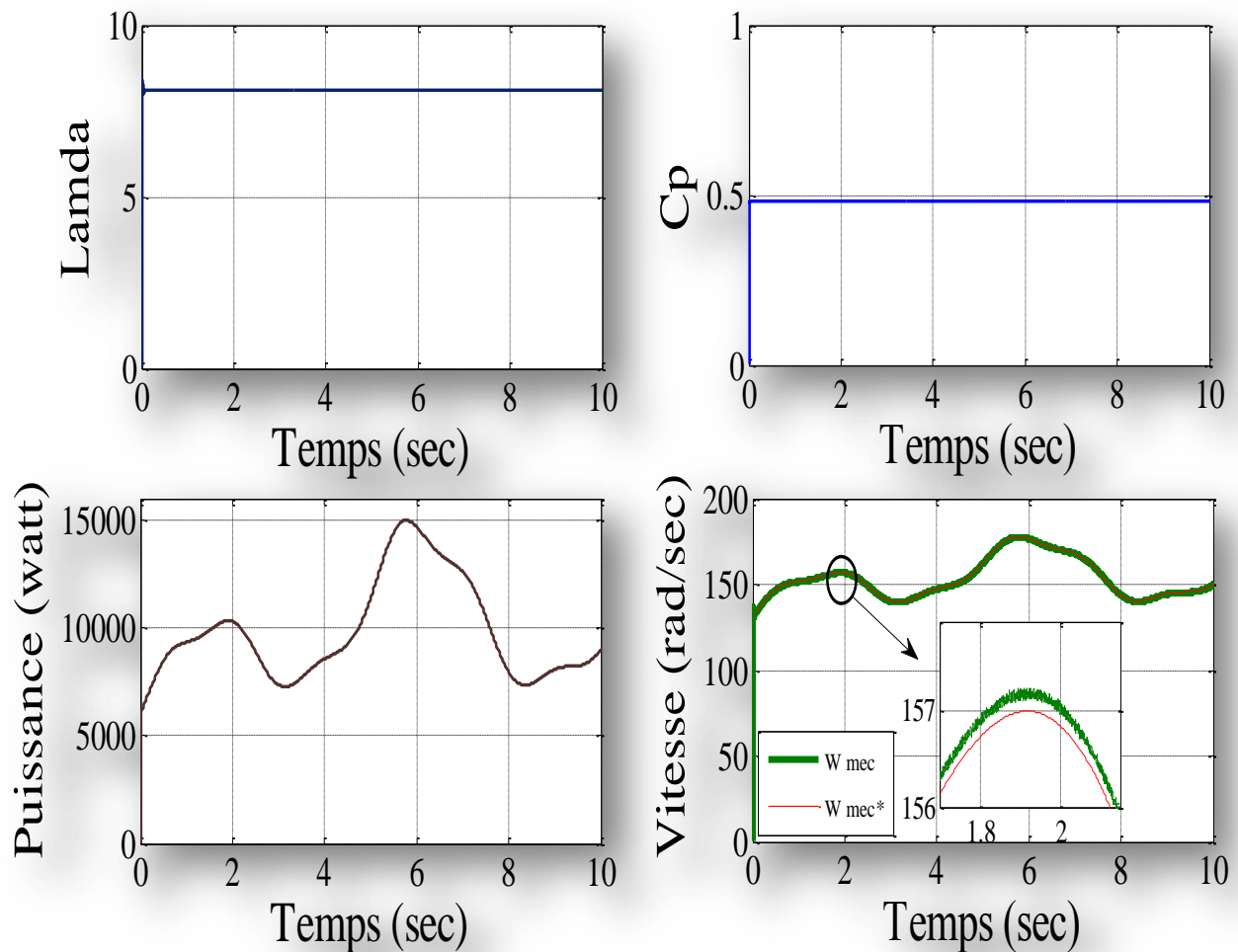


Figure IV. 7: Evolution des grandeurs mécaniques de la chaîne de conversion

La (figure IV.7) représente la puissance de la turbine, le coefficient aérodynamique  $C_p$  et la vitesse spécifique, ainsi la vitesse de rotation de la turbine.

