

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



**Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie**

**Département** : Automatisation et électrification des procédés industriels

**Specialité** : Automatisation des procédés industriels : Commande automatique

**Mémoire de Fin d'Etudes**  
**En vue de l'obtention du diplôme :**

**MASTER**

***Thème***

**Etude comparative entre la commande classique PID analogique et la  
commande floue pour la stabilisation du système de vapocraquage  
« Rapport débit de gaz et débit de vapeur »**

**Présenté par :**

Bouzit Abderraouf

Saidani Oussama

**Avis favorable de l'encadreur :**

BOUMEDINE M.S

signature

**Année universitaire : 2015/2016**

## Liste des figures

-Figure a : Schéma sur le mélange V/G (Feed mixture).....	1
-Figure I.1 : Schéma du principe de production de l'ammoniac.....	7
-Figure I.2 Synoptique générale du Process.....	9
-Figure I.3 : Désulfuration du gaz naturel .....	10
-Figure I.5 : Point du contrôle le rapport G/V.....	11
-Figure I.4 : Reforming primaire et secondaire.....	12
-Figure II.1 : Procédure d'identification d'un système.....	15
-Figure II.2 : Schéma de principe d'identification paramétrique.....	16
-Figure II.3 : Schéma de principe de la procédure pratique d'identification paramétrique....	17
-Figure II.4 Présentation d'un système.....	17
-Figure II.5 Modèle ARX.....	19
-Figure II.6 : Modèle ARMAX .....	20
-Figure III.1 Schéma de principe de fonctionnement d'une régulation.....	22
-Figure III.2 : Comportement en régulation.....	22
-Figure III.3 : Comportement en asservissement.....	23
-Figure III.4 : Boucle ouverte.....	23
-Figure III.5 : Boucle fermé .....	24
-Figure III.6 : Boucle en Cascade.....	24
-Figure III.7 : Procédé stable.....	25
-Figure III.8 : Procédé instable.....	25

-Figure III.9 : Procédé intégrateur.....	25
-Figure III.10 : Régime permanent et régime transitoire.....	26
-Figure III.11 : Caractéristiques statiques .....	26
-Figure III.12 : Réponse indicielle.....	27
-Figure III.13 : Régulateur PID .....	29
-Figure III.14 : Traitement flou 33.....	32
-Figure III.15 : Exemple de la Fuzzification d'une grandeur X.....	33
-Figure III.16 : fonction d'appartenance. ....	35
-Figure III.17 : La méthode d'inférence MAX-MIN.....	36
-Figure III.18 : Défuzzification par centre de gravité.....	37
-Figure III.19 : Schéma de la commande floue.....	38
Figure IV.1 : Données vapeur.....	41
Figure IV.2: Données gaz.....	42
Figure IV.3 : import data.....	42
Figure IV.4 : données vapeur importées.....	43
Figure IV.5 : données gaz importées.....	43
Figure IV.6: avant et après le lissage.....	44
Figure IV.7 : lancement du toolbox <b>ident</b> .....	44
Figure IV.8 : informations sur les données.....	44
Figure IV.9 : Estimation par ARX.....	45
Figure IV.10 : paramétrage de la méthode ARX.....	45
Figure IV.11 : ARX Model Structure Selection.....	46
Figure IV.13 : Yv mesurée et simulée par le modèle ARMAX.....	46

<b>Figure IV.12 :</b> Yv mesurée et simulée par le modèle ARX.....	47
<b>Figure IV.14 :</b> Fonction de Transfert pour la vapeur.....	47
<b>Figure IV.16:</b> ARX Model structure Selection.....	48
<b>Figure IV.15 :</b> réponse indicielle du système de la vapeur.....	49
<b>Figure IV.17 :</b> Yg mesurée et simulée le modèle par ARX.....	49
<b>Figure IV.18 :</b> Yg mesurée et simulée par le modèle ARMAX.....	50
<b>Figure IV.19:</b> fonction de transfert pour le système du gaz naturel.....	50
<b>Figure IV.20 :</b> la réponse indicielle du système du gaz naturel.....	50
<b>Figure IV.21:</b> PIDTOOL du système de vapeur.....	51
<b>Figure IV.22:</b> PIDTOOL du système du Gaz.....	52
<b>Figure IV.23 :</b> ouvrir simulink sur MATLAB.....	53
<b>Figure IV.24 :</b> créer un modèle sur Simulink.....	53
<b>Figure IV.25 :</b> ajouter les éléments du système.....	54
<b>Figure IV.26:</b> Schéma de simulation du système avec régulateurs PID.....	54
<b>Figure IV.27 :</b> les consignes vapeur et gaz.....	55
<b>Figure IV.28 :</b> écart du système de la vapeur.....	55
<b>Figure IV.29 :</b> écart du système du gaz.....	56
<b>Figure IV.30 :</b> grandeur de l'action de la commande du système de la vapeur.....	56
<b>IV.31:</b> grandeur de l'action de la commande du système du gaz.....	57
<b>Figure IV.32 :</b> réponse du système de la vapeur.....	57
<b>Figure IV.33 :</b> réponse du système du gaz naturel.....	58
<b>Figure IV.34:</b> Rapport vapeur/gaz.....	58
<b>Figure IV.35 :</b> Structure d'un régulateur flou.....	59
<b>Figure IV.36 :</b> Fuzzy logic controller.....	60
<b>Figure IV.37 :</b> Fonction d'appartenance des différents variables.....	61
<b>Figure IV.38 :</b> Lois et méthode d'inférence.....	62

<b>Figure IV.39</b> : Résultat des calculs.....	63
<b>Figure IV.40</b> : systèmes de vapeur et gaz avec régulateurs flous.....	64
<b>Figure IV.41</b> : Illustration de la réponse indicielle du système de contrôle de rapport vapeur/gaz avec un régulateur flou.....	64
<b>Figure IV.42</b> : Schéma de comparaison.....	65
<b>Figure IV.43</b> : Comparaison entre les méthodes de régulation.....	65
<b>Figure i.1</b> : Emplacement de FERTIAL en Algérie .....	

## Liste des tableaux

<b>Tableau III.1</b> : caractéristique de régulateur PID.....	30
<b>Tableau III.2</b> : Forme de la représentation des règles.....	34
<b>Tableau IV.1</b> : La matrice des règles.....	62
<b>Tableau i.1</b> :L'exportation des production	

# Sommaire

Introduction générale .....	1
La problématique.....	3
Solution projetée.....	3
Réalisation Pratique.....	3
Support pour la réalisation de l'étude.....	4

## Chapitre I : Procédé de fabrication de l'ammoniac

I.1 Introduction.....	5
I.2 Principe du Procédé de fabrication de l'ammoniac .....	5
I.2.1 Préparation de matières brutes d'alimentation.....	6
I.2.2 Purification du gaz de synthèse.....	6
I.2.3 Synthèse d'ammoniac .....	6
I.3 Description du procédé de l'ammoniac .....	7
I.4 Description de désulfuration et le reforming.....	10
I.4.1 Compression et désulfuration.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
I.4.2 Reforming Primaire et Secondaire .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
I.5 Le Rapport Vapeur/Gaz .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
I.6 Conclusion .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>

## Chapitre II : Identification et modélisation des systèmes

II.1. Introduction .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
II.2. Principe de la modélisation.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
II.3. Modèle d'identification paramétrique .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
II.3.1. Procédure pratique d'Identification paramétrique.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
II.4. Model Expérimentation.....	17
II.4.1. Critère d'ajustement .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>

II.4.2. Algorithme d'estimation.....	Erreur ! Signet non défini.
II.4.3. Validation du modèle.....	Erreur ! Signet non défini.
II.5. Structure Auto Régressive à entrée exogène (ARX) : .....	19
II.6. Structure Auto Régressive à Moyenne Ajustée et à entrée eXogène(ARMAX)	Erreur ! Signet non défini.
II.7. Conclusion.....	Erreur ! Signet non défini.

### Chapitre III : La régulation et logique floue « Fuzzy Control »

III.1. Introduction .....	Erreur ! Signet non défini.
III.2. Généralité sur les régulations .....	Erreur ! Signet non défini.
III.2.1. Principe de la régulation.....	Erreur ! Signet non défini.
III.2.1. Régulation .....	Erreur ! Signet non défini.
III.3. La régulation en boucle ouverte et en boucle fermé [9] .....	Erreur ! Signet non défini.
III.4. Régulation en cascade .....	Erreur ! Signet non défini.
III.5. La stabilité du procédé .....	Erreur ! Signet non défini.
III.6. Régime transitoire / Régime permanent .....	Erreur ! Signet non défini.
III.7. Caractéristique statique et dynamique d'un procédé .....	Erreur ! Signet non défini.
III.7.1. Caractéristiques statiques d'un procédé [10] .....	Erreur ! Signet non défini.
III.7.1.1. Gain statique.....	Erreur ! Signet non défini.
III.7.1.2. Erreur statique .....	Erreur ! Signet non défini.
III.7.1.3. Linéarité, non-linéarité d'un système.....	Erreur ! Signet non défini.
III.7.2.1. Temps de réponse.....	Erreur ! Signet non défini.
III.7.2.2. Dépassement.....	Erreur ! Signet non défini.
III.8. Le principe des régulateur PID [9] .....	Erreur ! Signet non défini.
III.8.1. L'action proportionnelle : .....	28
III.8.2. L'action intégrale : .....	28
4.8.3. L'action dérivée : .....	Erreur ! Signet non défini.
III.9. Régulateur à action proportionnelle intégral et dérivée.....	29
III.10. Résumé des actions des corrections P, I et D : .....	30
III.11. Introduction au concept de logique floue .....	Erreur ! Signet non défini.
III.12. Structure d'un contrôleur flou [11] .....	Erreur ! Signet non défini.
III.12.1Prétraitement .....	Erreur ! Signet non défini.

III.12.2. Fuzzification.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
III.12.3. Inférence floue.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
4.12.4. Défuzzification: .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
III.13. Avantages et inconvénients .....	38
III.14. Conclusion.....	39

## **Chapitre IV : Simulation**

IV.1. Introduction .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
IV.2. Traitement des données.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
IV.2.1. Débit de vapeur .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
IV.2.2. Débit de Gaz naturel.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
IV.2.3. identification des systèmes.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
IV.2.4 Identification du système du Gaz .....	47
IV.3. La commande des deux vannes.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
IV.3 .1. La commande classique .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
IV.3 .2. La commande floue .....	59
IV.3 .2.1 Fuzzification.....	59
IV.3.2.2. Inférence.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
IV.4.2.3. Déffuzzification .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
IV.4. Comparaison entre les deux modes de commande.....	64
IV.6. Conclusion .....	66
Conclusion générale .....	67

Bibliographie

ii.Anexe

.

# Remerciements

Nous remercions le bon dieu de nous avoir donné la santé, la force et la patience d'aller jusqu'au bout de nos objectifs.

Nos remerciements s'adressent à :

Notre encadreur M<sup>r</sup> BOUMEDINE M.S qui a été toujours à nos côtés, pour sa présence, sa patience, sa bonne humeur à chaque fois que nous avons besoin de son aide, et pour son orientation et son encouragement

Tout les enseignants du département d'automatisation des procédés industriels qui ont contribué à notre formation

Mr SAIDOUN LARBI, de nous avoir accepté en tant que stagiaires au sein de FERTIAL, Annaba

Nous tenons tout particulièrement à remercier M<sup>r</sup> GHERIB KAMEL, chef de service d'instrumentation qui nous a aidé énormément et qui nous a dirigé pendant la période de stage

D'une façon plus générale, Notre profonde gratitude et nos remerciements vont également à tout le personnel de FERTIAL de Annaba, car chacun d'entre eux a pu trouver un peu de temps pour nous aider durant la période de stage, mais aussi pour les informations et les documents qu'ils nous ont fournis.

Enfin nous tenons à remercier tous qui ont contribué de près ou loin à réaliser notre travail

# Dédicace

*A mes précieux parents qui m'ont toujours encouragé et à qui je dois tout dans ma vie*

*A mes très chères sœurs et frères*

*A toute la famille BOUZIT et AOUSSAT*

*A Semouna et Sara qui m'ont aidé à réaliser ce travail*

*A mes chers amis, Elws, Riad, Mus, Sofiane, Miteur, Walid, Mouad, Ramy*

*A tous ceux avec qui j'ai partagé ma vie d'étudiant*

*Je dédie ce travail.*

*Zinou.*

# Dédicace

*A mes chers parents qui font le maximum pour leur soutien et  
encouragement durant toute ma vie.*

*A mes très chères sœurs et frères pour leur sacrifices et soutiens*

*A toute la famille SAIDANI et SMATI*

*A mes chers amis Farouk, Anis, Bilel, Salah, Abdou, Raouf, Oussama*

*A mes frères d'arme Zinou, Elws, Ramy, Roussi, Mus, Miteur, Walid, Mouad,*

*A mes meilleures amies Kami, Malek, Afnan*

*A tous mes camarades de la promotion 2011*

*A ma famille et toutes les personnes que j'aime*

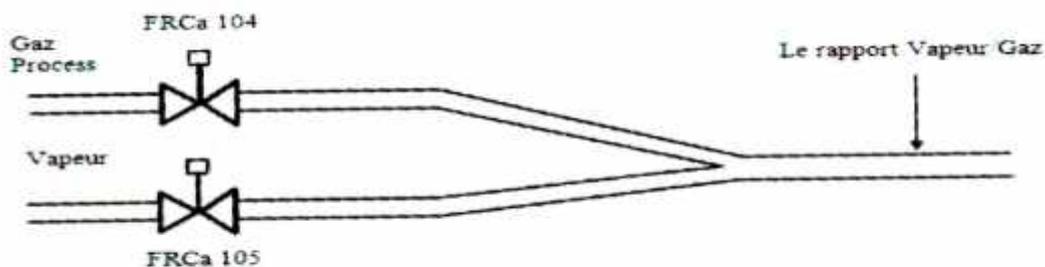
*Je dédie ce travail.*

*Samouna.*

## Introduction générale

Aujourd'hui nous confrontons un problème réel qui a un impact non seulement sur la protection des équipements mais aussi sur la production. Après l'étude détaillée d'un procédé d'ammoniac et l'analyse de toutes les boucles de régulation depuis la désulfuration jusqu'à la synthèse, on a cerné la partie la plus délicate qui peut conduire le Process au ShutDown (**Arrêt**). Cette boucle est située entre la désulfuration et le reforming primaire, après la compression et le chauffage du gaz naturel à 399 °C, ou le mélange avec de la vapeur est nécessaire pour faire un vapocraquage. Ce vapocraquage est réalisé dans un four qui contient des tubes catalytiques afin que la réaction de craquage soit réalisée.

Dans cette partie du processus, l'opérateur doit contrôler manuellement le rapport **VAPÉUR / GAZ** qui doit être égale à **3.5/1** et il peut être tolérable d'aller jusqu'à **4/1**, c'est un rapport fixé par le constructeur, on a remarqué que cette tâche est réalisée par une manipulation manuelle, l'opérateur contrôle visuellement le rapport, s'il constate une perturbation dans le débit de gaz ou celui de la vapeur il intervient sur les deux vannes de régulation dans le but de ramener le rapport à l'état désiré. **Figure(a)**.



**Figure(a)** : Schéma illustrant le mélange V/G (Feed mixture)

Ceci dit, si le rapport atteint **2.5/1** cette situation déclenche une alarme (LFA 123) qui effectue les directives suivantes :

- Fermeture de la vanne de sécurité **SP6** c'est-à-dire on n'aura pas de gaz naturel.
- Ouverture de la vanne **Mica 104** et dégagement du gaz naturel vers évent.

- Fermeture **SP3** : la vanne de l'air.
- Extinction des préchauffeurs du four **103W**
- Ouverture **Mica 102** : la vanne de la vapeur pour la compensation.
- Ouverture de la **Fica 101** qui représente l'anti pompage du compresseur.
- Retour du compresseur **101J** à la vitesse minimum.

Vu que le rapport est contrôlé en boucle ouverte, on peut s'attendre à chaque moment à un incident qui peut amener le process à des situations fâcheuses. Cependant la conduite de cet atelier, autrement dit, le contrôle des taux gaz et vapeur est manuelle. C'est un aléa dans le fonctionnement de ce processus de séparation et l'action de correction est brusque et peut conduire à la destruction des équipements et peut porter atteinte à la sécurité des agents et travailleurs. Les paramètres assignés sont fournis par le DCS, mais l'opérateur humain affiche ces points de consigne. Lors de la régulation classique le dépassement est élevé et le temps de réponse est trop important il va jusqu'à quelques dizaines de minutes (entre 5 à 15mn).

On veut d'une part palier à ce désavantage de temps réponse et dépassement et d'autre part, substituer l'apport humain par des boucles de conduites automatiques intelligentes.

L'intelligence Artificielle (IA) est une ramification de l'informatique qui a suscité beaucoup d'enthousiasmes, mais aussi des réactions de rejet et en conséquence, des polémiques, probablement à cause de l'usage d'un vocabulaire anthropomorphique qui a pu prêter à confusion.

Les automaticiens ont eu, en général, une attitude assez réservée et ce n'est que depuis peu de temps que cette discipline a été autorisée à figurer dans la boîte à outils de l'ingénieur à côté des moyens traditionnels, que sont la modélisation mathématique des procédés industriels et l'identification des modèles simplifiés, et l'informatique industrielle.

En réalité, si l'automatique fait appel à un arsenal de méthodes mathématiques parfois complexes, sa mise en œuvre nécessite aussi un grand savoir-faire, pour exploiter ces derniers, l'intelligence artificielle peut être une solution. Par ailleurs, compte tenu du grand nombre d'hypothèses simplificatrices, nécessaires à la conception des boucles de commande pour un procédé donné, d'une part. D'autre part des opérateurs humains doivent vérifier en permanence la validité des actions entreprises, c'est donc un humain qui est responsable de l'installation. Peut-on envisager de lui associer un «Partenaire» informatique ou encore de le

remplacer ? On est là encore devant un domaine potentiel d'application de l'intelligence artificielle à l'automatique.

## **La problématique**

La production pour l'industriel est importante mais la sécurité du matériel et de l'humain est capitale et elle a pris une partie majeure lors de la conception et l'automatisation des systèmes de production modernes. Cependant, il n'ya pas d'optimalité dans la conduite de séparation gaz par la vapeur. C'est un problème majeur qu'il faudra suppléer afin d'éviter tout désagrément dans le processus de désulfuration du dit gaz en question.

## **Solution projetée**

Cette étude va poursuivre deux objectifs à savoir

- le premier est l'automatisation de la tâche afin de suppléer l'action manuelle, vérifier les paramètres d'ajustements des régulateurs classiques existants, afin de déterminer les temps de réponses ;
- Proposition de remplacer la régulation existante par un régulateur flou à base de l'intelligence artificielle.

## **Réalisation Pratique**

- ✚ Afin de contrôler ce système, on doit chercher le modèle mathématique adéquat au processus de séparation gaz par la vapeur, autrement dit, la recherche de la fonction de transfert de chaque système afin de déterminer des paramètres des régulateurs PID ;
- ✚ Mettre au point et en œuvre un régulateur intelligent qui doit commander ces deux systèmes.

Le présent travail repose sur le développement des chapitres suivants :

- ❖ Chapitre I : Procédé de fabrication de l'ammoniac
- ❖ Chapitre II : Identification et modélisation des systèmes
- ❖ Chapitre III : La régulation et la logique floue « Fuzzy Control »
- ❖ Chapitre IV : Simulation

## Support Pour la réalisation de l'étude

Dans ce mémoire nous allons utiliser le logiciel **MATLAB** « *Matrix laboratory* » qui est un langage de programmation de quatrième génération émulé par un environnement de développement du même nom ; il est utilisé à des fins de calcul numérique, développé par la société The Math Works. MATLAB permet de :

- manipuler des matrices.
- afficher des courbes et des données.
- mettre en œuvre des algorithmes.
- créer des interfaces utilisateurs
- s'interfacer avec d'autres langages comme le C, C++, Java, et Fortran.

Les utilisateurs de MATLAB (environ un million en 2004) sont de différentes spécialités comme : l'ingénierie, les sciences et l'économie, dans un contexte aussi bien industriel que pour recherche. MATLAB peut être utilisé seul ou bien avec des toolbox « boîte à outils ».

Les toolbox utilisés dans ce manuscrit sont :

- **IDENT** : pour faire l'identification des systèmes avec différentes méthodes .
- **PIDTOOL** : pour fixer les paramètres des régulateurs classiques.
- **Fuzzy Logic controler** : pour synthétiser un régulateur flou.
- **Simulink** : pour la simulation.

# Chapitre I

## Procédé de fabrication de l'ammoniac

### I.1 Introduction

Par son tonnage produit dans le monde, l'ammoniac est l'un des plus importants produits chimiques de synthèse et se situe au deuxième rang derrière l'acide sulfurique. Les 87% de la production d'ammoniac est utilisée pour la fertilisation des sols et, de ce fait, la consommation d'ammoniac devrait suivre la croissance de la population de la planète. L'ammoniac est synthétisé par réaction catalytique entre l'azote de l'air et l'hydrogène provenant des hydrocarbures et de la vapeur d'eau. Les procédés de fabrication n'ont pas subi de grands changements lors des dix dernières années, l'objectif principal des améliorations apportées reste toujours la réduction de la consommation énergétique.

L'ammoniac est la principale source d'azote assimilable par les plantes et, de ce fait, est l'élément essentiel de constitution des engrais azotés. C'est la matière première pour la production de l'acide nitrique et des ammonitrates ainsi que de l'urée (cf. articles spécialisés dans ce traité). Plus de 85 % de la production d'ammoniac est destinée à l'industrie des engrais. Une autre grande fraction de la production est utilisée pour la fabrication de dérivés nitrés (explosifs). Les autres usages concernent les dérivés azotés de la chimie organique (amines, nitriles, etc.) [1].

Dans cette section nous allons présenter le procédé de l'ammoniac d'une manière générale et localiser la partie qui nous intéresse pour notre étude.

### I.2 Principe du Procédé de fabrication de l'ammoniac

Le procédé de fabrication de l'ammoniac utilisé à FERTIAL est calculé pour la production de 1000 tonnes par journée d'ammoniac liquide, en partant des matières premières

préliminaires qui comprennent le gaz naturel, la vapeur et l'air, ceci s'accomplit par la méthode de reforming KELLOG à haute pression et dans l'ordre suivant : **(figure I.1)**

### **I.2.1 Préparation de matières brutes d'alimentation**

- Compression et désulfuration du gaz naturel.
- Reforming primaire et secondaire.
- Conversion de CO en CO<sub>2</sub>.

### **I.2.2 Purification du gaz de synthèse**

- Extraction du gaz carbonique.
- Méthanisation.

### **I.2.3 Synthèse d'ammoniac**

- Compression du gaz de synthèse purifié.
- Synthèse et réfrigération de l'ammoniac.
- Stockage et distribution du produit.

Les schémas de circulation du procédé et les bilans matières, donnent une idée générale, indiquant dans les grandes lignes, des circuits d'écoulement dans l'installation et fournissent les détails sur les conditions de fonctionnement et la composition des matières. (Figure I.1).