On remarque que le régulateur PI flou incrémentale ne fait aucun influence sur  $C_p$  et  $\lambda$   $C_p$  prend même forme d'allure et sa valeur optimale (0.48), ainsi que la vitesse spécifique est asservi à sa valeur optimale aussi (8.1), La vitesse mécanique celle de référence sont superposés avec une erreur statique presque nulle par rapport aux PI classique et PI flou incrémentale à trois ensembles, avec une présence de chattering (harmoniques) qui sont dus à la commutation des semi-conducteurs de puissance.

### IV. 4.3 Régulateur PI-flou adaptatif

Actuellement les contrôleurs PID atteignent la limite de leurs capacités. Ceci est dû principalement au manque de flexibilité structurelle du contrôleur PID [47]. La technologie des contrôleurs PI incorpore des éléments d'intelligence artificielle pour améliorer leurs performances et résoudre un plus large spectre de problèmes. La commande adaptative connaît un très grand essor ces dernières années. Cela est motivé par le développement d'algorithmes de commande adaptative très performants mis en application grâce à la disponibilité de moyens de calcul très rapides et de capacité de mémoire plus élevée [49].

#### IV. 4. 3.1 Description

Les régulateurs PI-flous peuvent être considérés comme des PI non- linéaires et leurs paramètres changent au cours de fonctionnement. Dans notre cas on se base sur l'erreur et sa dérivée pour ajuster ces paramètres (gains de normalisation). Cette approche associant :

- le régulateur PI et le superviseur composé de règles floues,
- offre la possibilité d'utiliser la précision mathématique,
- la souplesse et la simplicité du formalisme linguistique flou.

Dans ce type de commande, dite adaptative, l'objectif de la loi d'adaptation est d'améliorer les performances de la commande des systèmes complexes et non linéaires.

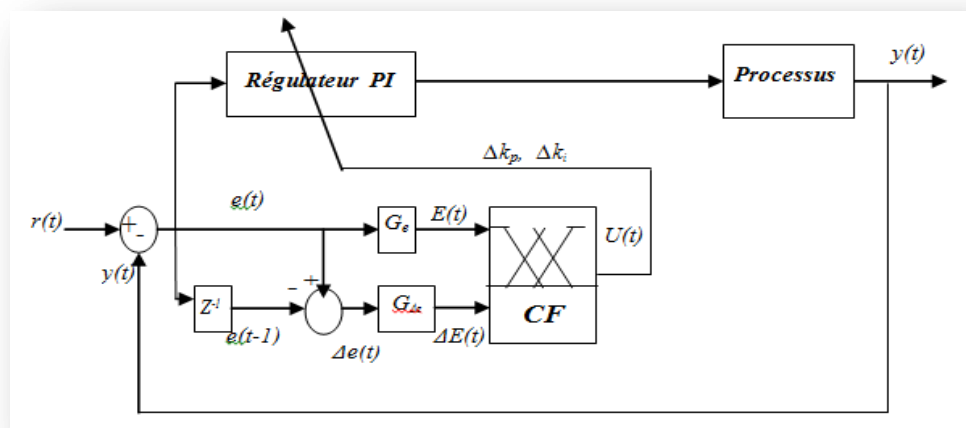


Figure. IV. 8: Principe d'adaptation du PI par la logique floue.

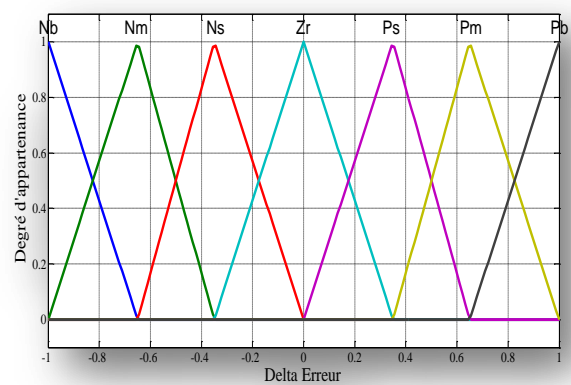
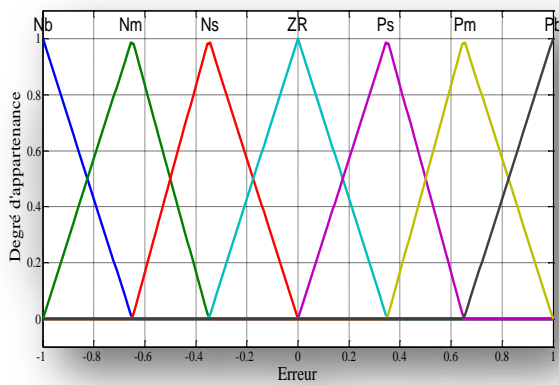
On propose un superviseur dont les entrées sont (l'erreur et sa variation), les sorties sont deux matrices floues permettent de générer les signaux qui seront à appliqués à chaque gain du

PI ( $K_p, K_i$ ). La (figure IV.5) montre le diagramme de cette configuration. Le contrôleur flou est utilisé pour modifier les paramètres selon le comportement du procédé.