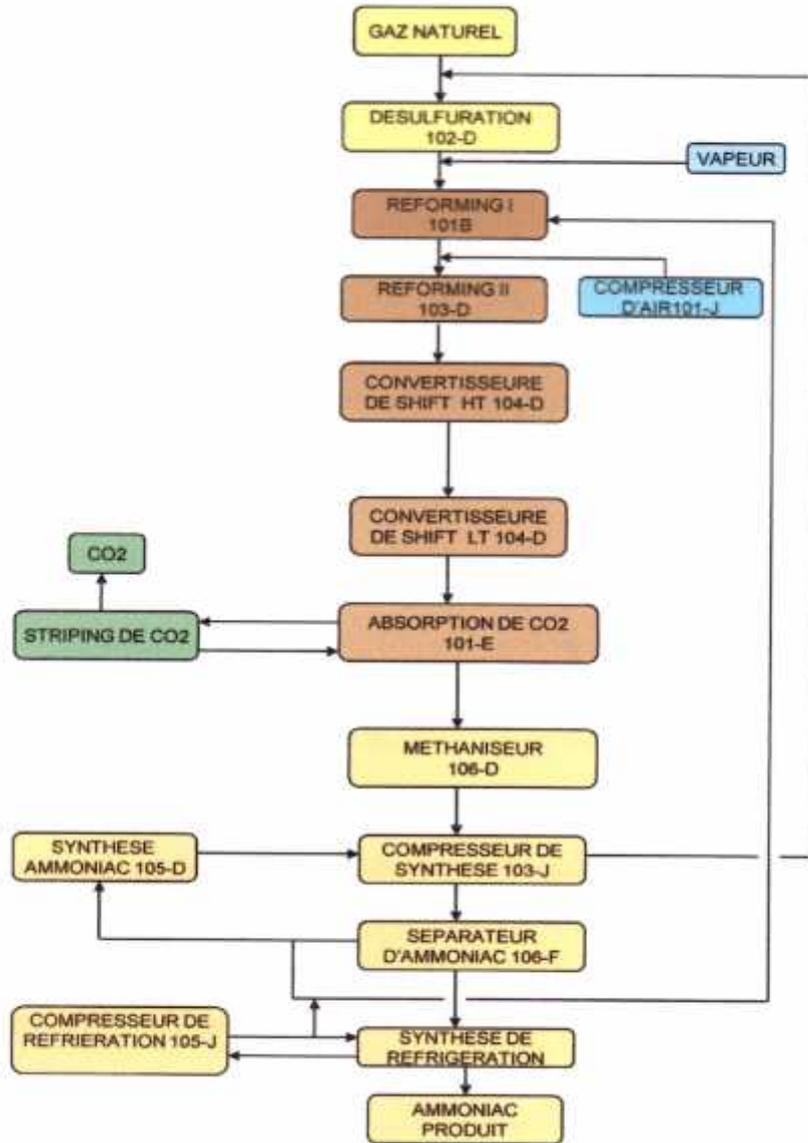


Figure I.1 : Schéma du principe de production de l'ammoniac

### I.3 Description du procédé de l'ammoniac

Le Process d'ammoniac est un ensemble de sections :

- a. Section de reforming.
  - opération de désulfuration.
  - opération de reforming de gaz avec de la vapeur.
  - opération de conversion de CO
- b. Section de décarbonatation (d'élimination de CO<sub>2</sub>)
  - opération de méthanisation.

- c. Opération de compression de gaz de synthèse.
- d. Section de synthèse et réfrigération d'ammoniac.
  - opération de récupération de gaz de purge.

L'unité est conçue pour produire jusqu'à 1000 Tn/jour d'ammoniac anhydre par un Process de reforming catalytique de gaz naturel avec vapeur, procédé de KELLOGG.

Le gaz naturel d'alimentation est désulfuré avant de l'introduire au reforming, pour éliminer des éventuelles traces de soufre. Le reforming catalytique du gaz avec vapeur est effectué dans deux étapes, où ses hydrocarbures ( $\text{CH}_4$ ) sont transformés principalement en  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$  et  $\text{CO}_2$ , reste un résiduel de méthane entre 8 et 12%. Dans la seconde étape de reforming on ajoute l'air à ce courant de gaz pour obtenir  $\text{N}_2$  afin d'avoir un rapport  $\text{H}_2/\text{N}_2$  adéquat dans le gaz de synthèse.

Le  $\text{CO}$  est éliminée du gaz en passant par la Conversion de  $\text{CO}$  dans deux étapes, la première à haute température et la seconde à basse température, en réduisant la teneur en  $\text{CO}$  à des valeurs inférieures à 0,5 %.

Le  $\text{CO}_2$  et la vapeur d'eau sont éliminés du gaz Process dans la décarbonatation, le  $\text{CO}_2$  par absorption avec la solution aMDEA, en réduisant sa teneur à des valeurs inférieures à 500 ppm tandis que la vapeur d'eau est éliminée par condensation et séparation. Une partie du  $\text{CO}_2$  éliminé du gaz est récupérée pour l'exporter à des unités avoisinantes pour la production du méthanol.

Le ( $\text{CO}$  et  $\text{CO}_2$ ) résiduels sont transformés en méthane ( $\text{CH}_4$ ) en passant par la Méthanisation catalytique avec  $\text{H}_2$ , en obtenant le gaz de synthèse purifier, ce gaz est comprimé, à partir d'une pression approximativement 25bar jusqu'à environ (110 à 140 bar), et envoyé vers la boucle de synthèse.

Dans un convertisseur catalytique approximativement à 137 bar et  $440^\circ \text{C}$ , on obtient du gaz ammoniac, qui par réfrigération, condensation et séparation, en envoyant à l'unité de stockage cryogénique de 20.000 T, de capacité, où il est distribué aux consommateurs internes et à l'expédition.

Pour éviter l'accumulation des gaz inertes tel que le méthane et l'argon dans la boucle de synthèse, on extrait les gaz de purge, par refroidissement. Dans une première phase l'ammoniac est éliminé et postérieurement récupérée et envoyé vers stockage, Le reste de gaz

qui contient environ 5% d'ammoniac maximal est envoyé vers le four pour l'utiliser comme fuel gaz. (Figure I.2).

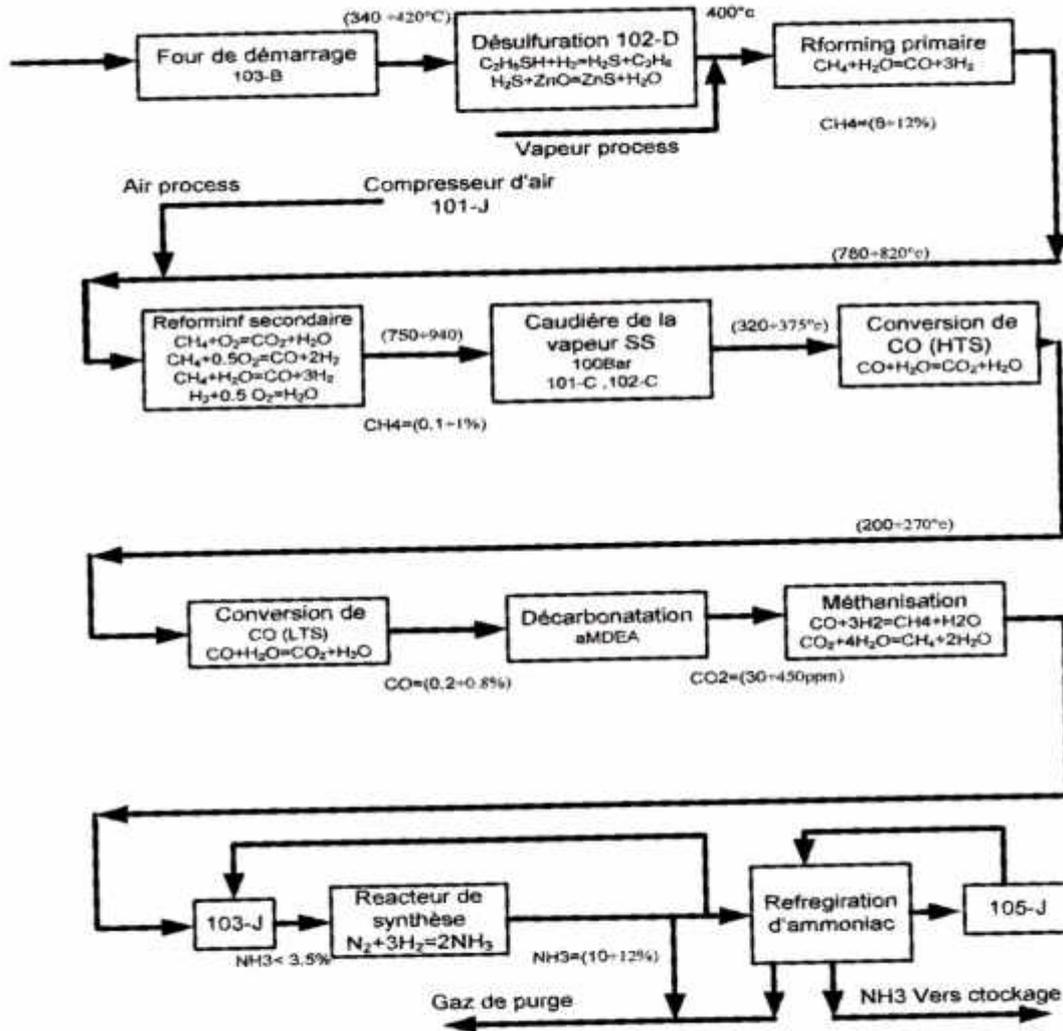


Figure I.2 Synoptique générale du Process

**Remarque :**

Dans notre étude on s'intéresse seulement à la partie après désulfuration et avant reforming c'est-à-dire qu'on va faire la description de la partie Désulfuration et reforming primaire afin de bien éclairer notre problématique.

## I.4 Description de désulfuration et le reforming

### I.4.1 Compression et désulfuration

Le gaz naturel arrivant avec une pression de 19 bars effectif et une température de 42 °C maximum, est comprimé dans le compresseur 101J jusqu'à 41 bars effectifs après avoir éliminé toute trace de liquide entraîné par le gaz (dans le séparateur 116F).

Le gaz est ensuite préchauffé jusqu'à 399 °C, puis envoyé au réacteur de désulfuration **102-D** qui est constitué de deux lits catalytiques fixes où s'effectuent les réactions de désulfuration» (Figure I.3)

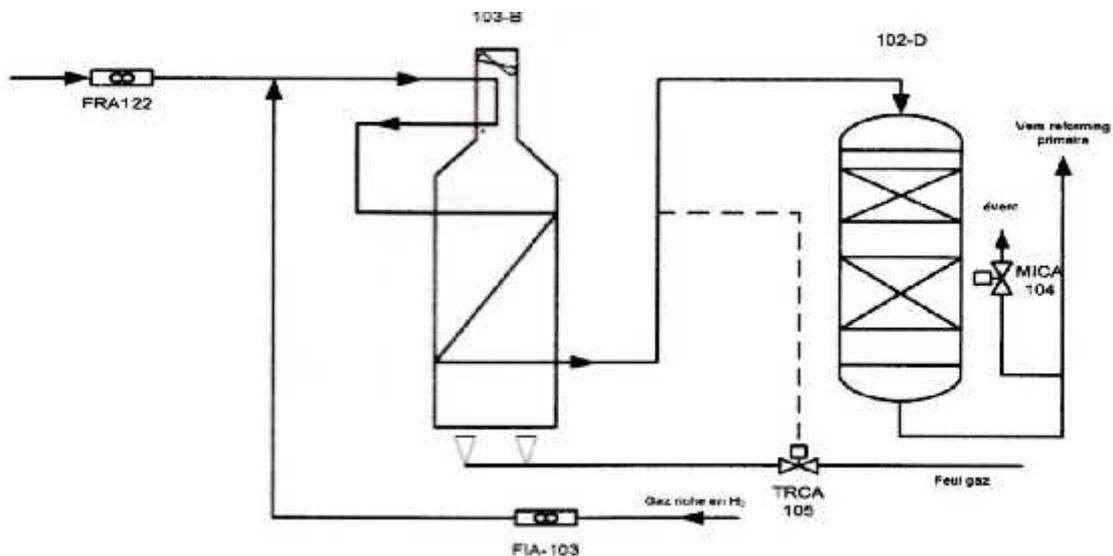


Figure I.3 : Désulfuration du gaz naturel

### I.4.2 Reforming Primaire et Secondaire

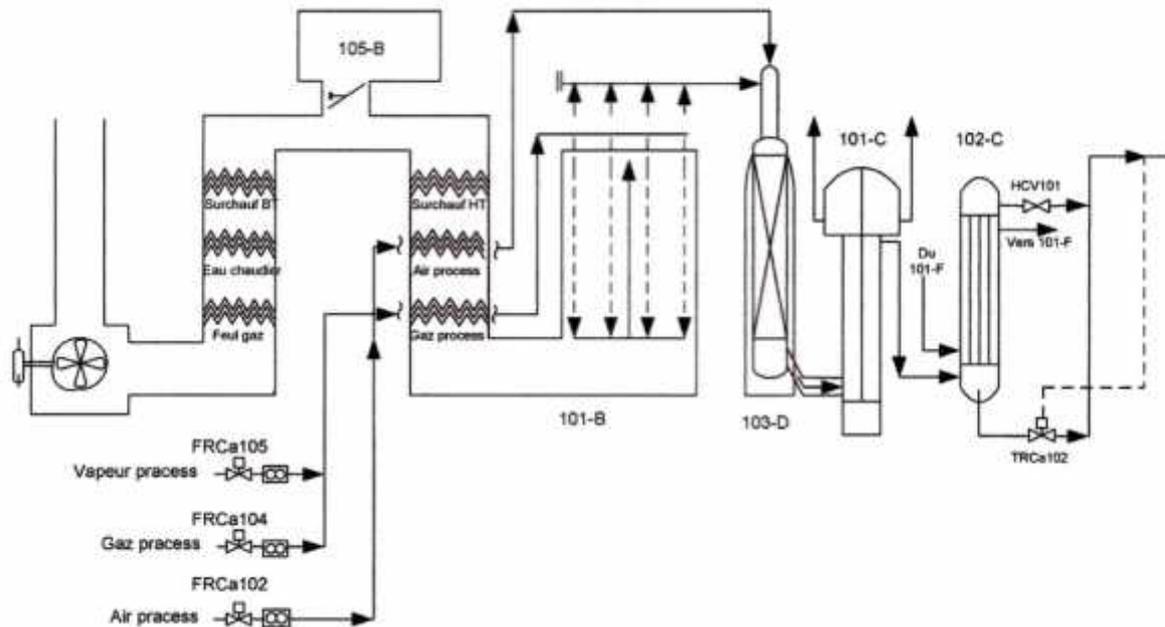
Le gaz désulfuré est mélangé avec la vapeur moyenne pression dans un rapport VIG=4/1. Puis préchauffé dans le faisceau chaud de la zone de convection pu les gaz de carneau jusqu'à 524°C avant d'être distribué dans les 378 tubes du four du reforming primaire, ces tubes sont remplis de catalyseur.

La réaction globale étant endothermique, 200 brûleurs sont prévus pour assurer l'apport d'énergie nécessaire à la réaction qui s'effectue à une température de 822 °C à la sortie des tubes le gaz partiellement reformé (9.58% en CH<sub>4</sub>) est collecté dans des collecteurs de

sortie ensuite remonte à travers les colonnes montantes pour arriver à la ligne de transfert avec une température de 847°C, puis le gaz est envoyé dans le réacteur du reforming secondaire.

Dans le reforming secondaire, le gaz entrant avec une température d'environ 822°C et contenant les 9.58% de CH<sub>4</sub> non converti, va subir un reforming plus poussé dans le réacteur 103D. L'air du procédé qui provient du compresseur (101J) et la vapeur supplémentaire sont préchauffés à 468 °C dans la section de convection du four de reforming primaire et entrant dans la chambre de combustion de (103D), où ils se combinent avec le gaz, et permettent aux réactions de se produire en moyennant deux lits fixes de catalyseurs.

Les réactions produisent un complément de CO, CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>, l'introduction de l'azote de l'air permet en outre d'obtenir le rapport H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> nécessaire pour le gaz de synthèse. L'effluent contenant 0.33% de CH<sub>4</sub> est refroidi dans deux chaudières de récupération 101C et 102C jusqu'à 371 °C avant de passer dans la section conversion. (**Figure I.4**)



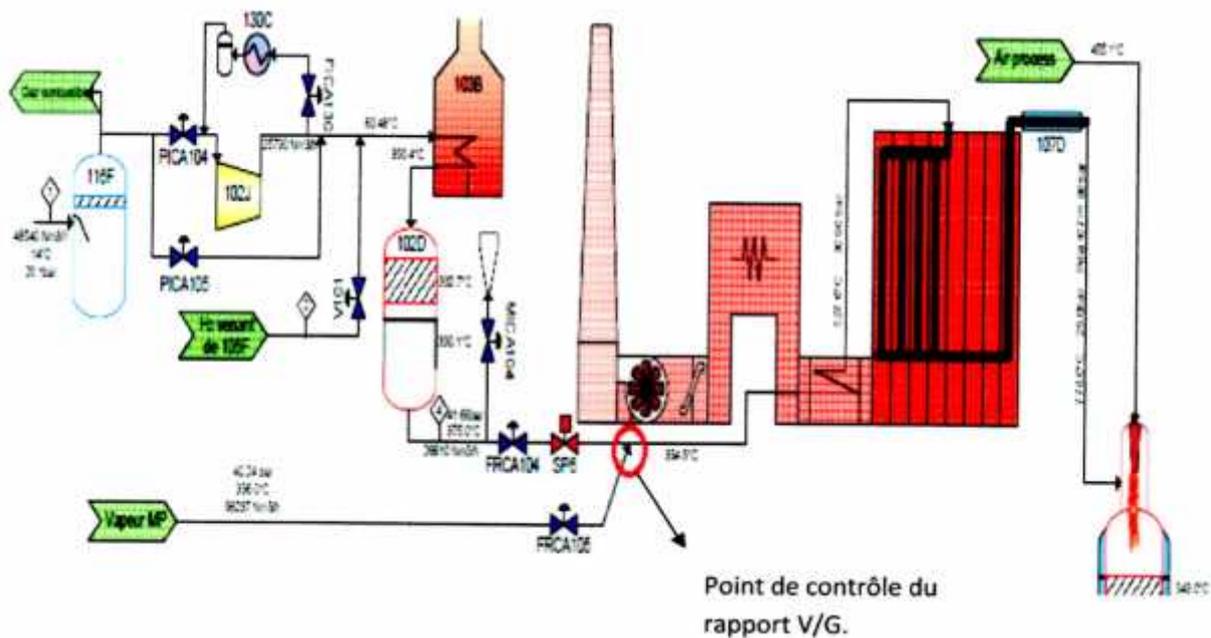
**Figure I.4** : Reforming primaire et secondaire.

## I.5 Le Rapport Vapeur/Gaz

Selon le calcul du constructeur **KELLOG** le débit de vapeur doit être supérieur trois fois et demie au débit du gaz naturel désulfuré, sachant tous pour avoir une molécule

d'ammoniac on a besoin de trois molécules d'hydrogène et une molécule d'azote mais aussi pour éviter d'autre problèmes ,si on a un débit de gaz élevé on auras une cokéfaction c'est-à-dire bouchage du catalyseur par le carbone donc il y'auras une augmentation de température et aussi un rendement faible .

Donc l'opérateur doit contrôler en continue la partie sélectionné dans la **Figure I.5** et faire la régulation manuellement en agissant sur les deux vannes régulatrices du gaz et de la vapeur.



**Figure I.5 :** Point du contrôle le rapport G/V.

## I.6 Conclusion

Le procédé de l' ammoniac fait partie des procédés chimique ou pétrochimique les plus compliqué, dans cette section on ne voulait pas le détaillé pour ne pas dévier de notre but d'étude qui est la régulation du mélange gaz/vapeur qui va être injecté dans le four 101-B, donc un décalage de ce paramètre va conduire le procédé à l'arrêt et aussi le rejet du catalyseur utilisé dans ce four (Oxyde de nickel).

# Chapitre II

## Identification et modélisation des systèmes

### II.1. Introduction

Afin de contrôler et commander un système quelconque on a besoin d'une abstraction mathématique, pour ce but on fait appelle à la modélisation qui représente un ensemble de procédures permettant d'obtenir un modèle.

Il est difficile de donner une représentation mathématique à un système industriel à cause de sa complexité, donc on considère que le système est une boîte noire pour déterminer son modèle mathématique sur la base des observations expérimentales entrées/sorties. Le traitement mathématique des réponses graphiques du système est appelé **Identification**. Le modèle obtenu est dit de conduite ou de représentation. [2]

L'identification d'un système consiste à rechercher un modèle mathématique reproduisant le comportement dynamique du système à partir de données expérimentales et de connaissances disponibles « a priori ». Ce modèle macroscopique est caractérisé par une structure et par des paramètres qu'il convient de choisir et d'ajuster, afin de reproduire au mieux le comportement entrée-sortie du système. Traditionnellement, les méthodes d'identification de systèmes sont employées pour déterminer des modèles permettant la synthèse de lois de commande.

Ce domaine d'utilisation conventionnel n'est toutefois pas le seul et les méthodes sont aussi utilisées pour :

- L'estimation de paramètres physiques non directement mesurables.
- Le diagnostic de systèmes à base de modèle.
- La simulation, utilisée à des fins de conception, de prévision ou de formation.
- L'interprétation d'essais. Bien que les méthodes soient essentiellement développées par les automaticiens et les mathématiciens appliqués, elles peuvent être utilisées dans des domaines très variés allant des processus de fabrication à l'économétrie, en passant par la biologie, les moyens de transport ou les processus environnementaux.[3]

Dans cette troisième partie nous donnerons les notions de base de l'identification des systèmes afin d'obtenir un modèle mathématique (**Fonction de transfert**), dans le but du contrôle et la commande du système.

## II.2. Principe de la modélisation

La modélisation mathématique est une représentation qui traduit le fonctionnement d'un système à travers des relations mathématiques liant les différents variables du système. Elle peut se faire en deux façons différentes :

- a- **Modélisation théorique** : la représentation du système est faite à partir des lois (physique. chimique. biologique. etc..) réagissant le fonctionnement du système. Il est donc nécessaire d'avoir une connaissance complète du système. Cette modélisation peut présenter des difficultés lorsqu'elle est appliquée des systèmes complexes. Les modèles de ce type sont appelés modèles de connaissance ou modèles de type (**Boite blanche**) .
- b- **Modélisation expérimentale ou identification** : la représentation est faite sur les bases de données recueillies sur le système et modéliser. Cette représentation ne requiert que quelques connaissances a priori. Les modèles de ce type sont appelés modèles expérimentaux ou de type (**Boite noire**)

Ils sont représentés en général sous forme d'une relation de type <<Entrées/Sorties>>. Dans certains cas, les connaissances a priori sur le système permettant de fixer la structure du modèle. La combinaison de ces connaissances a priori et de données expérimentales recueillies permet d'aboutir à une représentation du système communément appelé modèle de type (**Boite grise**).