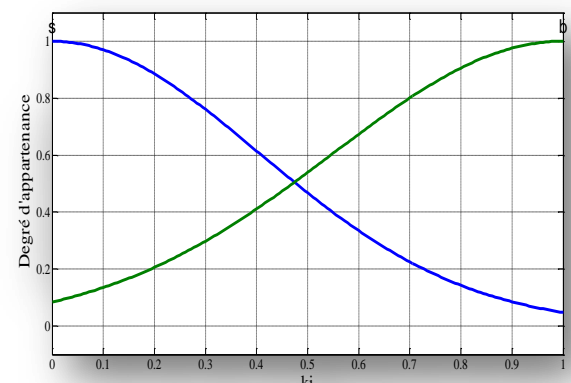
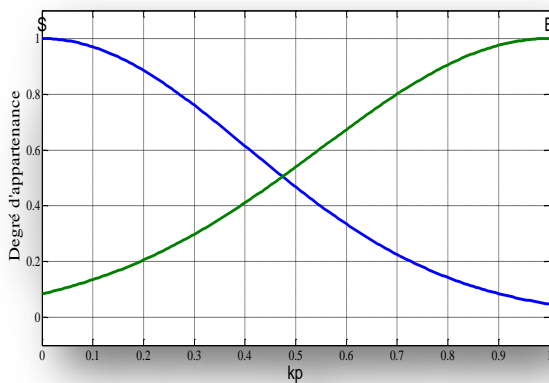
Les entrées du contrôleur flou sont: l'erreur et la dérivée de l'erreur. Les sorties sont: la valeur normalisée de l'action proportionnelle  $\Delta k_p$  et la valeur normalisée de l'action intégrale  $\Delta k_i$ .

Ces deux grandeurs de la commande sont normalisées dans l'intervalle  $[-1, 1]$ .  $K_{p0}$  et  $k_{i0}$  sont les paramètres de régulation à l'état initial.

On représente les fonctions d'appartenance, comme le montre la (figure IV.6). 7 ensembles pour chaque entrée, on aura donc 49 combinaisons possibles montrées par le (tableau IV.3).



a : les entrées.



b : les sorties.

Figure. IV.9 : fonctions d'appartenance de contrôleur PI-flou adaptatif.

De même que pour le régulateur PI-flou adaptative de vitesse, la méthode d'inférence utilisée est celle de Mamdani (Max, Min) et la défuzzification est réalisée, par la méthode du centre de gravité.

On notera que pour la variables de sortie  $K_p$  et  $K_i$ , les fonctions d'appartenance correspondant aux ensembles flous "petit négatif" (PN) et "petit positif" (PP) sont proches de celle de l'ensemble "zéro". La matrice d'inférence utilisée est décrite par le tableau suivant :

**Tableau IV. 5:** Matrice d'inférence du régulateur flou à sept fonctions d'appartenance.

|              |       |    |    |    |    |    |    |
|--------------|-------|----|----|----|----|----|----|
| $E_v$        | NG    | NM | NP | EZ | PP | PM | PG |
| $\Delta E_v$ | $d_v$ |    |    |    |    |    |    |
| NG           | NG    | NG | NG | NG | NM | NP | EZ |
| NM           | NG    | NG | NG | NM | NP | EZ | PP |
| NP           | NG    | NG | NM | NP | EZ | PP | PM |
| EZ           | NG    | NM | NP | EZ | PP | PM | PG |
| PP           | NM    | NP | EZ | PP | PM | PG | PG |
| PM           | NP    | EZ | PP | PM | PG | PG | PG |
| PG           | EZ    | PP | PM | PG | PG | PG | PG |

Après avoir intégré le régulateur PI-flou adaptatif à notre commande, nous avons simulé le comportement dynamique de notre chaîne de conversion dans le but de mettre en évidence les performances liés à ce type de régulateur.