L'établissement de la modélisation expérimentale est une procédure itérative comportant cinq phases :

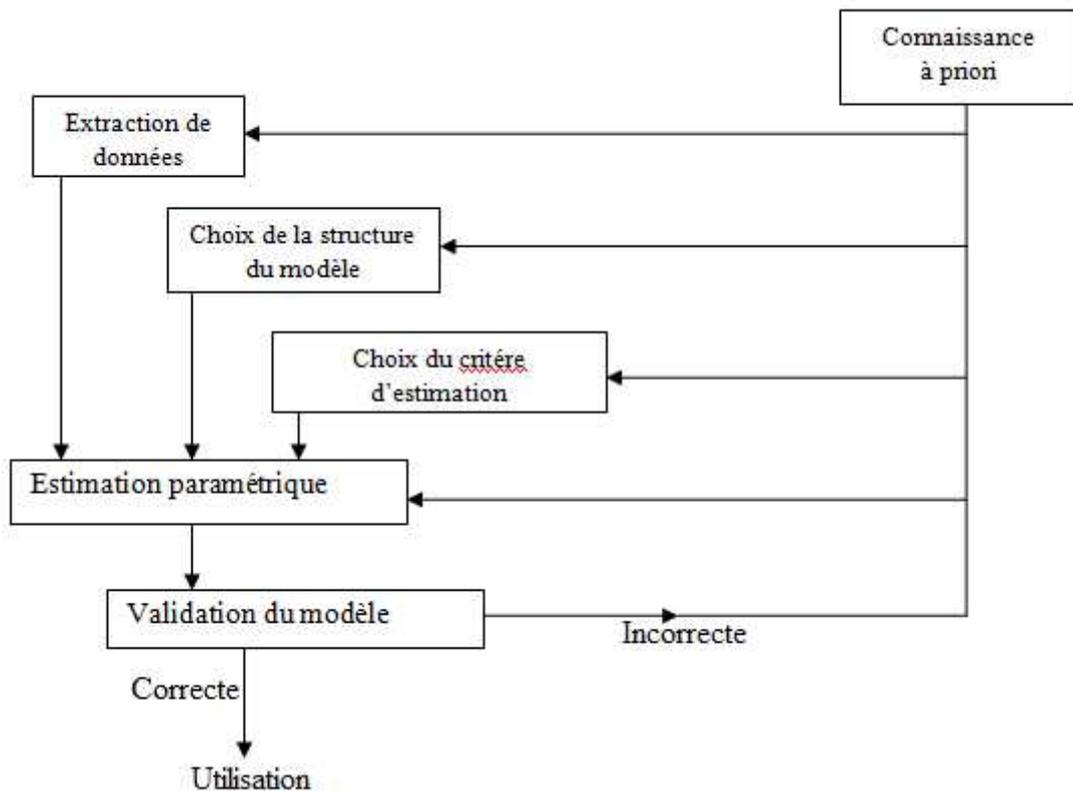
- **attraction de données** : durant cette phase, des mesures sont effectuées sur les variables sensées caractériser le système, ces variables peuvent être des variables externes qui agissent sur le système, des variables internes qui traduisent l'état du système, ou la réponse du système. Il existe souvent des perturbations non mesurables qui agissent sur le système rendant plus difficile sa modélisation.

- **Choix de la structure du modèle :** il s'agit de définir d'une façon formelle la relation expliquant le fonctionnement du système. Cette relation correspond à une famille de fonctions mathématiques dont une seule correspond au modèle recherché.

- **Choix critère d'estimation paramétrique:** c'est le choix de la fonction objectif (fonction cout) dont l'optimisation (minimisation) permet de déterminer la structure du modèle de façon unique. Ce critère est fonction de l'écart entre la sortie du système et celle du modèle.

- **Estimation paramétrique:** elle s'agit alors de trouver la valeur des paramètres permettant la satisfaction d'un critère de performance donnée (Optimisation de la fonction objectif).

- **Validation du modèle :** c'est une procédure qui permet d'évaluer l'exactitude (ou la fidélité) du modèle. Pendant cette phase, le modèle est testé avec des données non utilisées pendant la phase d'identification. [4]



**Figure II.1 :** Procédure d'identification d'un système

### II.3. Modèle d'identification paramétrique

Le principe de cette méthode est de soumettre le modèle aux mêmes entrées que le système et de réaliser un réglage des paramètres en minimisant un critère de performance donné. (Figure II.2)

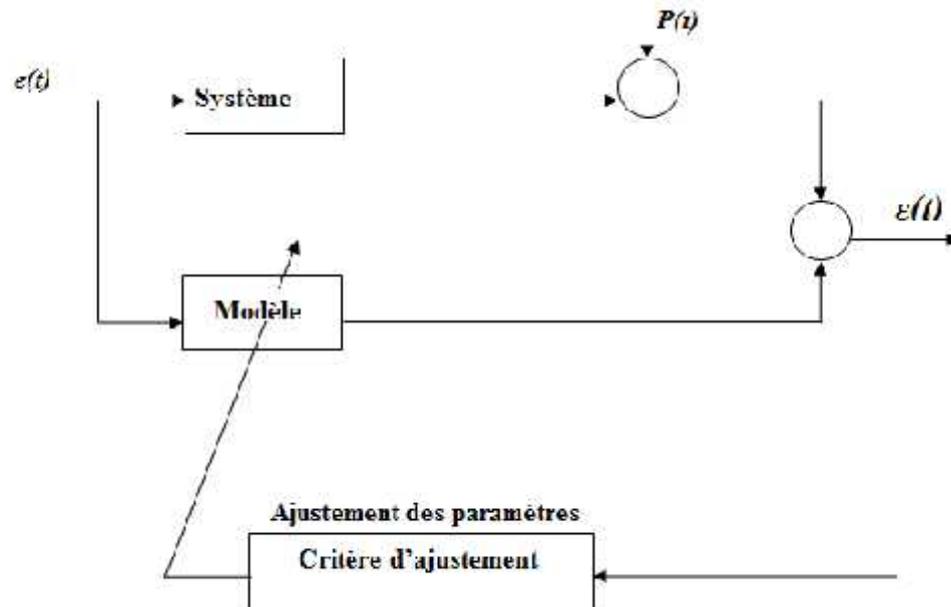
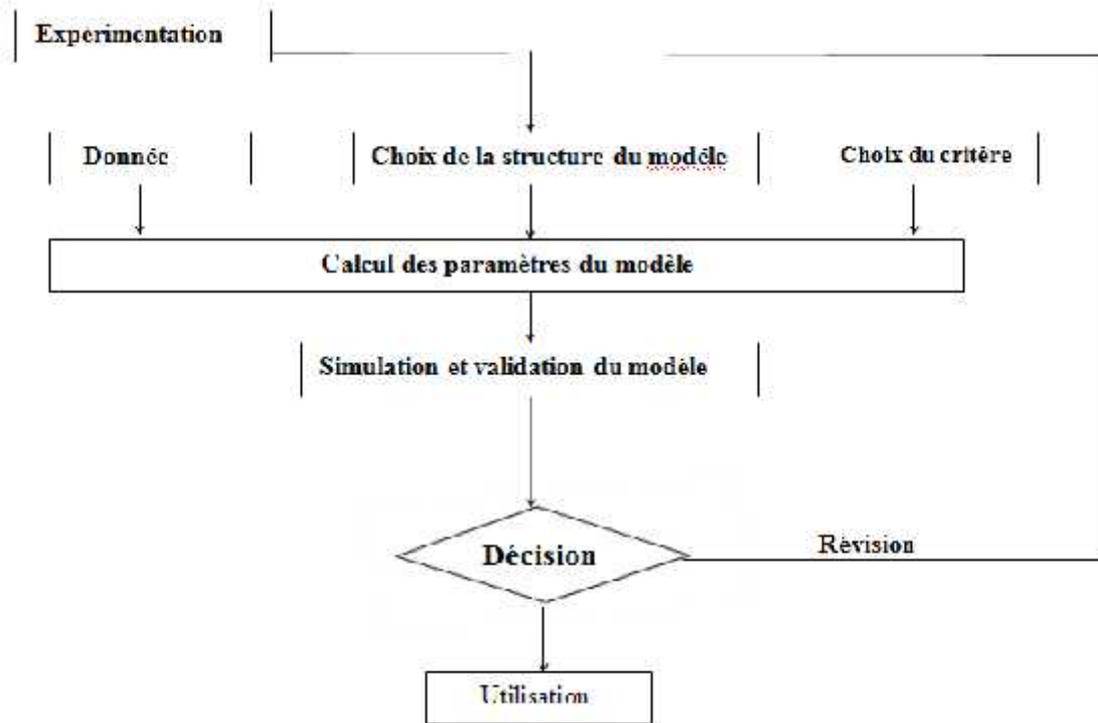


Figure II.2 : Schéma de principe d'identification paramétrique

#### II.3.1. Procédure pratique d'Identification paramétrique

L'élaboration d'une procédure pratique d'identification en vue de la commande des systèmes réels passe par un ensemble d'étapes qui doivent être répétées jusqu'à l'obtention de résultats satisfaisants [5] :

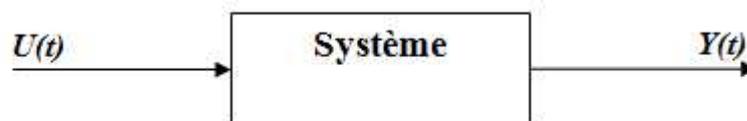
1. Expérimentation
2. Choix d'une structure du modèle d'identification.
3. Choix d'un critère d'ajustement.
4. Choix d'un algorithme d'estimation.
5. Validation du modèle obtenu.



**Figure II.3** : Schéma de principe de la procédure pratique d'identification paramétrique.

## II.4. Model Expérimentation

L'expérimentation est l'ensemble des essais effectués sur le système réel en vue de mesurer son signal de sortie. Cependant pour des raisons expérimentales, le signal d'entrée doit exciter tous les modes du système. Afin d'aboutir à des résultats satisfaisant, l'expérimentation nécessite un ensemble de choix qui sont primordiaux, tels que la période d'échantillonnage et le nombre d'échantillons. La configuration générale d'entrée / sortie d'un système peut être représentée par le schéma suivant : [6]



**Figure II.4** Présentation d'un système

$U(t)$  : Entrée du système.

$Y(t)$  : Sortie du système.

#### II.4.1. Critère d'ajustement

Le Critère d'ajustement le plus utilisé est celui qui détermine les estimés de  $G$  en minimisant le critère quadratique suivant :

$$J(t) = \sum_{t-1}^N e^2 (t)$$

Avec :  $e(t)$  erreur de prédiction.

#### II.4.2. Algorithme d'estimation

L'algorithme d'estimation des paramètres du modèle a été développé, à partir des mesures d'entrée/sorties données par un algorithme d'acquisition dans le but d'élaborer des modèles, en se basant sur la méthode des moindres carrés simple. L'algorithme d'estimation permet en outre la simulation du modèle et du système en vue d'une comparaison et d'une validation.

#### II.4.3. Validation du modèle

A chaque choix du modèle, de la structure et des paramètres, un calcul et une simulation du modèle seront réalisés. Le modèle qui sera adopté est celui qui répond aux critères suivants :

- La sortie du modèle doit être la plus proche possible de celle du système réel.
- L'erreur de prédiction finale doit être la plus faible possible.

Si ces critères ne sont pas vérifiés, on procède à une révision c'est-à-dire un autre choix de structure et de paramètres jusqu'à avoir des résultats satisfaisants.

### II.5. Structure Auto Régressive à entrée exogène (ARX) :

Le modèle-hypothèse ARX (Autorégressif a variable exogène) est un modèle entrée-sortie de la forme :

$$\hat{y} + a_1 y(k-1) + \dots + a_n y(k-n) = b_1 u(k-1) + \dots + b_n u(k-n) + e(k)$$

Où la grandeur  $y$  est la variable de sortie du système,  $u$  les grandeurs de la variable d'entrée et  $e$  généralement appelé bruit de boucle ou bruit d'état dans le cas ARX. [7]

On représente souvent ce modèle sous une forme plus compacte :

$$A(q)y(k) = B(q)u(k) + e(k)$$

Avec :

$$A(q) = 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_n q^{-n}$$

$$B(q) = 1 + b_1 q^{-1} + \dots + b_n q^{-n}$$

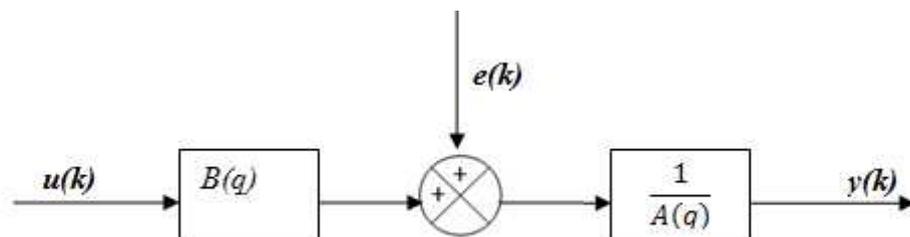


Figure II.5 Modèle ARX

### II.6. Structure Auto Régressive à Moyenne Ajustée et à entrée eXogène(ARMAX)

Le modèle-hypothèse ARMAX est un modèle entrée-sortie de la forme : [7]

$$\begin{aligned} \hat{y} + a_1 y(k-1) + \dots + a_n y(k-n) \\ = b_1 u(k-1) + \dots + b_n u(k-n) + e(k) + C_1 e(k-1) + \dots + C_n e(k-n) \end{aligned}$$

Sous une forme plus compacte :

$$A(q)y(k) = B(q)u(k) + C(q) e(k)$$

Avec :

$$A(q) = 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_n q^{-n}$$

$$B(q) = b_1 q^{-1} + \dots + b_n q^{-n}$$

$$C(q) = 1 + c_1 q^{-1} + \dots + c_n q^{-n}$$

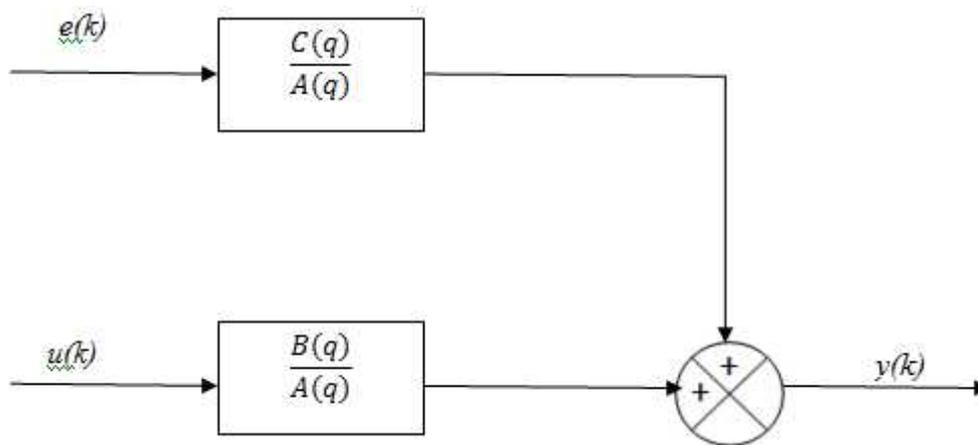


Figure II.6 : Modèle ARMAX

## II.7. Conclusion

Comme on a vu dans ce deuxième chapitre, l'identification est l'une des phases les plus importants dans l'automatisation et le contrôle de processus industriels, ceci dit partant du fait qu'on ne dispose pas un modèle mathématique ou de la fonction de transfert du procédé en question (**vapeur/gaz**) on a recours à des réalisations pratiques (essais expérimentaux) et on a recensé les données qui décrivent qui fidèlement le système, on fait appel à l'identification et modèle mathématique pour illustrer la façon dont se déroule le procédé de craquage du gaz par la vapeur .

## Chapitre III

# La régulation et logique floue « Fuzzy Control »

### III.1. Introduction

A l'époque de l'automatisation, la notion de régulation suggère en langage courant des Propriétés telles que la fiabilité fonctionnelle, la précision élevée, la qualité particulière ou le confort accru. Bien que le principe de la régulation trouve un champ d'application toujours plus étendu et diversifié dans les systèmes techniques de toute sorte, il ne constitue pas une invention technique. Il s'agit plutôt d'un phénomène naturel qui permet de maintenir automatiquement un état stable en dépit de l'action des perturbations externes, de nombreux processus biologiques et écologiques ainsi que sociologiques et économiques fonctionnent d'après ce principe de régulation.

Parallèlement au développement pratique de la technique de régulation, l'étude théorique de cette technique a connu un développement considérable.

Depuis les débuts de l'exploitation technique du principe de régulation, en passant par les premières descriptions mathématiques de processus de régulation au début du 20ème siècle, la commande automatique s'affirme aujourd'hui comme une branche autonome majeure des sciences de l'ingénieur.

### III.2. Généralité sur les régulations

La régulation est l'action de réagir en temps réel pour minimiser l'écart entre une grandeur mesurée et une consigne en agissant sur une grandeur de commande quelles que soient les perturbations qui peuvent survenir.

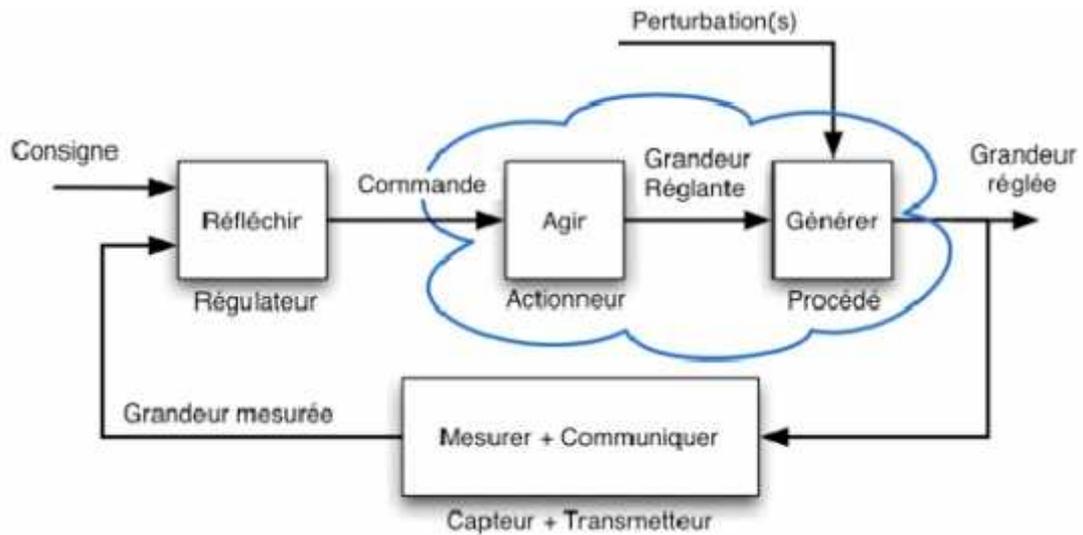
La grandeur mesurée est la grandeur physique que l'on désire contrôler, elle donne son nom à la régulation. La consigne est la valeur que doit prendre la grandeur à réguler.

#### III.2.1. Principe de la régulation

Pour réguler un système physique, il faut : [8]

- **Mesurer** la grandeur à régler avec un capteur.

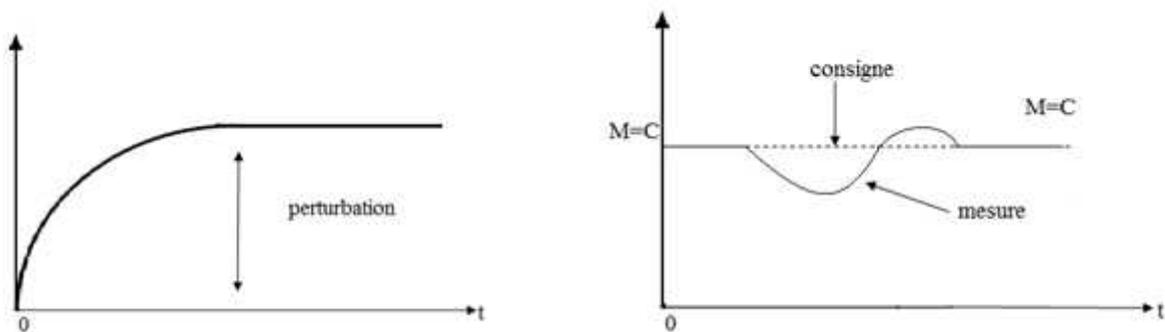
- **Réfléchir** sur l'attitude à suivre : c'est la fonction du régulateur, le régulateur compare la grandeur à régler avec la consigne et élabore le signal de commande.
- **Agir** sur la grandeur réglant par l'intermédiaire d'un organe de réglage. On peut représenter une régulation de la manière suivante :



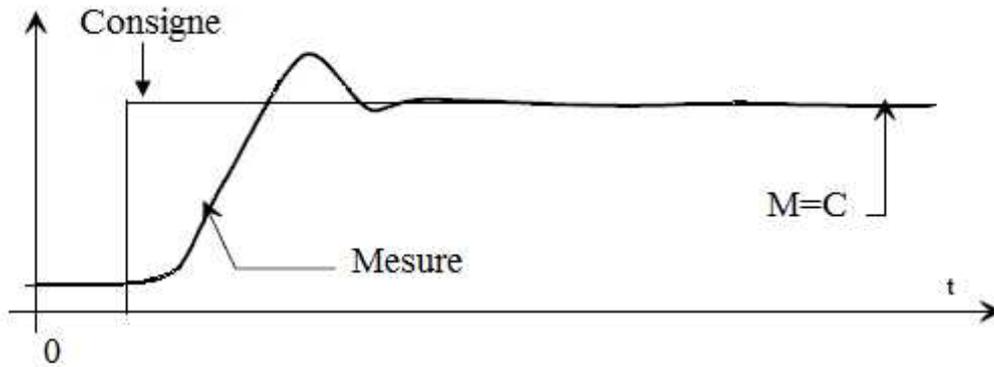
**Figure III.1** Schéma de principe de fonctionnement d'une régulation

### III.2.2. Régulation ou Asservissement

Dans une régulation, on s'attachera à maintenir constante la grandeur à régler d'un système soumis à des perturbations. Dans un asservissement, la grandeur régler devra suivre rapidement les variations de la consigne.



**Figure III.2** : Comportement en régulation



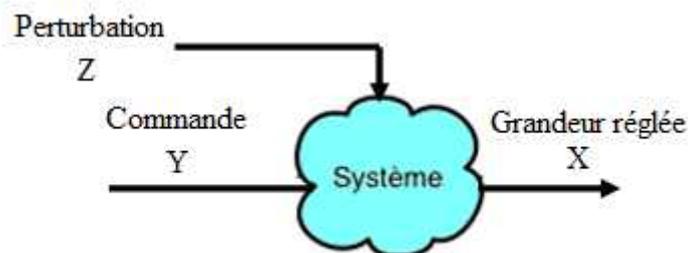
**Figure III.3 :** Comportement en asservissement

### III.3. La régulation en boucle ouverte et en boucle fermé [9]

Une régulation en boucle ouverte ne peut être mise en œuvre que si l'on connaît la loi régissant le fonctionnement du processus (autrement dit, il faut connaître la corrélation entre la valeur mesurée et la grandeur à régler.) elle permet d'anticiper les phénomènes et d'obtenir des temps de réponse très courts.

La régulation en boucle ouverte est la seule solution envisageable lorsqu'il n'y a pas de contrôle finale possible. Au niveau des inconvénients, elle impose de connaître la loi régissant le fonctionnement du processus, Autre inconvénient sérieux, il n'y a aucun moyen de contrôle, à plus forte raison de compenser, les erreurs, les dérives, les accidents qui peuvent intervenir à l'intérieur de la boucle, autrement dit, il n'y a pas de précision ou surtout de fidélité qui dépendent de la qualité intrinsèque des composants.

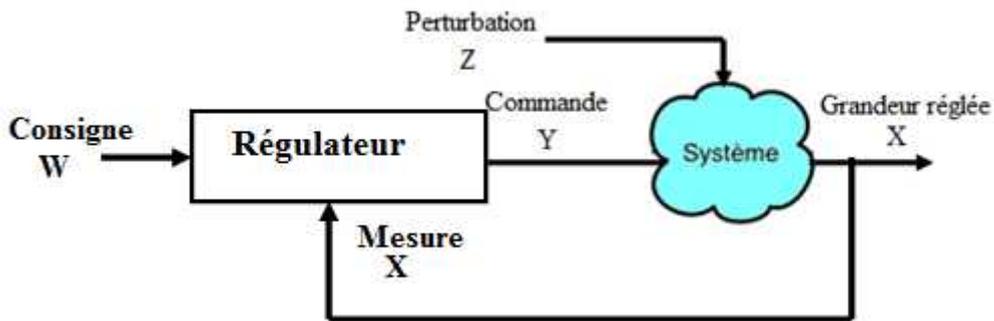
Enfin, la régulation en boucle ouverte ne compense pas les facteurs perturbateurs. (Figure III.4)



**Figure III.4 :** Boucle ouverte

La régulation en boucle fermée, est celle où l'action sur le système commandé dépend de la mesure de la grandeur commandée. En régulation en boucle fermée, il n'est pas nécessaire de connaître avec précision les lois, les composants de la boucle, notamment du processus, bien que la connaissance des allures statistique et dynamique des divers phénomènes rencontrés soit utile pour le choix des composants.

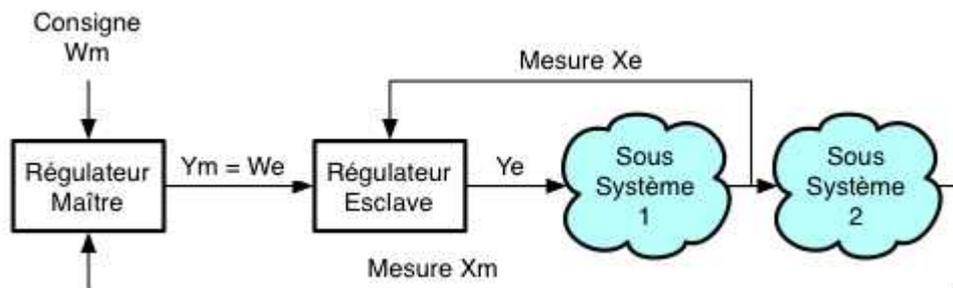
Parmi les inconvénients d'une régulation en boucle fermée, il faut citer le fait que la précision et la fidélité de la régulation dépend de la fidélité et de la précision sur les valeurs mesurée et sur la consigne. (**Figure III.5**)



**Figure III.5** : Boucle fermé

### III.4. Régulation en cascade

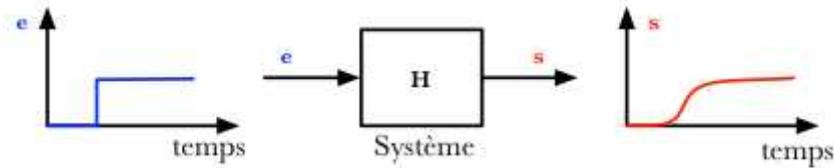
L'objectif d'une régulation en cascade est de minimiser les effets d'une ou de plusieurs grandeurs perturbation qui agissent soit sur la variable à réguler, soit sur une grandeur intermédiaire se trouvant en amont de la variable à régler.



**Figure III.6** : Boucle en Cascade

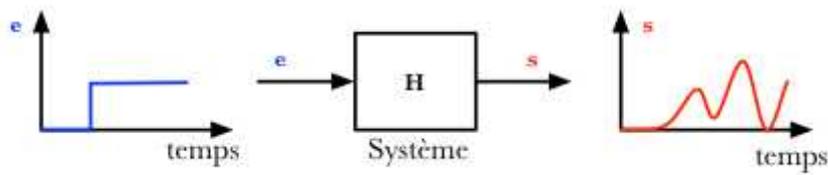
### III.5. La stabilité du procédé

Un procédé est dit naturellement stable si à une variation finie de la grandeur réglant  $E$  correspond une variation finie de la grandeur réglée  $S$ . (**Figure III.7**) [10]



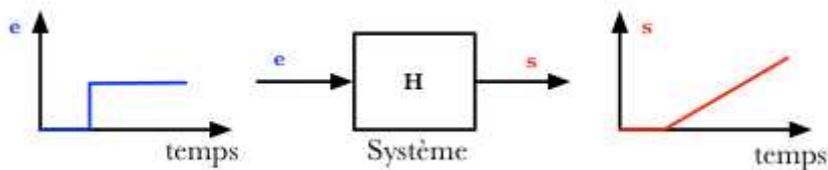
**Figure III.7** : Procédé stable

Un procédé est dit naturellement instable si une variation finie de la grandeur à réguler  $E$  correspond une variation continue de la grandeur réglée  $S$ . (**Figure III.8**)



**Figure III.8** : Procédé instable

**Remarque :** On dit qu'un procédé est de type intégrateur, si pour une entrée  $E$  constante, la sortie  $S$  est une droite croissante. (**Figure III.9**)



**Figure III.9** : Procédé intégrateur

### III.6. Régime transitoire / Régime permanent

On dit que le système fonctionne en régime permanent, si l'on peut décrire son comportement de manière simple. Dans le cas contraire, on parle de régime transitoire. Pour passer d'un régime permanent à un autre, le système passe par un régime transitoire. (**Figure III.10**) [10]

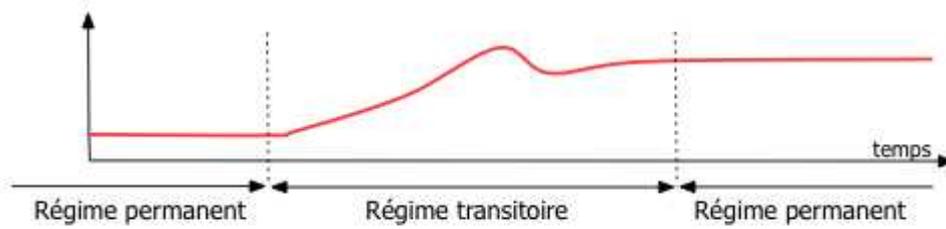


Figure III.10 : Régime permanent et régime transitoire

### III.7. Caractéristique statique et dynamique d'un procédé

#### III.7.1. Caractéristiques statiques d'un procédé [10]

La Caractéristique statique est la courbe représentative de la grandeur de sortie S en Fonction de la grandeur d'entrée E : [8]

$$S=f(E)$$

Remarque : On ne peut tracer la caractéristique statique d'un système stable.

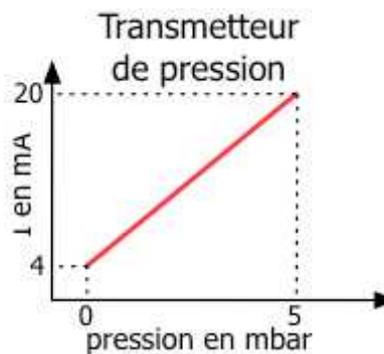


Figure III.11 : Caractéristiques statiques

#### III.7.1.1. Gain statique

Si le système est naturellement stable, le gain statique G est le rapport entre la variation de la grandeur d'entrée E et la variation de la grandeur de sortie S.

### III.7.1.2. Erreur statique

Si le système est stable, l'erreur statique « e » est la différence entre la consigne « w » et la mesure de la valeur réglée X.

### III.7.1.3. Linéarité, non-linéarité d'un système

Un système est linéaire si on peut décrire son fonctionnement à l'aide d'équations mathématiques linéaires.

## III.7.2. Caractéristiques dynamiques d'un procédé

### III.7.2.1. Temps de réponse

C'est l'aptitude du système à suivre les variations de la grandeur réglante, dans le cas d'un échelon de la grandeur réglante, la croissance de la grandeur réglée définit les différents temps de réponse. Dans l'exemple de la figure III.12, on mesure le temps de réponse à 10 qui est égal à  $(T1 - T0)$ . [10]

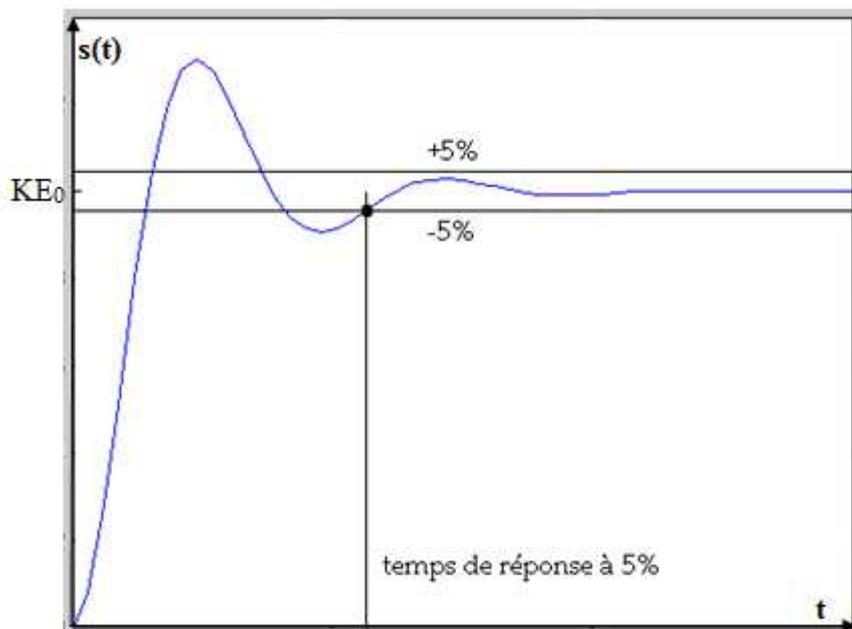


Figure III.12 : Réponse indicielle

### **III.7.2.2. Dépassement**

Le premier dépassement permet de qualifier la stabilité d'un système. Plus celui-ci sera important, plus le système sera proche de l'instabilité. Dans certaine régulation, aucun dépassement n'est toléré. Dans la réponse indicielle **figure III.12** le premier dépassement est de 20%. [10]

## **III.8. Le principe des régulateur PID [9]**

### **III.8.1. L'action proportionnelle :**

L'action proportionnelle est à la base de la constitution de la boucle, ou elle se trouve quasiment toujours présente. Elle se traduit par une variation du signal U du régulateur proportionnelle à l'écart mesure-consigne constaté.

La variation qui accompagne immédiatement l'apparition d'un écart face à une variation brutale de la consigne ou d'une grandeur perturbatrice, elle va dans une boucle bien conçue ramener le système dans un nouvel état d'équilibre.

### **III.8.2. L'action intégrale :**

L'action intégrale permet d'obtenir un signal régulateur constamment supérieur au signal initial, et a écart nul. Elle l'évolue tant que nullité n'est atteinte, il y a en quelque sorte un effet d'accumulation. Le problème est que l'écart redevient nul, le signal U peut atteindre une valeur trop élevée pour qu'il y ait équilibre. Donc la grandeur à réglée va dépasser sa consigne, l'écart devient négatif, U baisse donc la sortie va ralentir sa montée puis baisser, entraînant l'apparition d'oscillations parfois longues à s'amortir.

Ce comportement du passé dans le signal de commande peut s'avérer très gênant, notamment lors d'incident entraînant l'impossibilité d'atteindre la valeur demandée pendant un certain temps.

La plupart des régulateurs possèdent aujourd'hui un mécanisme de neutralisation de cette action intégrale, ou/et ne la mettent en oeuvre que lorsque l'écart se trouve dans une fourchette donnée, pour minimiser ces inconvénient.

### III.8.3. L'action dérivée :

L'action dérivée toujours en complément des autres (P et I), elle réagit proportionnellement à la vitesse de variation de l'écart mathématiquement par sa dérivée donc accélérer la réponse. Elle joue aussi un rôle stabilisateur, contrairement à l'action intégrale. Elle s'accompagne d'un effet néfaste :

- Un signal U prenant une valeur extrême en cas de variation brusque de l'écart (dérivée étant théoriquement infinie).
- Là encore, les constructeurs ont réalisé des améliorations : dérivée n'agissant que sur la mesure (qui ne peut varier de façon discontinue), filtrage du signal dérivé.

### III.9. Régulateur à action proportionnelle intégral et dérivée

L'entrée du bloc proportionnel intégral et dérivée reçoit l'écart (Mesure Consigne).voir (Figure III.13) [8]

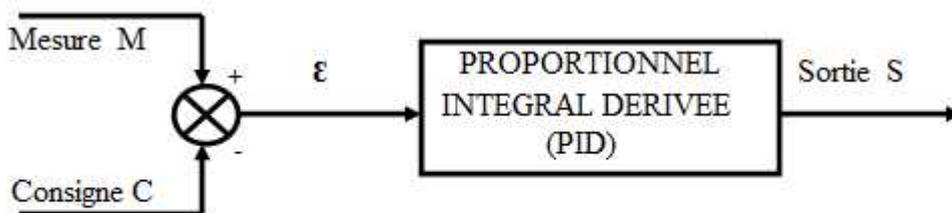


Figure III.13 : Régulateur PID

La sortie S du régulateur proportionnel intégral et dérivée direct est donnée par la relation :

$$S = G(M - C) + \frac{G}{T_i} \int_0^t (M - C) dt + GT_d \frac{d(M - C)}{dt} + S_0$$

La sortie S du régulateur proportionnel et intégral et dérivée inverse est donnée par la relation :

$$S = G(C - M) + \frac{G}{T_i} \int_0^t (C - M) dt + GT_d \frac{\partial (C - M)}{\partial t} + S_0$$

Où :

S = Sortie du régulateur.

S<sub>0</sub> = Constante préfixée généralement à 50% du signal de sortie, appelée centrage de la bande proportionnelle.

G = Gain du régulateur.

T = Temps d'intégral.

T<sub>d</sub> = Temps de dérivée.

### III.10. Résumé des actions des corrections P, I et D :

Le tableau 4.1 résume l'effet des trois actions et donne leurs effets sur le système.

Correction	Paramètre régulateur	Unité	Influence	Pompage
<b>Proportionnelle</b>	BP	% de pleine échelle	Diminue l'erreur statique	Trop petit
<b>Intégrale</b>	T <sub>i</sub> ou 1/T <sub>i</sub>	s, mn ou répétition par minute	Annule l'erreur statique Annule l'erreur statique	Trop petit Trop grand
<b>Dérivée</b>	T <sub>d</sub>	s, mn	Accélère	Trop grand

**Tableau III.1** : caractéristique de régulateur PID

Les régulateurs PID répondent à plus du 90% des besoins industriels et le nombre de régulateurs installés dans une usine, par exemple, se compte par milliers, malheureusement, malgré l'expérience acquise au fil des ans, les valeurs choisies pour les paramètres P, I et D ne sont pas toujours satisfaisantes, ni adaptées au processus à régler.

### **III.11. Introduction au concept de logique floue**

La commande floue est un domaine d'application de la théorie des ensembles flous, son but est de traiter des problèmes de commande de processus veut dire gérer le Fonctionnement d'un processus en fonction d'un signal de commande donné à la différence de 'automatique classique, la commande floue se sert d'une base de connaissances symboliques avec la possibilité d'intégrer des connaissances numérique. Les contrôleurs flous sont généralement décrits par un ensemble de règles de type (If-Then), pour construire une base de règles on fait appel selon le cas à l'une des issues suivantes :

- L'extraction des connaissances d'opérateurs humains est certainement la plus utilisée pour la commande floue des systèmes complexes (cimenterie, four...etc.).
- Un modèle flou susceptible de décrire la dynamique du procédé à commander.
- Des connaissances mathématiques peuvent servir à l'amélioration de la représentation linguistique.

Un contrôleur flou peut être considéré comme un système expert capable de contrôler un système externe. Ceci ce fait grâce aux informations qu'il perçoit du système externe et celle qu'il restitue de ce dernier.

Des expériences ont montré que, dans des nombreux cas, les résultats obtenus avec un contrôleur flou sont meilleur que ceux obtenus avec des algorithmes de contrôle conventionnel.

En particulier, la méthodologie du contrôleur flou apparaît utile quand les processus sont très complexes à analyser par la technique quantitative conventionnelle, ou quand les sources d'information sont jugées non précises ou incertaines

Le régulateur flou, comme tout régulateur, a pour tâche de produire une loi de commande pour chaque combinaison de ses entrées et de sorte que l'erreur tend vers zéro le plus vite possible.

### **III.12. Structure d'un contrôleur flou [11]**

On distingue classiquement trois parties dans la structure d'un contrôleur flou :

- La Fuzzification est l'étape qui permet de transformer une grandeur mesurée sur le processus en un ensemble flou.

- le mécanisme de décision (traitement des prémisses, inférence, agrégation des règles).
- La Défuzzification est l'étape qui permet de transformer l'ensemble flou, obtenu par le calcul précédent, en une grandeur de commande à appliquer au processus.

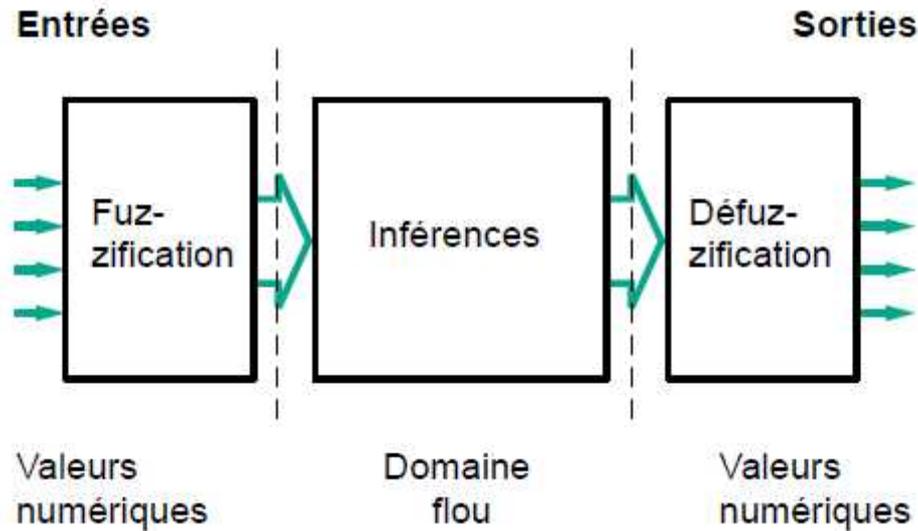


Figure III.14 : Traitement flou

### III.12.1. Prétraitement

Cette première étape permet le traitement des variables d'entrée du contrôleur flou, en particulier :

**a.** Formalisation de l'écart de commande : c'est la différence entre la grandeur de consigne et la grandeur à commander.

**b.** Calcul de la (dérivée et l'intégral) souvent la stratégie de commande, nécessite la (dérivée et l'intégral) de certaines grandeurs.

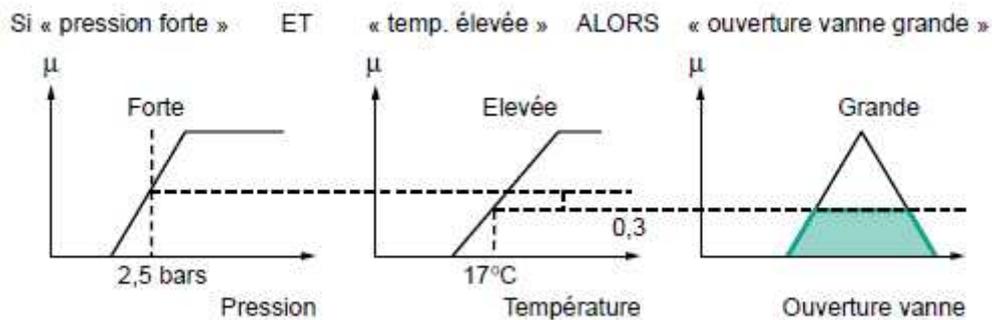
**c.** Filtrage : lorsque les grandeurs mesurées sont fortement bruitées, il s'avère nécessaire de les soumettre à un filtrage numérique.

**d.** Normalisation (mise à l'échelle).

### III.12.2. Fuzzification

Le processus de la Fuzzification consiste à simplement attribuer aux différentes variables linguistiques d'entrée des fonctions d'appartenance convenables. Cette opération est nécessaire vu que la mesure de la sortie  $y$  et la donnée de la référence ou consigne sont toujours exprimées en des variables qui sont nettes et précises et que le régulateur flou ne peut traiter que des variables floues.

C'est l'opération de projection de variables physiques réelles sur des ensembles flous caractérisant les valeurs linguistiques prises par ces variables. Donc il s'agit de la conversion des données en entrées en degré d'appartenance par l'intermédiaire de la fonction d'appartenance.



**Figure III.15 :** Exemple de la Fuzzification d'une grandeur X

#### Base de règles

Les règles peuvent mettre en jeu plusieurs variables dans leurs considérations et leurs résultats de calculs partielles peuvent être traité par la commande floue des systèmes MONO ou MULTI variables.

Dans la plupart des cas, le contrôleur flou nécessite en entrée l'erreur «  $(t)$  » et la dérivée de l'erreur «  $\frac{d\varepsilon(t)}{dt}$  », la représentation de bases des règles peut se donner sous la forme suivante :

If «  $(t)$  » is N and «  $(t)$  » is N then u is N

If «  $(t)$  » is N and «  $(t)$  » is P then u is P

If «  $(t)$  » is Z and «  $(t)$  » is Z then u is Z

La représentation des règles sous la forme de table (matrice d'inférence) :

U		(t)		
		N	Z	P
(t)	N	N	N	Z
	Z	N	Z	P
	P	Z	P	P

**Tableau III.2** : Forme de la représentation des règles

### III.12.3. Inférence floue

L'inférence est le processus par lequel des actions ou opérations floues sont prises au fur et à mesure que des informations sur les entrées sont recueillies et ce selon les règles définissant le système.

L'étape d'inférence consiste à appliquer les règles de la logique floue sur les grandeurs floues représentant l'erreur et sa dérivée. Ces règles permettent de déterminer le signal de sortie du régulateur en fonction des signaux d'entrées.