## IV. 4. 2.2 Simulation et interprétation des résultats de PI-flou adaptatif

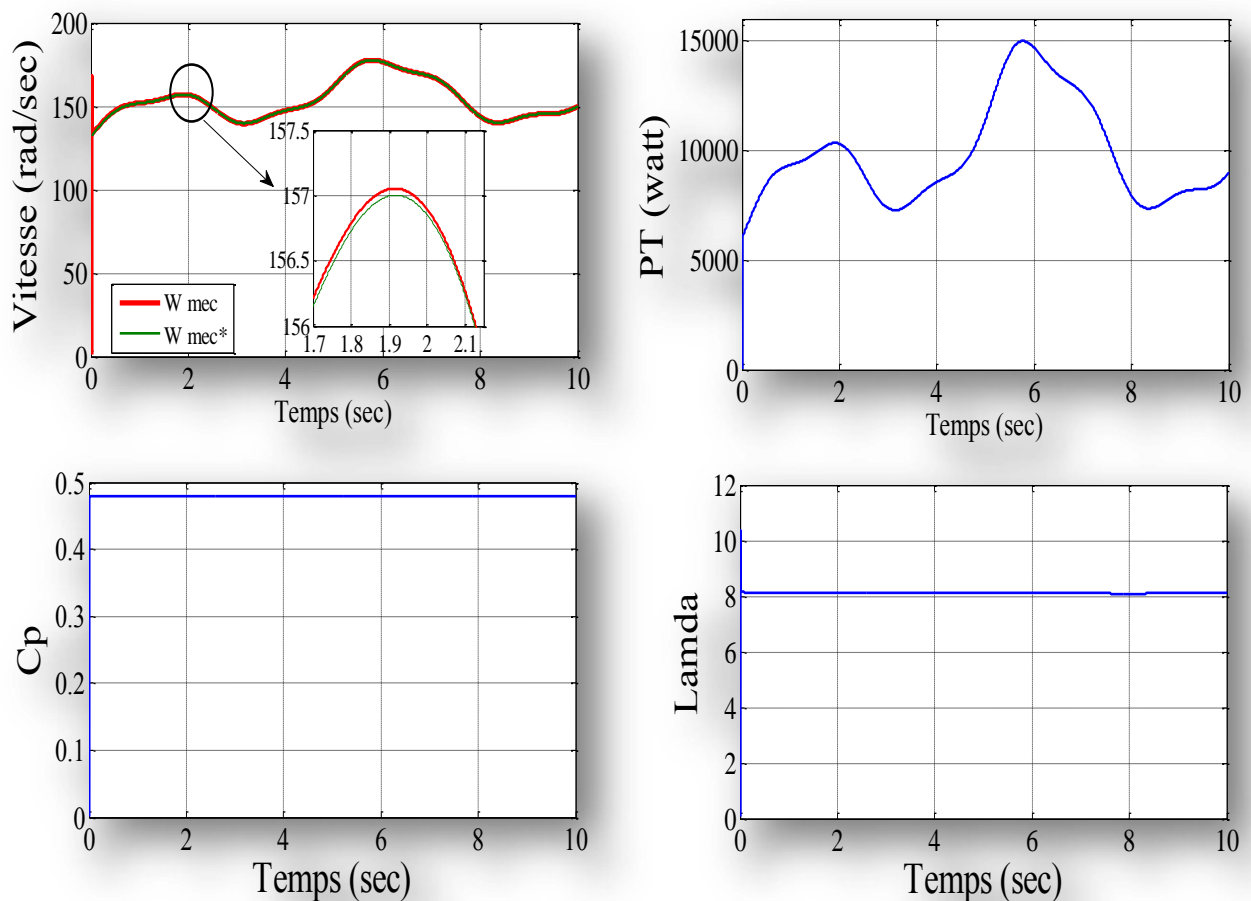


Figure IV. 10 : Evolution des grandeurs mécaniques de la chaîne de conversion.

La figure IV.10 représente la puissance de la turbine, le coefficient aérodynamique  $C_p$  et la vitesse spécifique, ainsi la vitesse de rotation de la turbine.