Il existe plusieurs possibilités pour réaliser l'application de ces règles qui s'appliquent aux fonctions d'appartenances, on utilise en générale une des méthodes de résolution suivantes :

- Méthode d'inférence Max-Min
- Méthode d'inférence Max-Prod
- Méthode d'inférence Somme-Prod

#### a. Méthode d'inférence MAX-MIN (Mamdani) :

La méthode d'inférence max-min : réalise le OU reliant les règles par le l'opérateur max et le ALORS par un opérateur min.

La méthode de Mamdani repose sur l'utilisation de l'opérateur MIN pour la combinaison des prémisses et pour l'implication. Chaque règle est activée séparément et les conclusions sont agrégées pour définir l'ensemble flou associé à la variable de sortie y. l'agrégation des règles est réalisées par l'opérateur MAX.

**Exemple :**

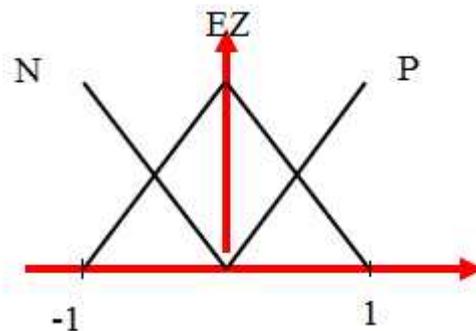
Voici un exemple de calcul de la commande du système à deux entrées  $X_1$  l'erreur (t) et la variation de l'erreur de la variable process débit gaz qu'on symbolise  $X_2$  et le pourcentage d'ouverture de la vanne gaz comme sortie « u ». L'implémentation du programmation de commande est succinctement de la manière suivant :

Si «  $X_1$  » est EZ ET «  $X_2$  » est P, Alors « u » est N, Ou

Si «  $X_1$  » est N ET «  $X_2$  » est EZ, Alors « u » est P.

On peut normaliser les variables «  $X_1$  » et «  $X_2$  » ainsi que la sortie « u » dans l'étendu d'échelle -1 à 1 et dont la fonction d'appartenance de ces trois sous-ensembles flous est décrite par une symbolisation triangulaire. Le langage linguistique utilisé est :

N pour « négatif », EZ pour « environ zéro » et P pour « positif ». Cette fonction d'appartenance à l'allure suivante :



**Figure III.16** : fonction d'appartenance.

Dans le cas où les mesures (Ecart, variation de l'écart) se trouve à l'indice tels que  $X_1 = -0.5$  et  $X_2 = 0.75$  et le calcul de la commande « u » résultante est réalisé par la méthode d'inférence **max-min**.

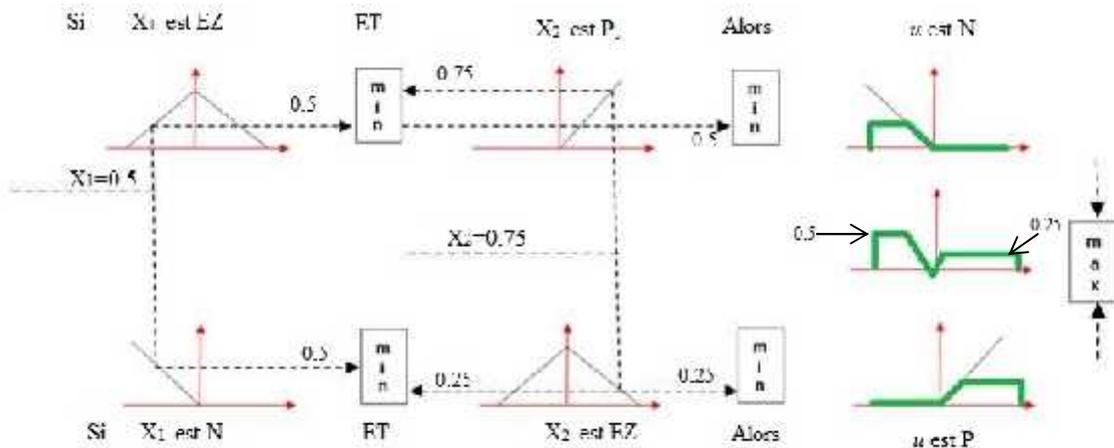


Figure III.17 : La méthode d'inférence MAX-MIN.

### III.12.4. Défuzzification

L'étape précédente a produit une loi de commande exprimée en terme d'une fonction d'appartenance donc une loi de commande floue. Comme le système à asservir ne peut accepter que une commande définie et nette, cette fonction d'appartenance doit être traduite en une commande non floue, nette et précise. Ce processus est connu sous le nom de Défuzzification.

- Les valeurs obtenues lors de la combinaison des règles appliquées aux intervalles flous de la variable de sortie, définies une fonction d'appartenance. Il s'agit de convertir cette information en une grandeur physique. Il existe plusieurs méthodes, parmi lesquelles :
- Le centre de gravité.
- La méthode de la hauteur.
- Le centre des aires.
- Le centre de maxima.

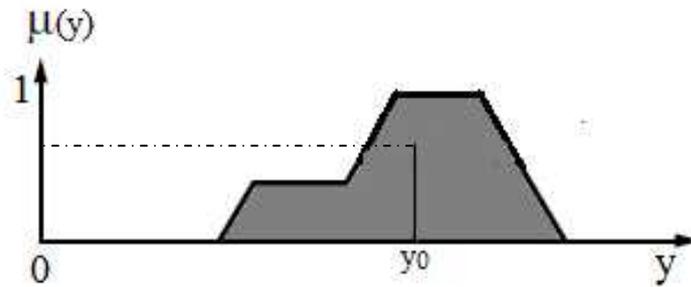
La méthode de Défuzzification le plus utilisée en commande floue méthode qui est le plus souvent plus efficace que les autres, celle de la Défuzzification par centre de gravité.

**a. Défuzzification par centre de gravité**

Il s'agit de calculer le centre de gravité de la fonction d'appartenance de la variable de sortie, le calcul du centre de gravité permet bien d'obtenir une seule valeur pour la grandeur de sortie. Son calcul est cependant relativement complexe puisqu'il nécessite le calcul d'une intégrale, ou dans le cas simple de fonctions d'appartenance en raies, d'une somme pondérée.

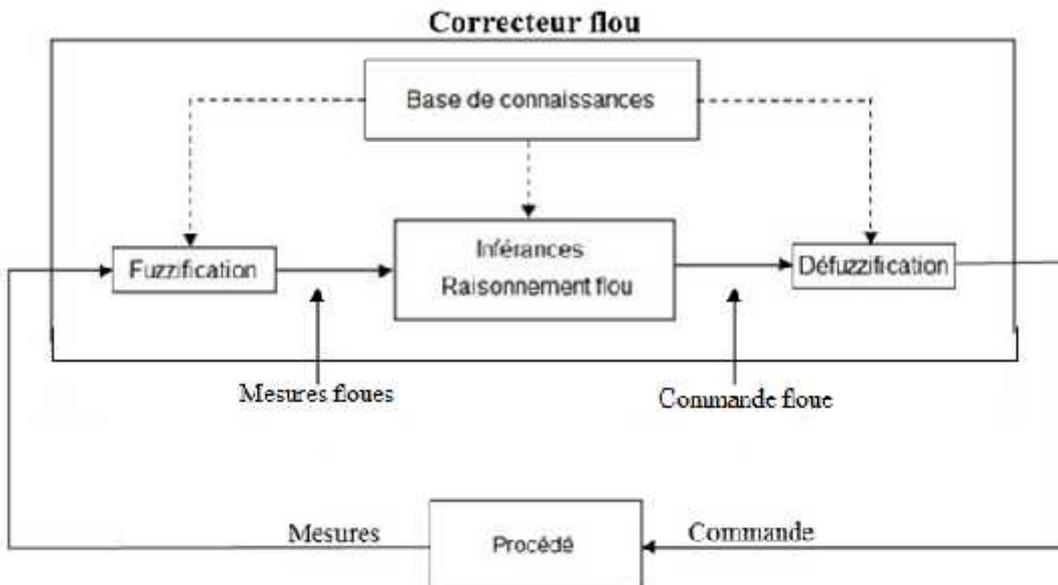
L'abscisse du centre de gravité peut être déterminée à l'aide de la relation suivante :

$$u^o = \frac{\int_u u \cdot \mu_u(u) du}{\int_u \mu_u(u) du}$$



**Figure III.18 :** Défuzzification par centre de gravité

En générale la structure d'un correcteur floue est donnée par le schéma suivant :



**Figure III.19 :** Schéma de la commande floue

### III.13. Avantages et inconvénients

La logique floue s'avère très simple à mettre en œuvre par rapport aux techniques de contrôle traditionnelles basées sur des modèles mathématiques. Ce genre de système utilise un ensemble d'équations différentielles qui permettent de calculer les réponses du système à partir des entrées. Ces systèmes s'avèrent très efficaces, mais nécessitent de longues années de développement et d'étude théorique. De plus, il n'existe pas toujours de modèle mathématique pour toutes les situations, et s'il existe, ce modèle peut être très coûteux en temps de calcul ou en espace mémoire. Ainsi, un système basé sur des règles empiriques peut être plus efficace. Mais le caractère empirique de ces règles est par ailleurs un inconvénient, parce que ces règles ne sont pas précises, et peuvent être sources d'erreurs. Il faut donc passer par une phase de test du contrôleur afin de corriger ces règles. [12]

### III.14. Les domaines d'applications de la logique floue

Les domaines d'applications de la logique floue sont très nombreux. On la retrouve : [13]

- En automatique, pour faire de la commande et de la régulation floue, etc.
- En traitement du signal, pour faire de la fusion de données, de la classification, de la reconnaissance de forme ou de la recherche d'information, etc.
- En robotique, pour faire de la planification de trajectoire, etc.
- En traitement d'image, pour atténuer le bruit d'une image, pour faire de l'interpolation, etc.
- On retrouve donc naturellement la logique floue dans de nombreux secteurs d'activités
- Médecine (aide au diagnostic, guidage de systèmes chirurgicaux).
- Contrôle aérien
- Gestions des feux de circulations
- Assurances et finances (préventions des risques, aide à la décision)
- Environnement (météo, etc.)
- Robotique (freins ABS, machines à laver, etc.)

### **III.14. Conclusion**

Dans ce quatrième chapitre on a présente les bases de la régulation classiques, mais aussi on a donné les notions de la logique floue et aussi son principe dans la régulation. Toutes ces informations vont nous servir dans la partie simulation de la problématique et de la désulfuration des gaz par la vapeur d'eau.

# Chapitre IV

## Simulation

### IV.1. Introduction

Dans les deux chapitres précédents nous avons donné les éléments nécessaires pour qu'on puisse faire face à cette problématique. Après la récupération des données réelles du système DCS de l'unité de l'ammoniac, c'est-à-dire les entrées-sorties des deux vannes (FRCa 104 et FRCa 105), nous commençons par l'identification des deux systèmes a fin d'obtenir leurs modèles mathématiques à l'aide du MATLAB, en utilisant le toolbox IDENT. On utilise un autre toolbox qui s'appelle PIDTOOL pour fixer les paramètres des deux régulateurs lorsqu'on les met en boucle fermée. A la fin nous entamons la phase de la commande floue, c'est-à-dire synthétiser un contrôleur à base de la logique floue qui commande la vanne à fin de garder le rapport Vapeur/Gaz désiré.

### IV.2. Traitement des données

Les débits mètres ne nous donnent pas directement la mesure mais seulement une lecture qu'on doit convertir en débit massique à l'aide d'une équation mathématique.

#### IV.2.1. Débit de vapeur

Pour la vapeur on a obtenu les données sur la vanne de régulation FRCa 105 qui contrôle le débit de vapeur avant le mélange. La formule Mathématique pour nous donner le débit réel en kg/h est :

$$Q_v = R * F * \sqrt{\frac{(P - 1) + 1}{(T - 1) + 2}} \quad \text{Kg/h}$$

Après on divise le résultat sur 1000 pou avoir le débit en Tn/h. Donc on a besoin des paramètres suivants pour le calcul : la pression de la vapeur (PI-172), la température I-101-11), la lecture du débitmètre (R) et le facteur d'orifice (F=38958). On a injecté toutes ces données sous Excel pour avoir le résultat suivant (**Figure IV.1**) :

A		B		C		D		E	
Débit m³/h		Pression		Température		Vitesse		Débit m³/h	
BT_1022105.PN									
4,91069977	01,34729901	006,200000				20	0000,0000		47,000000
4,81137247	40,1442438	299,9124442				28	47284,7529		47,2847529
4,71394018	40,11099808	372,8709157				24	40721,77089		40,72177089
6,14251368	40,98470908	401,6479797				29	60579,87032		60,57987032
5,396929930	42,02449313	399,1870953				29	60023,83461		60,02383461
6,312254972	41,60970791	400,3130029				29	61879,96156		61,87996156
5,916177911	41,1664916	398,0098245				29	60017,03027		60,01703027
5,926631005	01,21670001	349,5746791				29	59810,71981		59,81071981
5,917167211	01,01129001	351,1555176				29	59810,71981		59,81071981
5,909303717	01,21670001	349,5746791				29	60017,03027		60,01703027
5,901539461	41,60970791	400,3130029				29	60019,00127		60,01900127
5,288421081	41,39414115	341,5831421				29	64239,78549		64,23978549
5,297781236	41,24705778	371,6221058				29	60627,25206		60,62725206
5,445837971	41,81494004	391,4995049				29	62810,25022		62,81025022
5,378075461	41,61796951	389,8893596				29	63742,30486		63,74230486
5,102900815	01,05141001	348,0000000				29	60000,00000		60,00000000
5,901000000	01,05141001	348,0000000				29	60000,00000		60,00000000
5,101000000	01,05141001	348,0000000				29	60000,00000		60,00000000
5,100000000	01,05141001	348,0000000				29	60000,00000		60,00000000
5,100000000	41,7644110	341,6000000				29	61000,00000		61,00000000
5,100000000	41,82999908	379,0250000				30	60000,00000		60,00000000
5,128984928	41,84705025	384,5102844				30	60933,83423		60,93383423
5,200183842	41,9448234	391,8084738				30	61211,04907		61,21104907

Figure IV.1 : Données vapeur

Le FV105-out représente l'ouverture de la vanne en pourcentage (%).

#### IV.2.2. Débit de Gaz naturel

Pour ce qui concerne le débit de gaz naturel désulfuré le principe est le même, donc nous avons la lecture (R), La pression de refoulement (PT-102) du compresseur 102J, la température du gaz (TI-101-10) et le facteur (F=59948) et on a Mwa : la masse molaire du gaz égale à 19.05 g/mol

La formule mathématique qui nous donne le débit du gaz est :

$$Q_g = \frac{R \cdot F \cdot M}{2.4} \cdot \sqrt{\frac{(P - 1) + 1}{((T - 1) - 1) + 2} \cdot M} \quad K / h.$$

Les données sont représentées sous forme d'un document Excel (Figure IV.2)

A	B	C	D	E	F
débitmètre	pression	température	vanne	débit corrigé en Kg/l	débit en Tn/l
REF_REC:FT104.PNT	REF_REC:PT102.PNT	NIIS_102DE_CA:T101_10.PNT	REF_REC:FV104.OUT		
5,974719143	33,011541411	383,7483711	53,19976014	19,944,16189	19,944,8119
5,05933105	33,00023566	380,263763	53,19976014	19,900,1072	19,900,3072
5,923957879	33,24726868	388,4622802	53,19976044	19,239,01506	19,239,1506
6,311514514	33,04492411	389,0425417	53,19976044	20,311,8917	20,311,8917
6,007154572	33,11053351	382,1711426	53,19976014	19,735,21051	19,735,21051
6,292918978	33,80551599	387,2774048	53,19976044	20,108,84115	20,108,84115
5,927018763	33,27010515	384,8991119	53,19976014	19,799,01406	19,799,01406
6,242964745	33,02595465	385,2942712	53,19976044	20,221,21315	20,221,21315
6,290465731	33,17421458	384,7167671	53,19976044	20,289,58559	20,289,58559
6,305931158	33,89971951	387,9119951	53,19976014	20,419,13136	20,419,13136
6,160322968	33,00234504	383,5762332	53,19976044	20,000,02472	20,000,02472
6,147075754	33,90785411	386,8302049	53,19976044	20,061,49259	20,061,49259
6,229027271	33,5449234	383,5022278	53,19976014	20,180,51912	20,180,51912
6,253905205	32,0214350	383,4775926	53,19976044	20,251,93524	20,251,93524
6,287368429	33,93421466	387,8721484	53,19976044	20,909,06604	20,909,06604
6,262012564	33,96007265	383,2901206	53,19976014	20,321,54011	20,321,54011
6,465711521	32,55351500	383,064552	53,19976044	20,106,71455	20,106,71455
6,40441177	33,88450371	384,7489419	53,19976044	20,003,5487	20,003,5487
6,313057156	32,7726501	383,0571136	53,19976014	19,793,26980	19,793,26980
6,48735763	33,91099326	384,4936548	53,39975735	20,263,92188	20,263,92188
6,330115676	33,01400479	384,2445121	53,39975735	20,402,96499	20,402,96499
6,310333720	33,15351356	384,2919121	53,39975735	19,783,55197	19,783,55197
6,270495998	33,14179992	384,4991922	53,39975735	19,651,98169	19,651,98169

Figure IV.2: Données gaz

Le FV104-out représente l'ouverture de la vanne en pourcentage (%).

### IV.2.3. identification des systèmes

Dans cette étape on fait appelle au logiciel **MATLAB** pour faire l'importation des données par la fonction « **import data** » (Figure IV.3) :

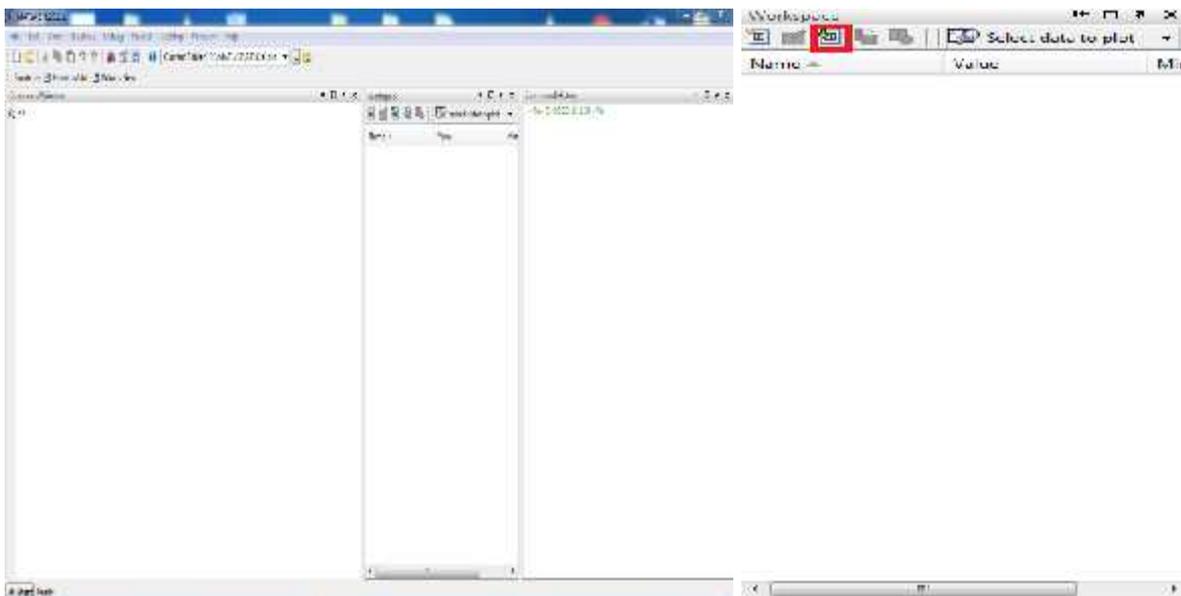


Figure IV.3 : import data

Une fenêtre va apparaître, on va sélectionner l'entrée/ sortie et les nommer.

(Xv : ouverture de la vanne de vapeur. Yv : débit de sortie de vapeur) (Figure IV.4) .et pour le gaz (Xg : ouverture de la vanne du gaz. Yg : débit de sortie du gaz). (Figure IV.5)

	B	C	Xv (26x1)	E	Yv (26x1)
1	pression	température	vanne0	debit corrigé	debit 0 (m³/s)
2	REF_REG:P...	NH3_101B...	REF_REG:V...		0
3	41.7449	405.9744	27	4.7889e+04	47.8697
4	41.3742	399.9153	23	4.7234e+04	47.2338
5	40.1109	372.0709	24	4.6722e+04	46.7218
6	40.9348	401.6480	25	6.3575e+04	63.5754
7	42.0645	398.1377	25	6.3023e+04	63.0233
8	41.6098	400.3530	25	6.1890e+04	61.8900
9	41.3667	358.0026	25	6.0317e+04	60.3174
10	41.2160	359.5147	25	5.9540e+04	59.5397
11	41.4777	357.3555	25	5.9540e+04	60.7000

Figure IV.4 : données vapeur importées

	A	B	C	Yg (50x1)	Xg (50x1)
1	debitmètre	pression	température	debit 0 (kg)	vanne0
2	REF_REG:FT...	REF_REG:P...	NH3_102DE...	en Tm01	REF_REG:F...
3	7.5675	37.0125	401.7809	12.8047	55.76
4	7.5745	36.9801	400.7951	12.0778	53.06
5	7.5538	37.0254	400.5170	12.2180	55.50
6	7.5946	36.9907	399.5305	11.8766	53.88
7	7.5172	37.0117	398.9906	12.0283	55.95
8	7.5584	36.9902	398.8963	12.1595	57.15
9	7.5470	37.0137	398.7918	12.1168	57.33
10	7.5811	36.9902	398.9456	11.6973	55.44
11	7.5388	36.9914	398.9013	12.1397	58.05

Figure IV.5 : données gaz importées

Après cette étape nous faisons un lissage des données car elles sont perturbées. On utilise la fonction Smooth. On prend par exemple le débit de vapeur ( $Y_v$ ). (Figure IV.6)

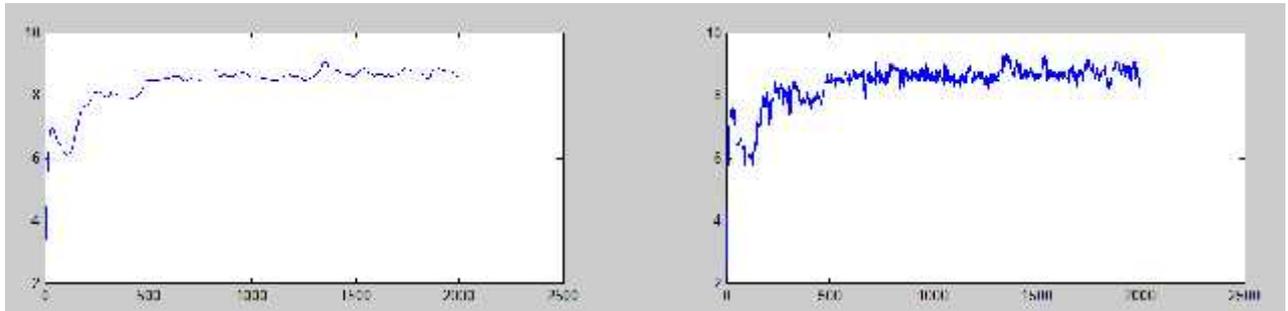


Figure IV.6: avant et après le lissage

On lance le toolbox « **ident** » et on définit l'entrée, la sortie et le temps d'échantillonnage (Figure IV.7, Figure IV.8)

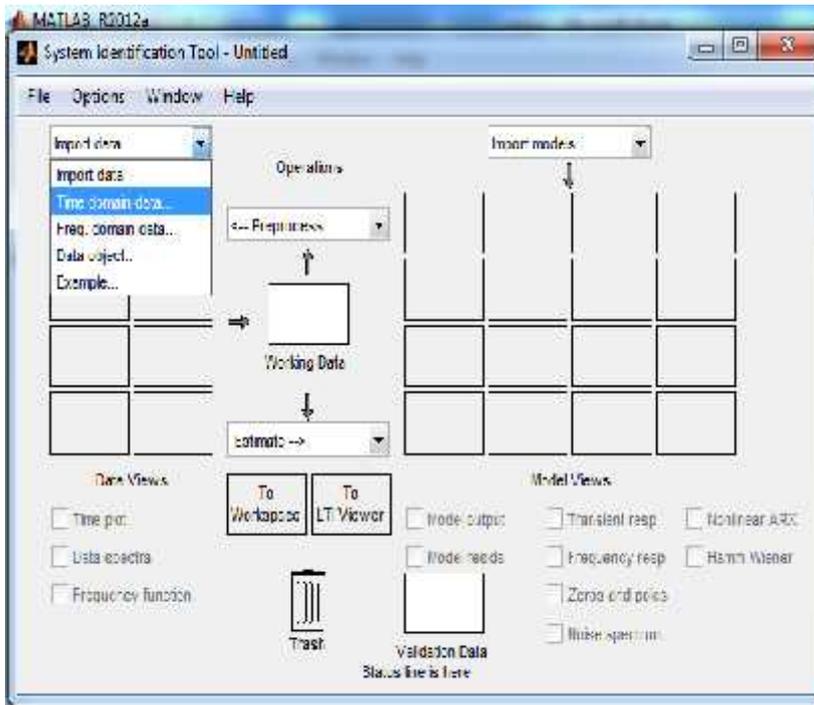


Figure IV.7 : lancement du toolbox **ident**

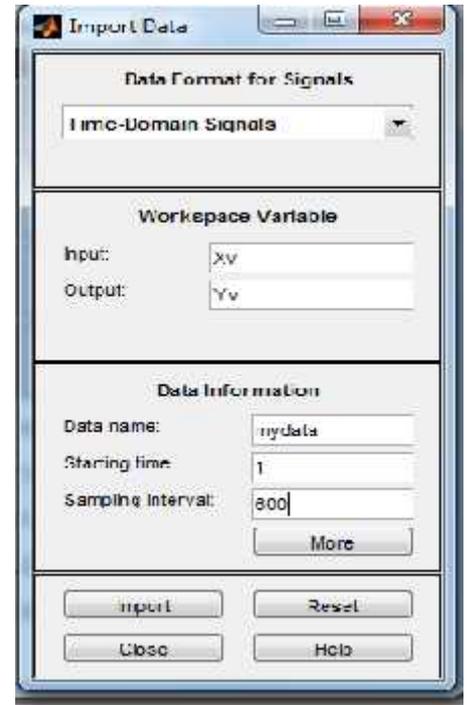


Figure IV.8 : informations sur les données

Nous commençons l'estimation par le modèle ARX pour estimer l'ordre du système ( $n_a$ =Pôles,  $n_b$ =Zéros,  $n_k$ =Retard) (Figure IV.9). Nous donnons un intervalle d'estimation de 1 à 3 pour chaque paramètre. (Figure IV.10)

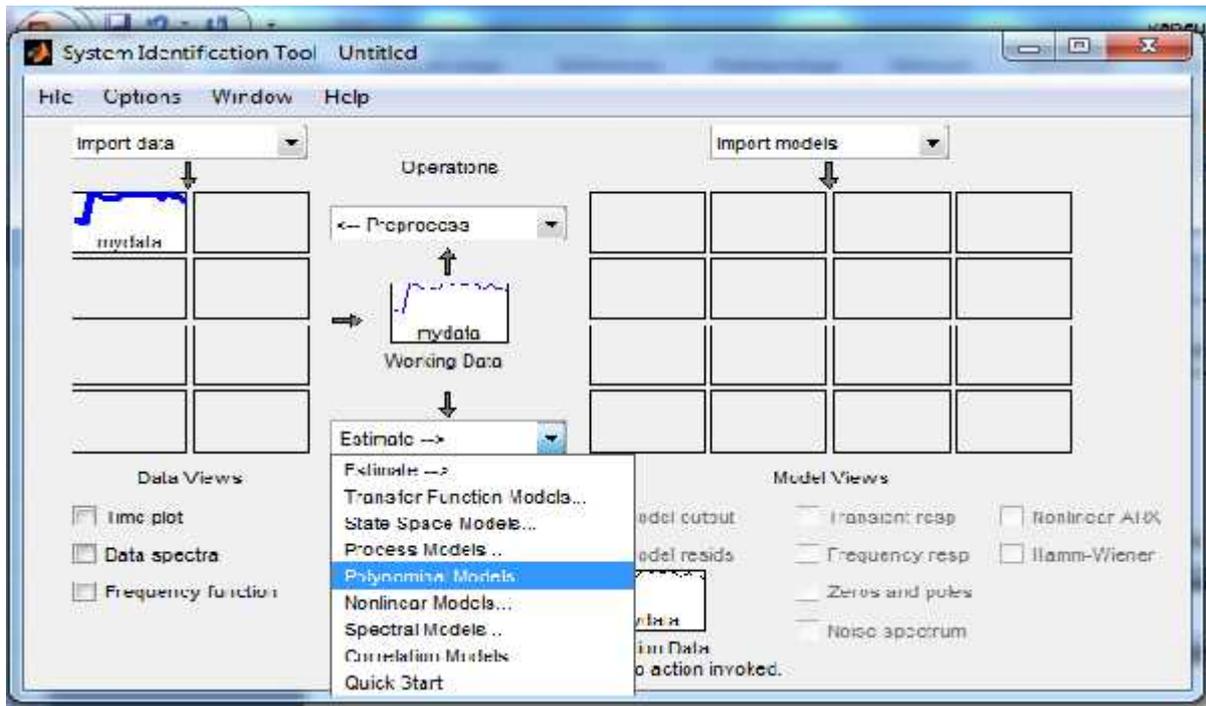


Figure IV.9 : Estimation par ARX

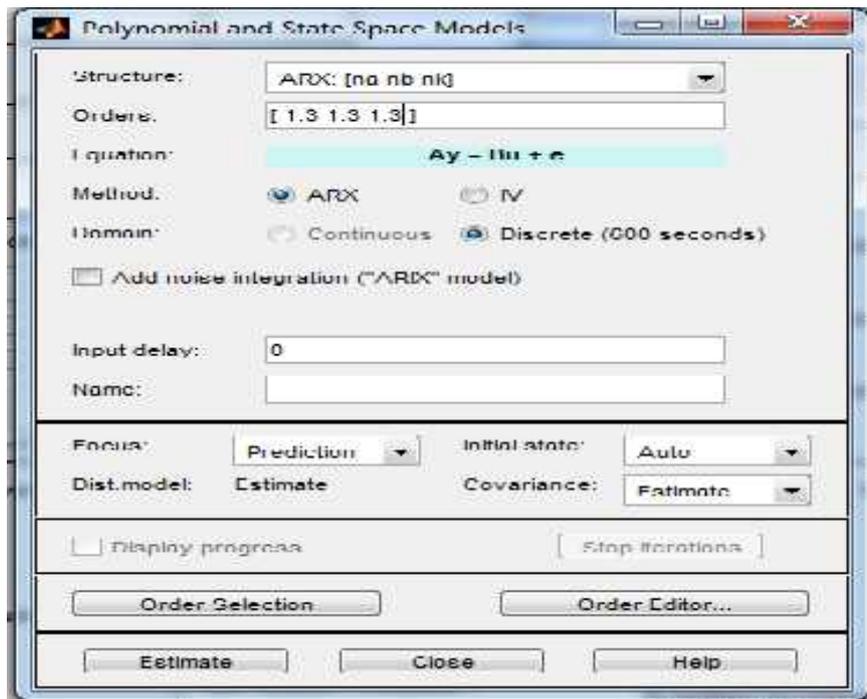
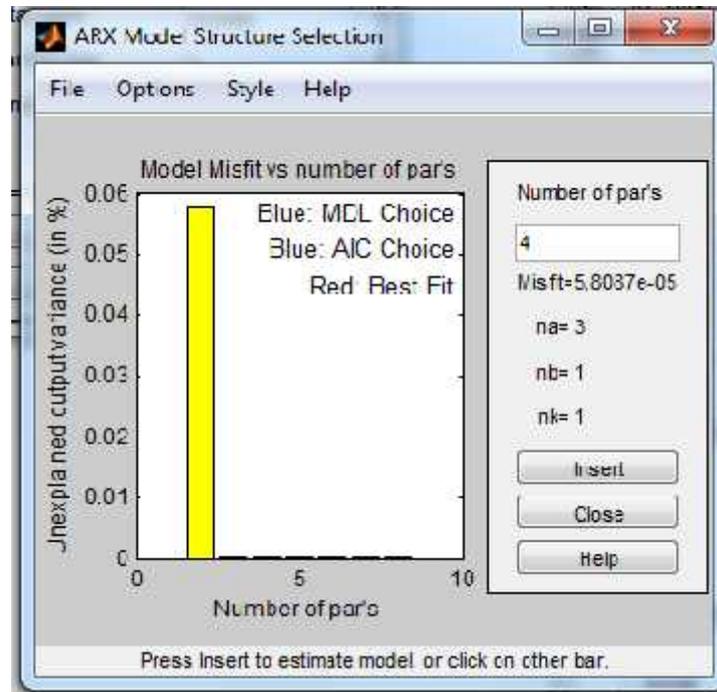


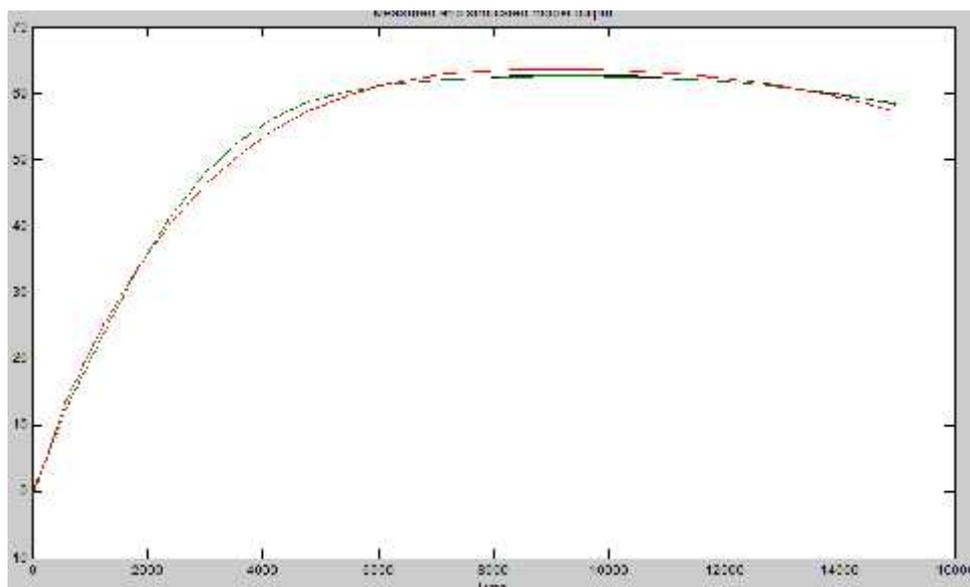
Figure IV.10 : paramétrage de la méthode ARX

Après l'estimation on obtient « **ARX Model Structure Selection** », qui affiche les performances du modèle pour chaque combinaison de paramètres du modèle, on utilise le graphique suivant pour sélectionner le meilleur modèle. (**Figure IV.11**)



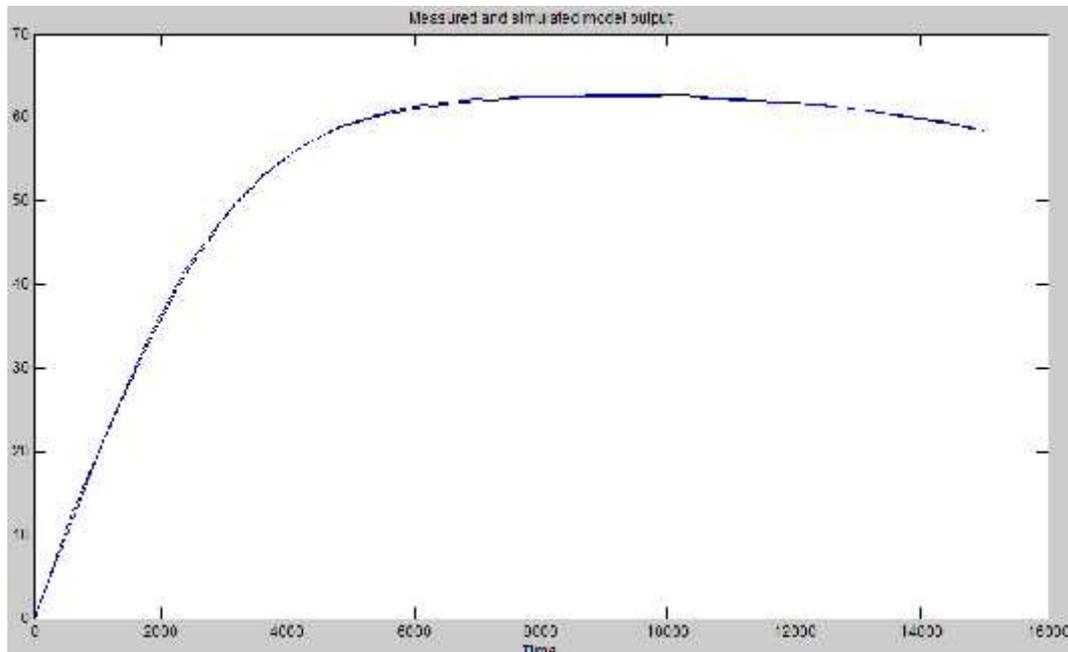
**Figure IV.11** : ARX Model Structure Selection

On a trouvé que le meilleur modèle estimé est avec les paramètres suivants: ( $n_a=3$ ,  $n_b=1$ ,  $n_k=1$ ) et on peut comparer la sortie réelle  $Y_v$  et celle du modèle ARX (**Figure IV.12**)



**Figure IV.12** :  $Y_v$  mesurée et simulée par le modèle ARX

Nous suivons le même processus pour réaliser l'identification par la méthode ARMAX avec les paramètres suivants : (na=3, nb=1, nc=1, nk=1), on a trouvé le résultat suivant (**Figure IV.13**)



**Figure IV.13** : Yv mesurée et simulée par le modèle ARMAX

Après les deux estimations précédentes qui ont donné des résultats élevés par rapport au modèle réel, nous cherchons maintenant un modèle continue (Fonction de transfert continue) car les deux techniques ARX et ARMAX travaillent dans le mode discret. Nous passons à un autre processus d'estimation des fonctions de transfert qui s'appelle: **TRANSFERT FUNCTION MODEL**. Cette technique nécessite le nombre de pôles et le nombre de zéros après on obtient un modèle mathématique (Fonction de transfert).

Pour notre système on lui donne le nombre de pole égale à 3 et le nombre de zéros égale a 1 et on a obtenu la fonction de transfert du système de la vapeur suivante (**Figure IV.14**)

$$Tfv = \frac{5.539e-05 s + 3.353e-12}{s^3 + 0.007145 s^2 + 3.392e-05 s + 5.869e-14}$$

Continuous-time transfer function.

**Figure IV.14** : Fonction de Transfert pour la vapeur

Après avoir obtenu la fonction de transfert on peut voir la réponse indicielle du système (Figure IV.15)

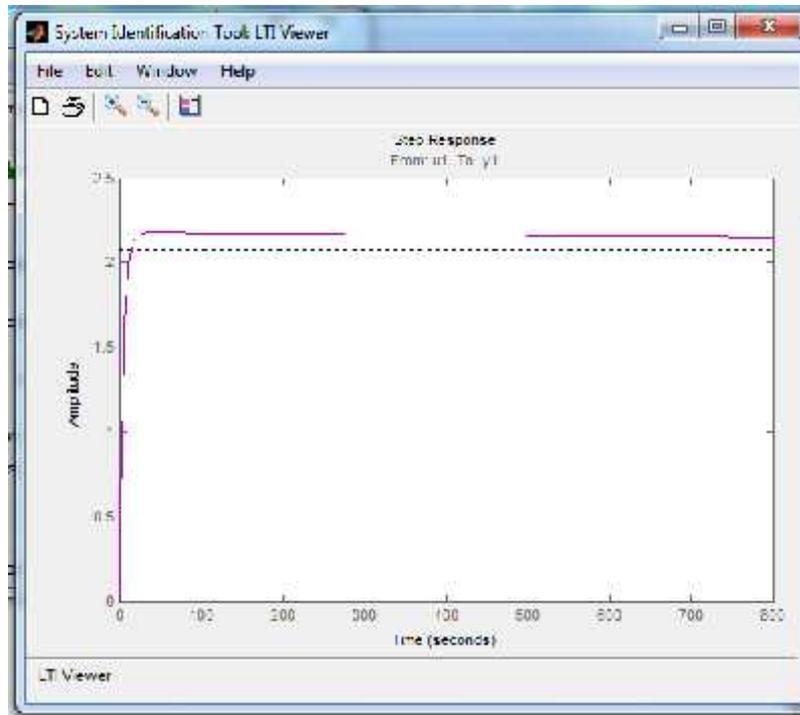


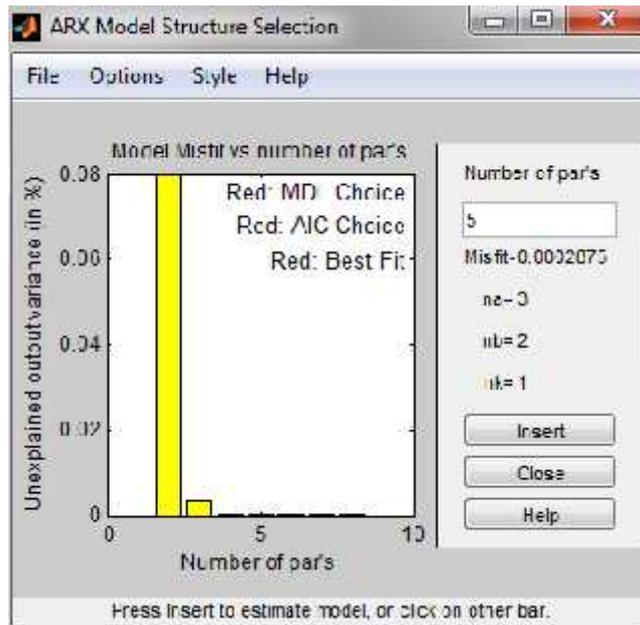
Figure IV.15 : réponse indicielle du système de la vapeur

#### IV.2.4 Identification du système du Gaz

Nous suivons les mêmes étapes pour identifier le système du gaz.

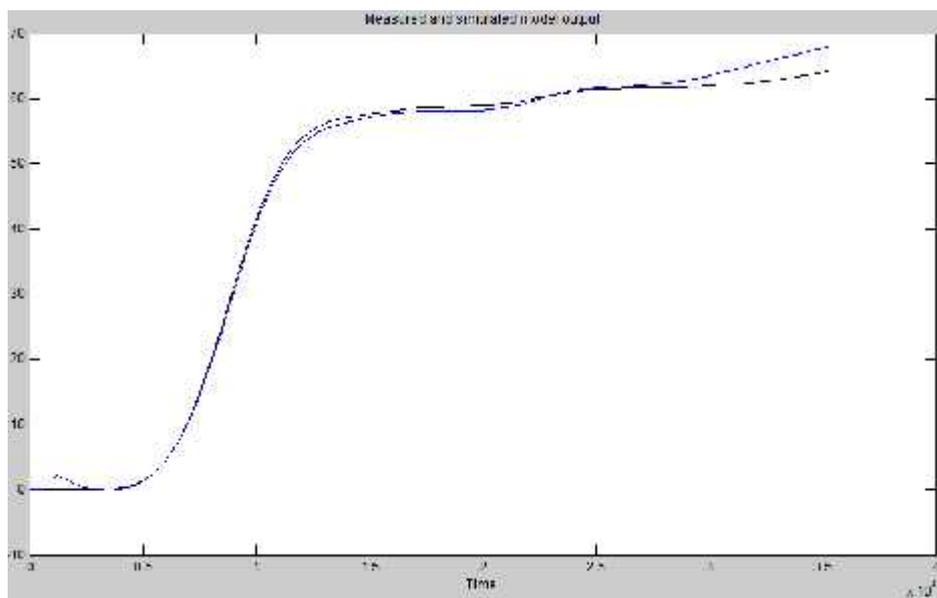
L'identification par les deux méthodes discrètes ARX et ARMAX a donné le résultat suivant:

Le meilleur modèle d'identification par la méthode ARX est le suivant : ( $n_a=3$ ,  $n_b=2$ ,  $n_k=1$ ), (Figure IV.16)



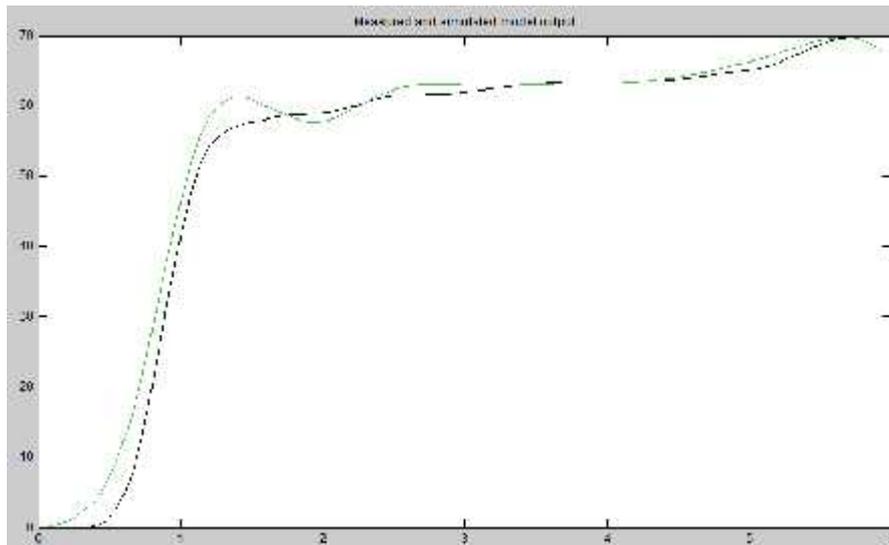
**Figure IV.16:** ARX Model structure Selection

La sortie du modèle identifié par ARX et la sortie réelle sont représentées par le graphe (**Figure IV.17**)



**Figure IV.17 :** Yg mesurée et simulée le modèle par ARX

Tandis que l'identification par le modèle ARMAX avec ( $na=3$ ,  $nb=2$ ,  $nc=1$ ,  $nk=1$ ) a donné le résultat (**Figure IV.18**)



**Figure IV.18** :  $Y_g$  mesurée et simulée par le modèle ARMAX

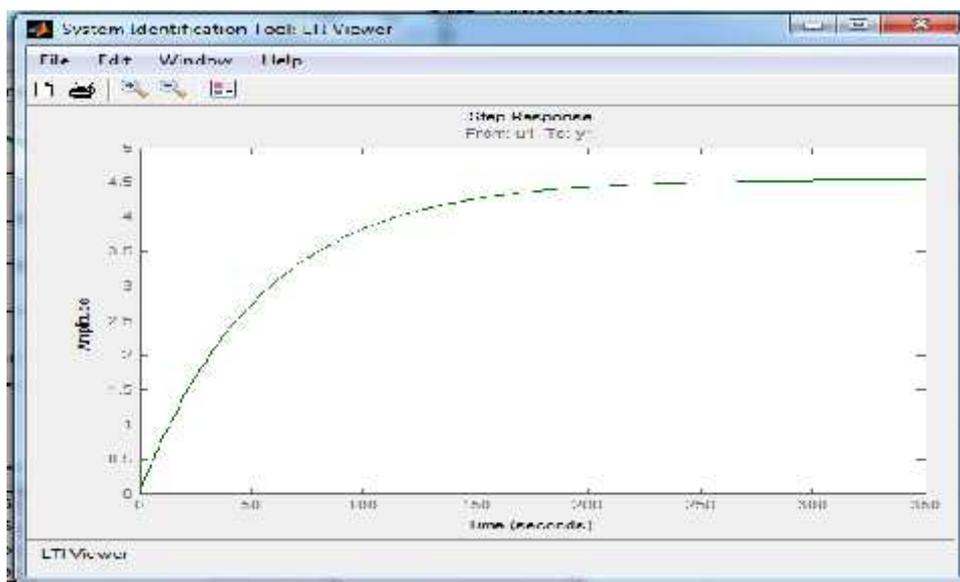
La fonction de transfert du système du gaz naturel est donnée sur **(Figure IV.19)**

$$|TF_g = \frac{0.03812 s^2 + 0.0001398 s + 7.383e-08}{s^3 + 0.01222 s^2 + 3.329e-05 s + 1.65e-08}$$

Continuous-time transfer function.