On remarque que le régulateur PI flou adaptatif n'affecte pas la valeur de  $C_p$  et de lamda. La valeur optimale (0.48) de  $C_p$  est maintenue. La vitesse spécifique est asservi à sa valeur optimale aussi (8.1), La vitesse mécanique celle de référence sont superposés avec une erreur statique presque nulle par rapport aux PI classique et PI flou incrémentale à trois ensembles et cinq ensembles, avec une diminution totale de chattering (harmoniques) qui sont dus à la commutation des semi-conducteurs de puissance.

### IV. 5 Test de robustesse

Dans le but de tester la robustesse des contrôleurs utilisés vis-à-vis des variations paramétriques, on a refait le même travail de simulation qui a été achevé dans le cas du réglage de vitesse par le régulateur PI classique. On a varié les paramètres de la turbine ( $J_t=200\%$ ).

Les figures ce dessus illustre les réponses dynamiques de la vitesse lors des variations paramétriques.

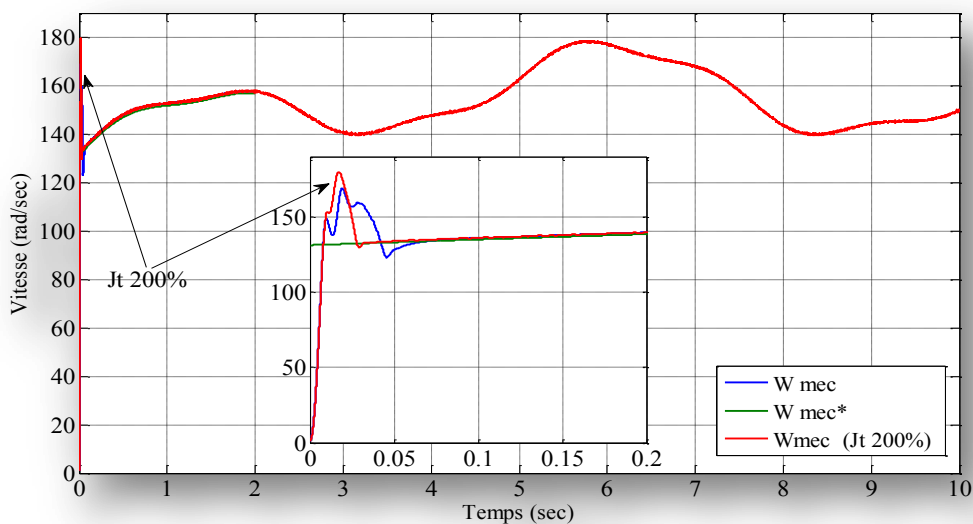


Figure .IV.11 : Test de robustesse du réglage de vitesse par un PI avec augmentation de 200%  $J_t$

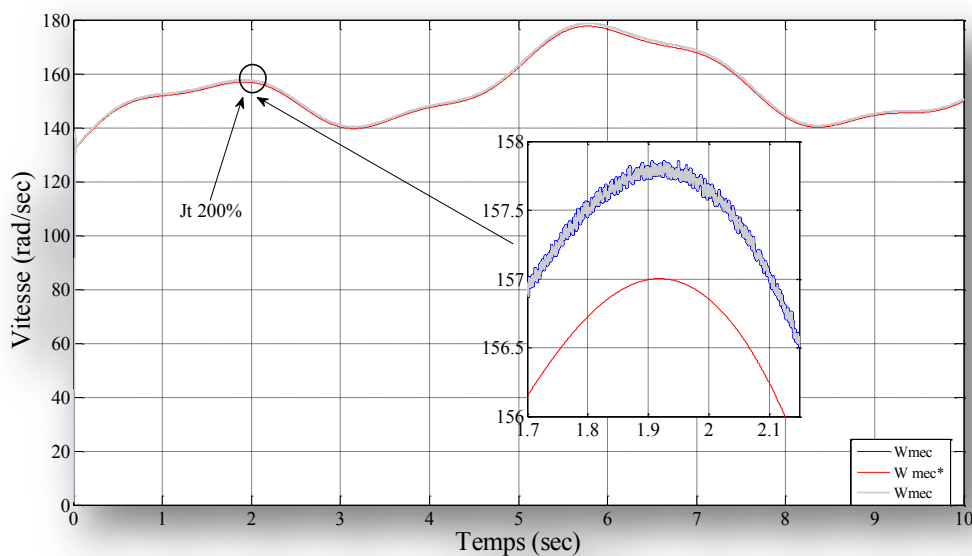
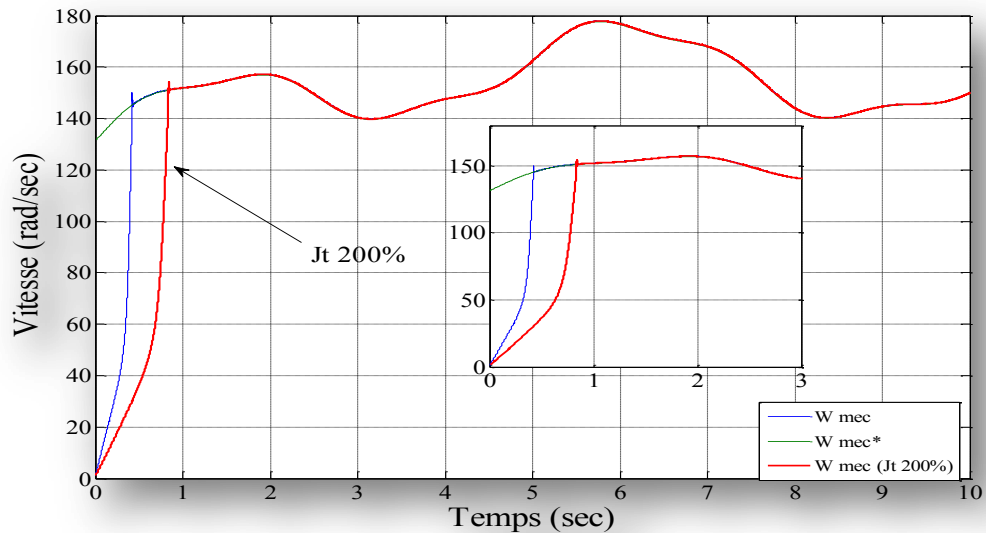
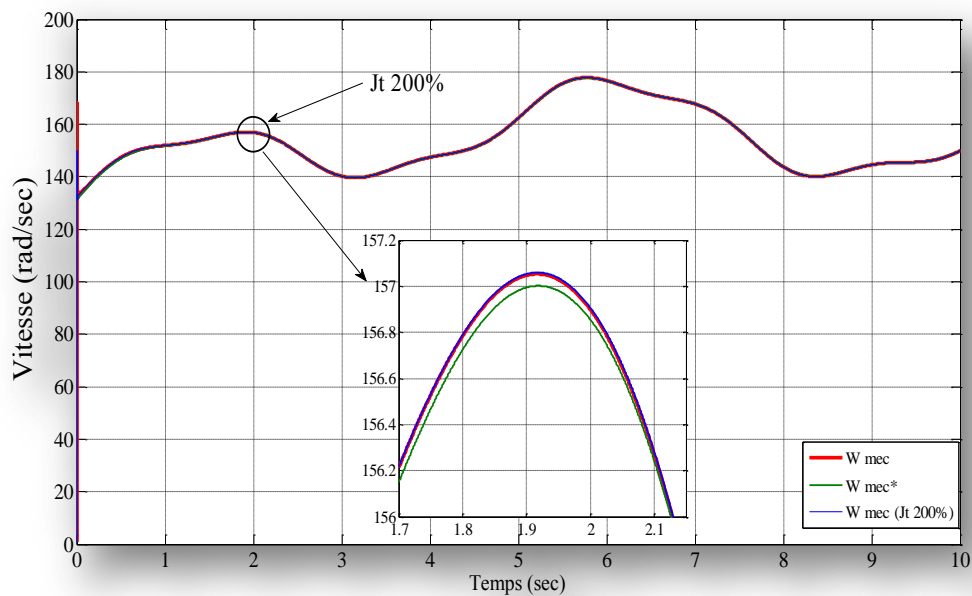


Figure.IV.12 Test de robustesse du réglage de vitesse par un PI flou incrémental à trois ensembles avec augmentation de 200%  $J_t$



**Figure.IV.13** Test de robustesse du réglage de vitesse par un PI flou incrémental à cinq ensembles avec augmentation de 200% Jt.



**Figure. IV.14** Test de robustesse du réglage de vitesse par un PI flou adaptatif avec augmentation de 200% Jt

D'après les résultats obtenus, on peut constater les points suivants :

- **PI classique** : On remarque que l'allure de la vitesse a été affectée par la valeur de Jt ce qui explique la sensibilité de la commande vectorielle à la variation des paramètres de la turbine car les gains de réglages sont calculés en fonction de ces derniers.