**Figure IV.19:** fonction de transfert pour le système du gaz naturel

Et la réponse indicielle du système du gaz naturel est représentée par le graphe suivant **(Figure IV.20)**



**Figure IV.20** : la réponse indicielle du système du gaz naturel

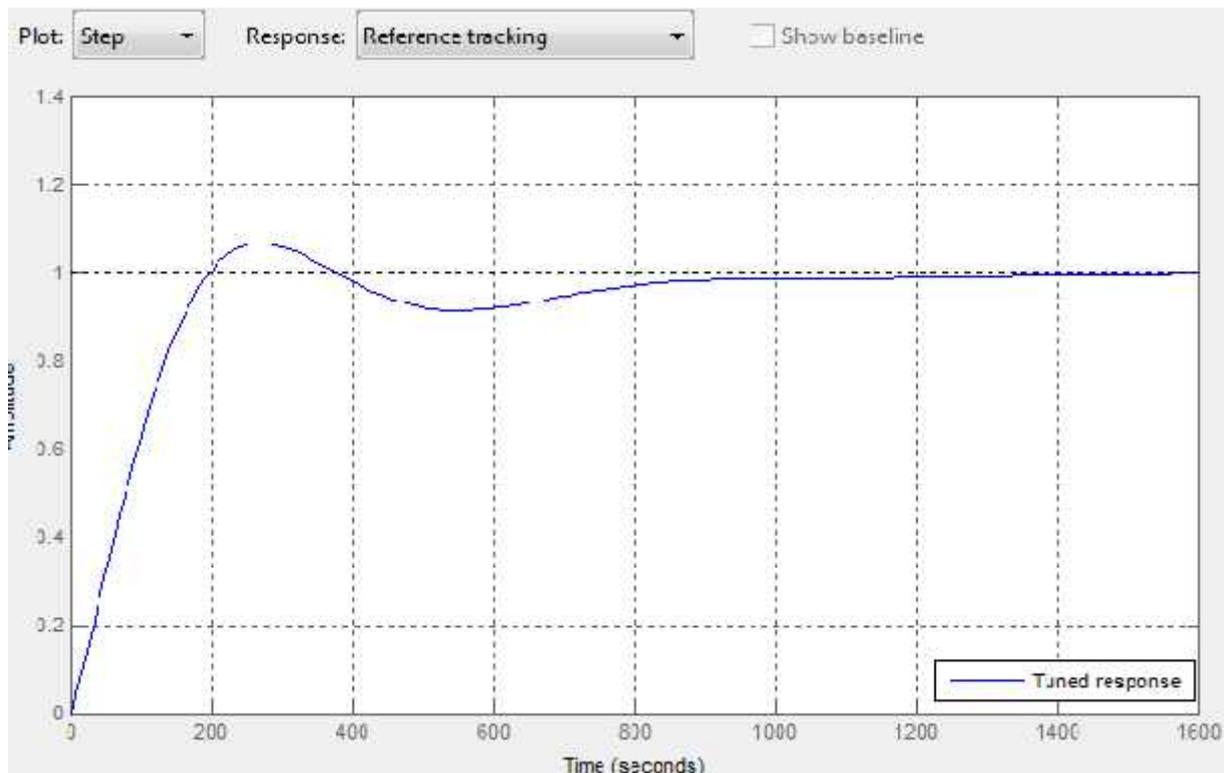
### IV.3. La commande des deux vannes

Après l'identification des deux systèmes c'est-à-dire les deux vannes régulatrices, maintenant on passe à la commande des deux systèmes, donc on va tout d'abord mettre en œuvre des régulateurs PID pour chaque vanne afin de les commander dans le but de garder un rapport optimal.

#### IV.3.1. La commande classique

Pour la détermination des paramètres des régulateurs PID nous faisons appel à un autre outil de Matlab qui s'appelle « **PIDTOOL** ». Selon d'un chier des charges et des caractéristiques dynamiques bien déterminées nous fixons les paramètres du régulateur.

Pour la vanne de la vapeur (**Figure IV.21**) :



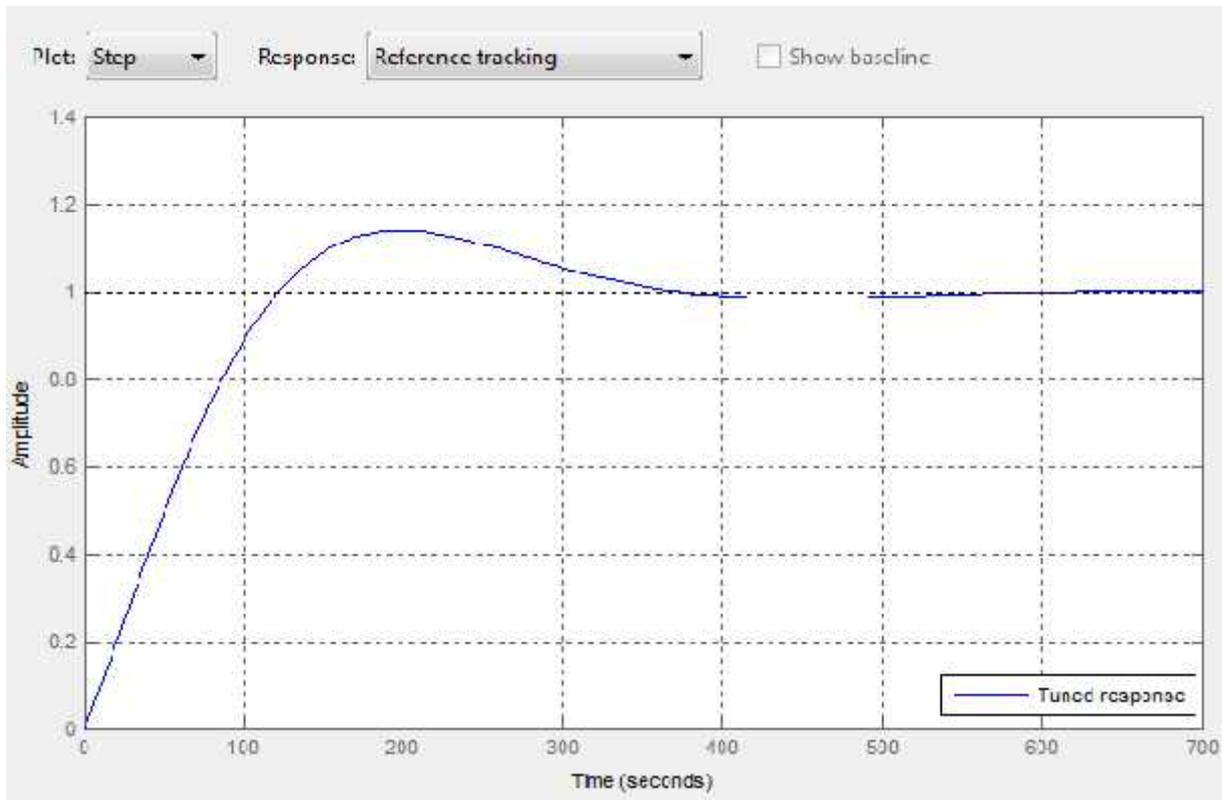
**Figure IV.21:** PIDTOOL du système de vapeur

Les paramètres du régulateur sont :

- $K_p = 2.1342$
- $K_i = 0.0056805$
- $K_d = 110.6984$

Avec un taux de dépassement **6.88 %**.

Pour le système de Gaz (**Figure IV.22**)



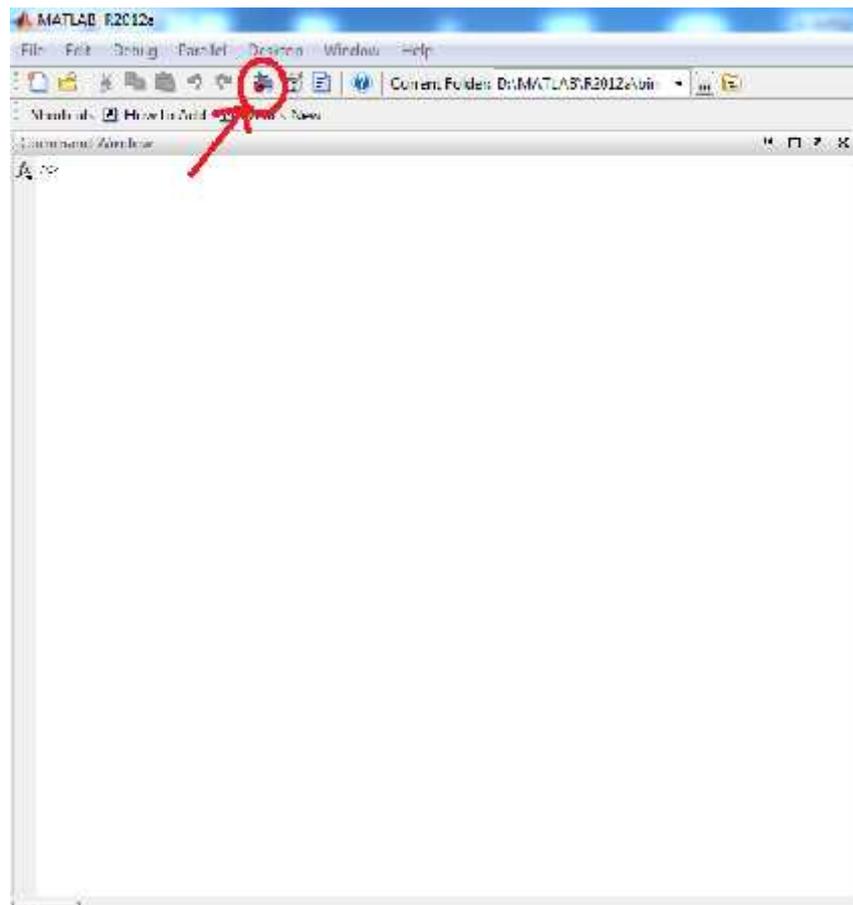
**Figure IV.22:** PIDTOOL du système du Gaz

Les paramètres du régulateur sont :

- $K_p = 0.92115$
- $K_i = 0.014947$
- $K_d = 0$

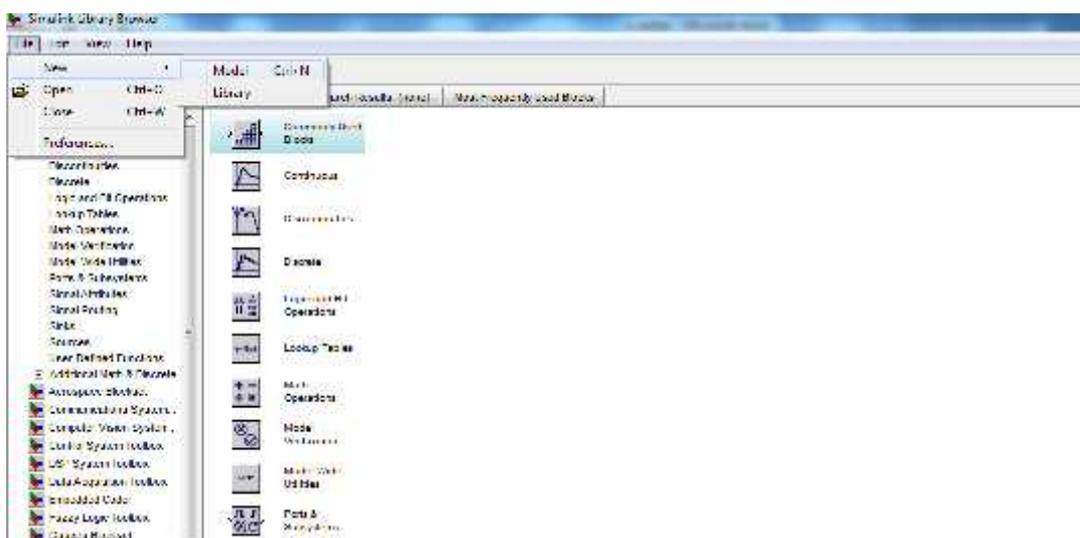
Avec un taux de dépassement **10.8 %**.

Après avoir fixé les paramètres des régulateurs, on va mettre notre système en boucle fermée pour qu'on puisse visualiser le rapport entre le débit de la vapeur et le débit du gaz naturel, on utilise donc « Simulink » de MATLAB (**Figure IV.23**)



**Figure IV.23** : ouvrir simulink sur MATLAB

Une nouvelle fenêtre va s'afficher sur laquelle on va créer un nouveau modèle en cliquant sur File→ New→Model (**Figure IV.24**) et on utilise la bibliothèque du Simulink pour ajouter les éléments de notre modèle de simulation (**Figure IV.25**)



**Figure IV.24** : créer un modèle sur Simulink

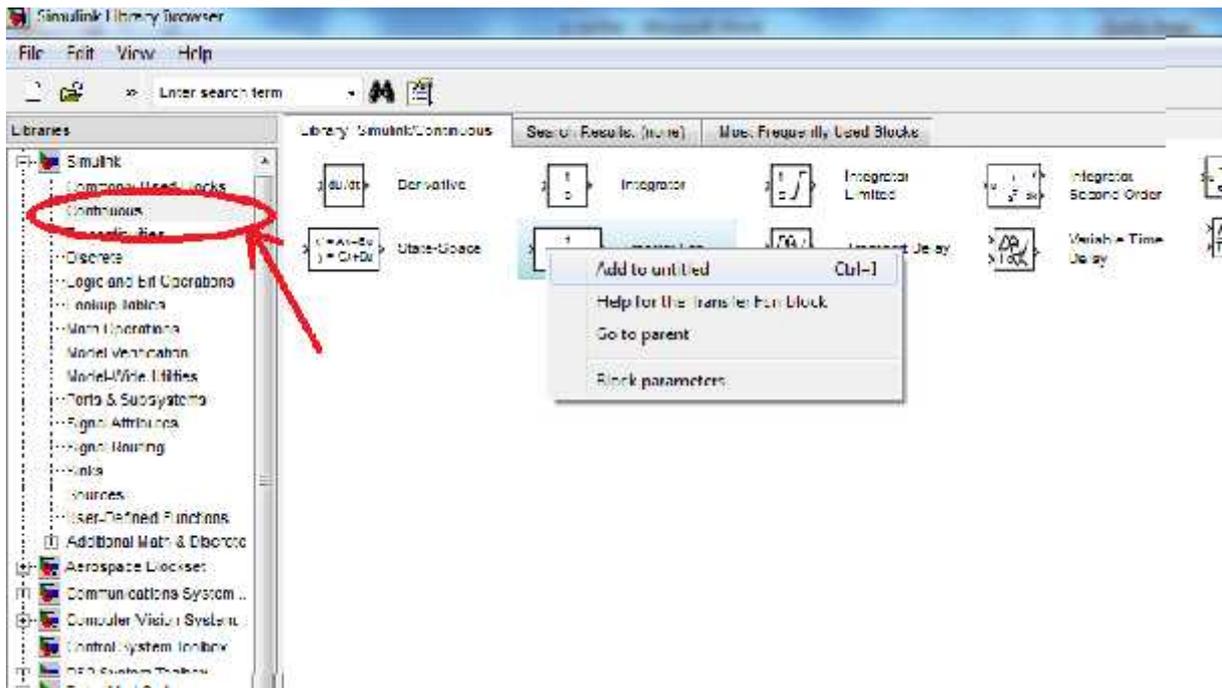


Figure IV.25 : ajouter les éléments du système

Après cette étape, il nous reste que l'organisation des éléments selon la structure des systèmes (Figure IV.26) et on donne les consignes des débits (92.5 Tn/H pour le débit de la vapeur et 25Tn/H pour le débit du gaz) (Figure IV.27)

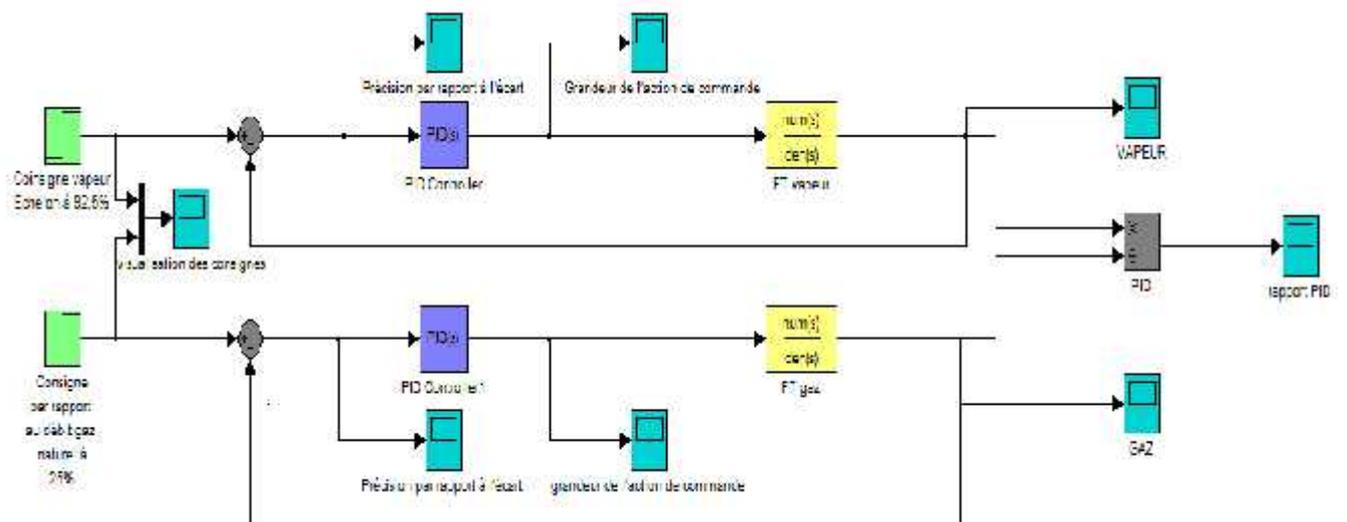
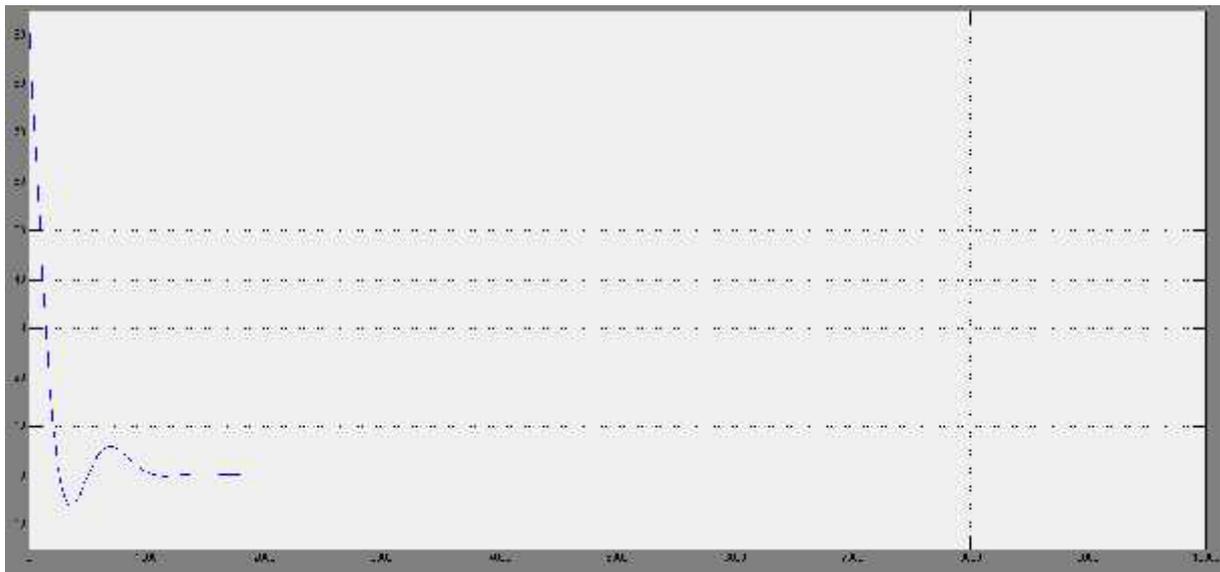


Figure IV.26:Schéma de simulation du système avec régulateurs PID



**Figure IV.27** : les consignes vapeur et gaz

La précision par rapport à l'écart des deux systèmes est donnée sur les graphes suivants (**Figure IV.28**) (**Figure IV.29**)