• **PI flou incrémentale a trois ensembles et le PI flou adaptatif** : Par rapport au régulateur PI classique, ces deux régulateurs montrent une bonne robustesse car l'allure la vitesse est faiblement affectée. Le suivi de la vitesse de référence est maintenu ce qui met en évidence l'avantage de ces deux régulateurs.

• **PI flou incrémentale a cinq ensembles** : On a remarqué que l'allure de la vitesse est affectée et ceci peut être expliqué par les valeurs de gains de normalisations utilisées qui n'étaient certainement pas les meilleures

## IV. 6 Avantages et inconvénients de la commande par la logique floue

La commande par logique floue réunit un certain nombre d'avantages et de désavantages sont [42]:

### Avantages

- Non nécessité d'une modélisation mathématique rigoureuse du processus ;
- La possibilité d'implanter des connaissances (linguistiques) de l'opérateur de processus ;
- La maîtrise du procédé avec un comportement complexe (fortement non- linéaire et difficile à modéliser);
- La réduction du temps de développement et de maintenance ;
- La simplicité de définition et de conception.

### Inconvénients

- Le manque de directives précises pour la conception d'un réglage (choix des grandeurs à mesurer, détermination de la fuzzification, des inférences et de la défuzzification) ;
- L'approche artisanale et non systématique (implantation des connaissances des opérateurs souvent difficile) ;
- La difficulté de démontrer la stabilité dans tous les cas ;
- La cohérence des inférences non garantie a priori (apparition de règles d'inférence contradictoires possible).

## IV.7 Conclusion

La technique de commande par logique floue avec sa possibilité de contrôler des systèmes complexes sans nécessité de leur modélisation complète, était l'objet traité par ce quatrième chapitre, où on a présenté un système flou et leurs différentes parties constitutifs. Puis on a donné la description de deux contrôleurs flou incrémental et adaptatif, avant de faire une application sur la commande de la turbine, afin de régler la vitesse du système éolien étudié à sa valeur optimale assurant la MPPT.

Cette application est simulée numériquement en utilisant l'outil MATLAB (Simulink), mais le dimensionnement du régulateurs flous est fait par ajustement manuel en utilisant la méthode « essai-erreur » (tâtonnement), pour déterminer les trois gains de normalisation  $K_e$ ,  $K_{\Delta e}$  et  $K_{\Delta u}$ .

Les résultats de simulation obtenus montrent l'amélioration des performances dynamiques et la robustesse de ces deux régulateurs vis-à-vis de la variation paramétrique de la turbine. Sans oublier que les tâtonnements et les valeurs obtenues ne sont pas toujours justifiés.

## Chapitre IV : Application du régulateur flou à la chaîne éolienne

|  |           |
|--|-----------|
| <b>IV. 1 Introduction.....</b>   | <b>64</b> |
| <b>IV. 2 Commande par la logique floue.....</b>                                  | <b>64</b> |
| <b>IV. 3 Structure d'un régulateur flou .....</b>                                | <b>64</b> |
| <b>IV. 4 Application des régulateurs flous de vitesse .....</b>                  | <b>65</b> |
| IV. 4. 1 Régulateur PI-flou (incrémental) à trois ensembles .....                | 65        |
| IV. 4. 1.1 Fuzzification.....  | 67        |
| IV. 4.1.2 Base de règles .....   | 68        |
| IV. 4.1.3 Mécanisme d'inférence .....  | 69        |
| IV. 4.1.4 Défuzzification .....  | 69        |
| IV. 4.1.5 Résultats de simulation.....   | 70        |
| IV.4 .2. Régulateur PI-flou (incrémental) à cinq ensembles .....                 | 71        |
| IV.4.2.1 Résultats et interprétation de simulation .....                         | 72        |
| IV. 4.3 Régulateur PI-flou adaptatif .....                                       | 74        |
| IV. 4. 3.1 Description .....   | 74        |
| <b>IV. 5 Test de robustesse .....</b>  | <b>78</b> |
| <b>IV. 6 Avantages et inconvénients de la commande par la logique floue.....</b> | <b>80</b> |
| <b>IV.7 Conclusion .....</b>   | <b>81</b> |