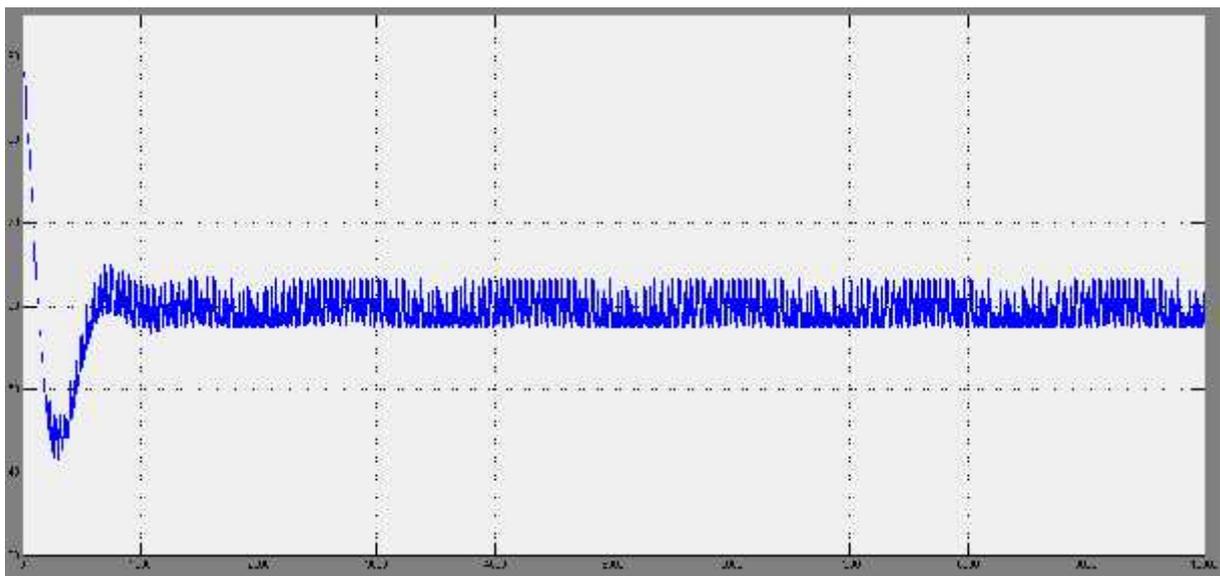


**Figure IV.28** : écart du système de la vapeur

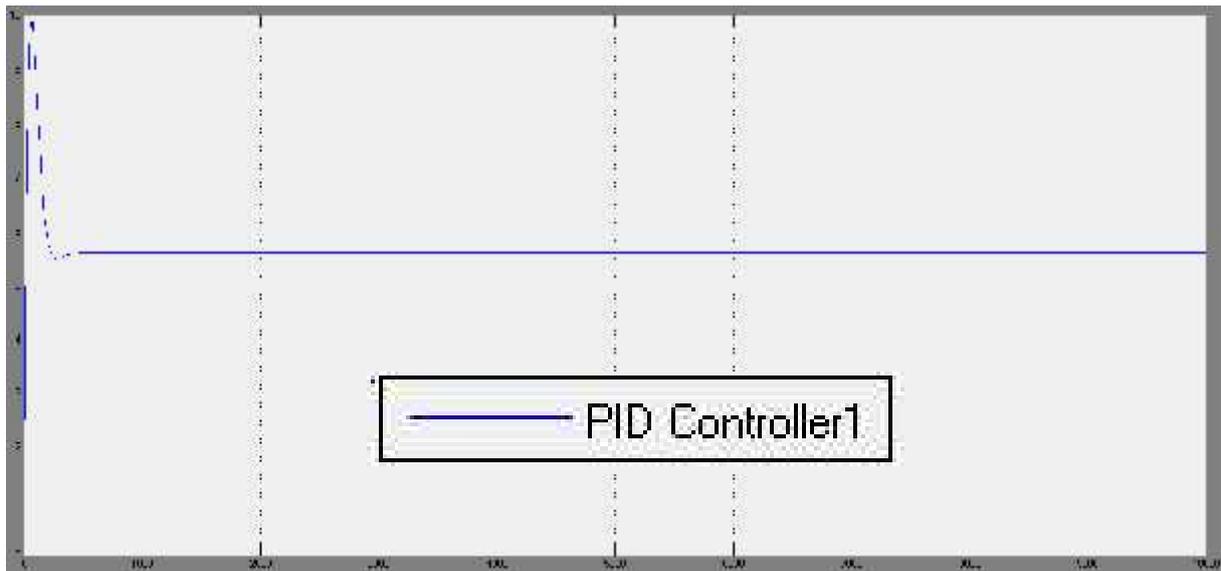


**Figure IV.29** : écart du système du gaz

La grandeur de l'action de commande des deux systèmes est représentée par la (Figure IV.30) et (Figure IV.31)



**Figure IV.30** : grandeur de l'action de la commande du système de la vapeur



**Figure IV.31:** grandeur de l'action de la commande du système du gaz

La réponse des systèmes vapeur et gaz est donnée par les graphes suivants (**Figure IV.32**) (**Figure IV.33**) :



**Figure IV.32 :** réponse du système de la vapeur



**Figure IV.33** : réponse du système du gaz naturel

Donc on obtient le rapport suivant (**Figure IV.34**)



**Figure IV.34**: Rapport vapeur/gaz

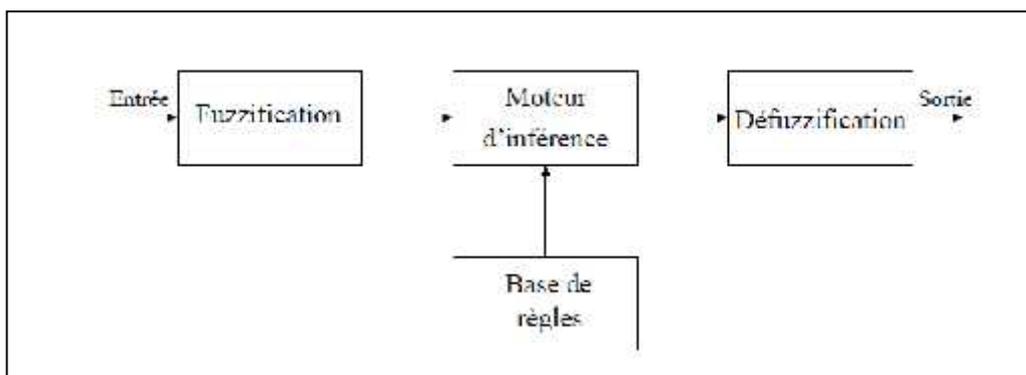
A partir de ces résultats obtenus, nous avons constaté que ; la commande classique a amélioré les performances du système de deux vannes, mais ne satisfait pas les exigences (temps de réponse, dépassement....).ce qui nécessite l'emploi d'une correction pour améliorer les performances

### IV.3 .2. La commande floue :

Avant de parler sur le régulateur Flou, nous indiquons qu'on fait appelle a la boite d'outil: **Fuzzy Logic Controller**, pour la conception de ce dernier. Trois étapes sans essentielle a fin de déterminer le comportement de notre régulateur.

On distingue classiquement trois parties dans la structure d'un contrôleur flou (**Figure IV.35**) :

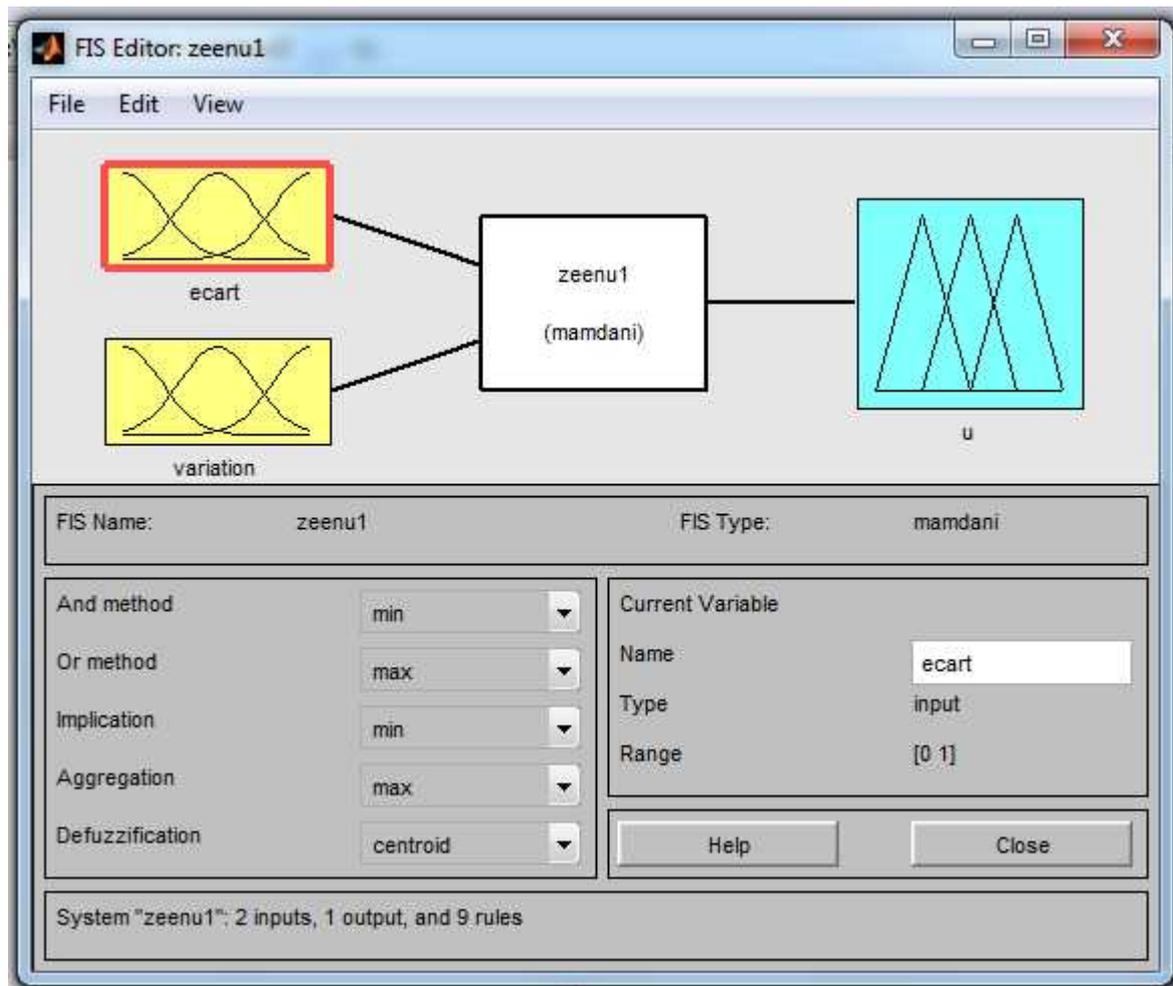
- La Fuzzification est l'étape qui permet de transformer une grandeur mesurée sur le processus en un ensemble flou
- le mécanisme de décision (traitement des prémisses, inférence, agrégation des règles).
- La Défuzzification est l'étape qui permet de transformer l'ensemble flou, obtenu par le calcul précédent, en une grandeur de commande à appliquer au processus.



**Figure IV.35** : Structure d'un régulateur flou

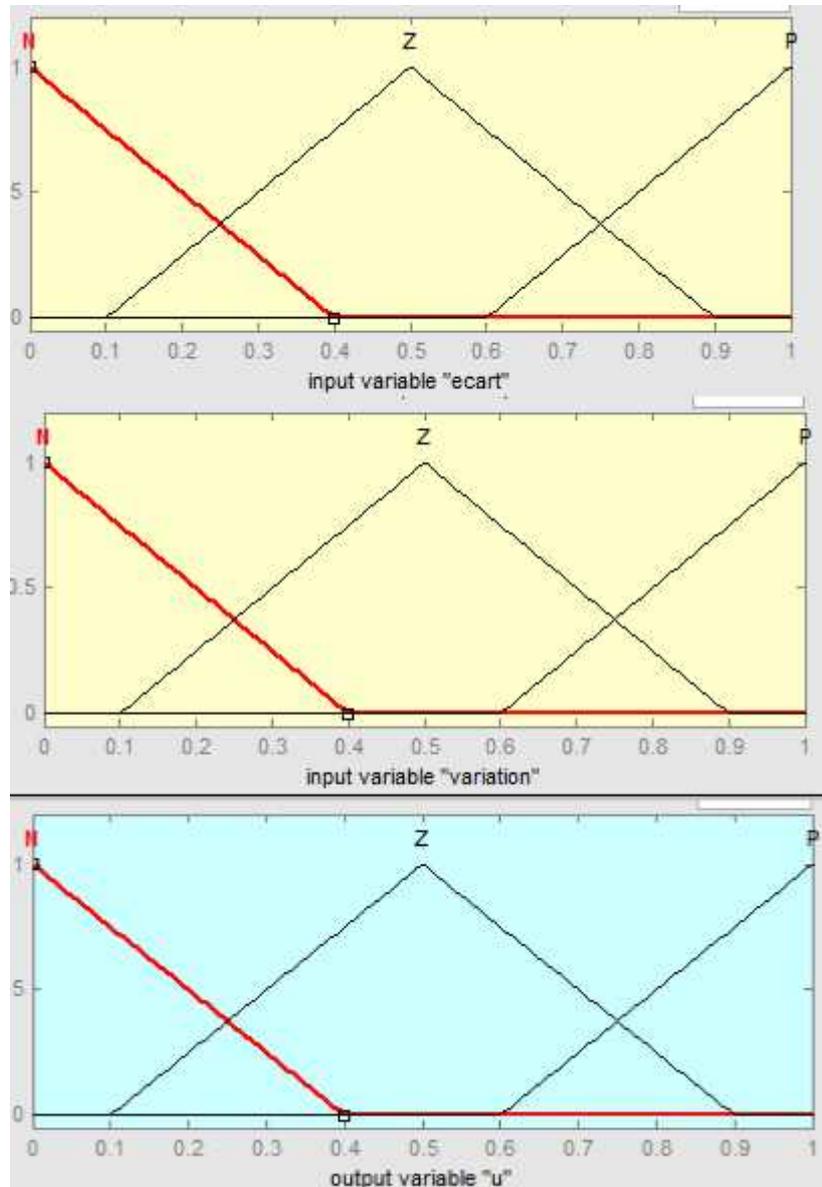
### IV.3.2.1. Fuzzification

Donc nous avons deux entrées (l'erreur ( $e$ ), la dérivée de l'erreur ( $\dot{e}$ )), et une sortie (ouverture de la vanne de vapeur, ou celle du gaz ( $u$ )) (**Figure IV.36**)



**Figure IV.36** : Fuzzy logic controller.

Dans cette partie, on définit les fonctions d'appartenance pour les variables d'entrées, cela consiste dans le choix du nombre des ensembles, de la forme et de la distribution des fonctions d'appartenances. Dans notre cas nous avons choisi trois fonctions d'appartenance pour chaque variable (Entrée/Sortie) avec la forme triangulaire. (**Figure IV.37**)



**Figure IV.37** : Fonction d'appartenance des différents variables

#### IV.3.2.2. Inférence

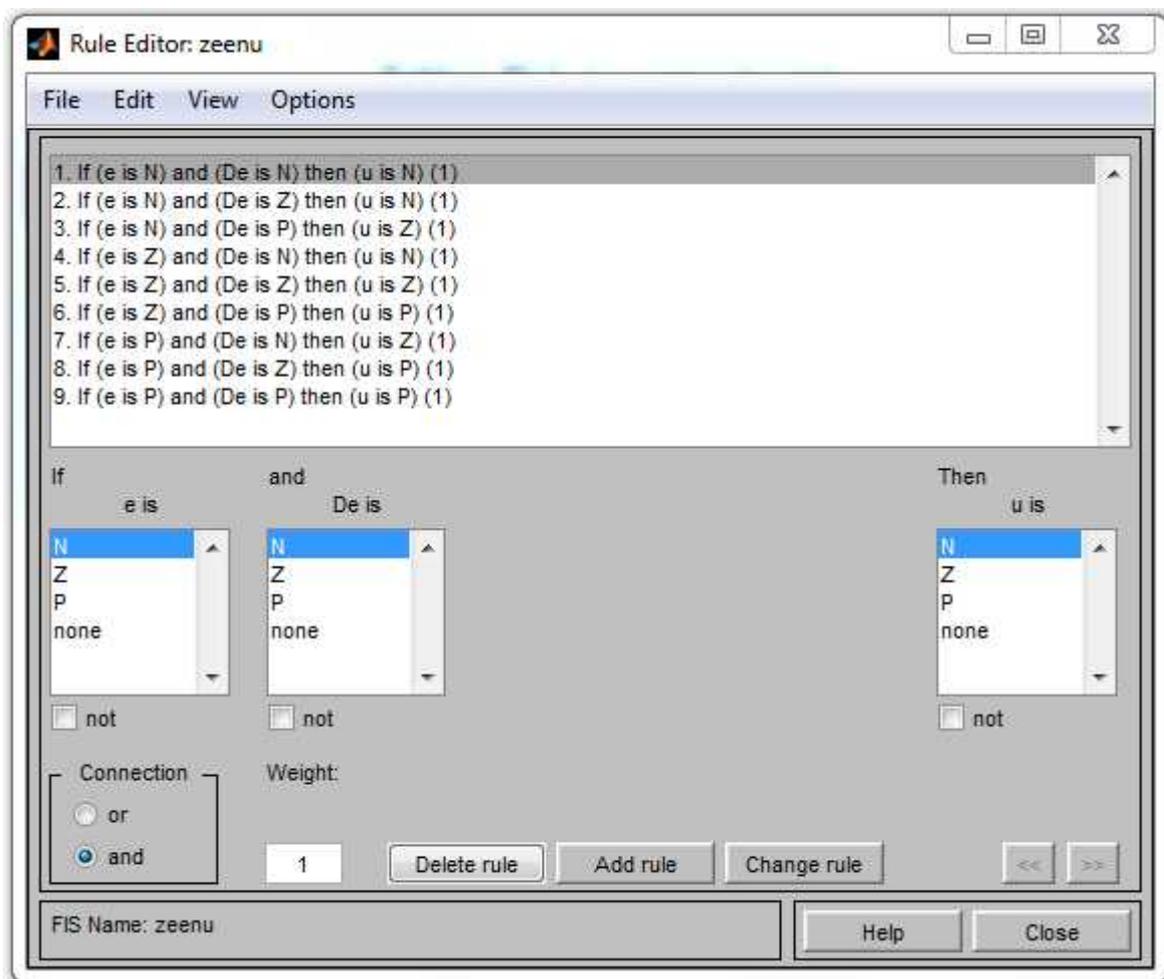
Cette partie représente le raisonnement de notre régulateur, c'est-à-dire le comportement du système dans plusieurs scénarios, bien-sûr en mettant des règles d'inférence. Dans ce cas on essayé de garder le rapport entre 3.5 à 4 qui représente le rapport idéale. (**Figure IV.38**)

Dans notre cas nous avons 9 lois d'inférence vu qu'on a trois fonctions d'appartenance a chaque entrée. Pour la méthode d'inférence, on utilise la méthode d'inférence Max-Min

La matrice des règles est :

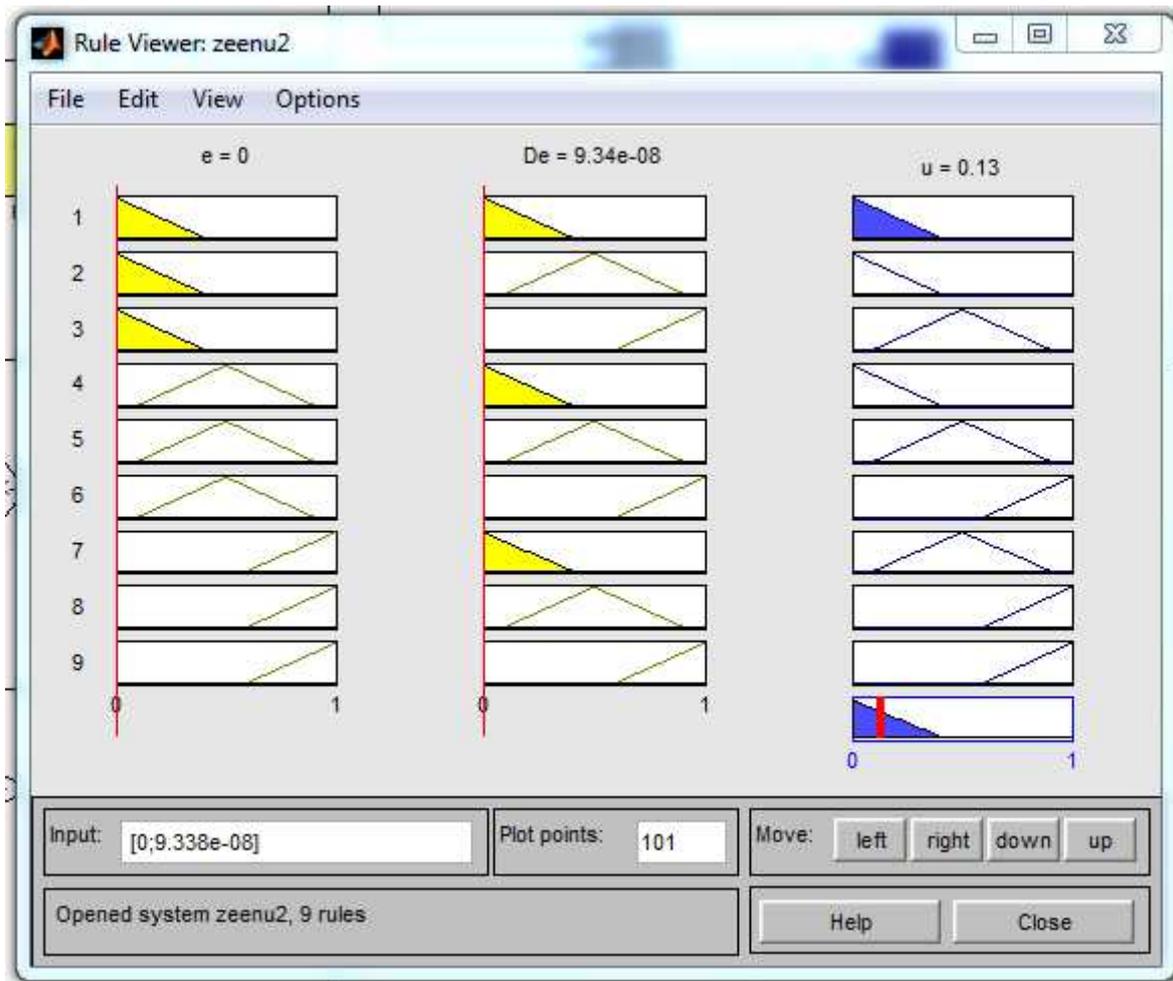
$\Delta e$ \ e	N	Z	P
N	N	N	Z
Z	N	Z	P
P	Z	P	P

**Tableau IV.1** : La matrice des règles



**Figure IV.38** : Lois et méthode d'inférence.

On lance la simulation, le régulateur exécute les étapes de calcul et nous affiche la fenêtre suivante (**Figure IV.39**)

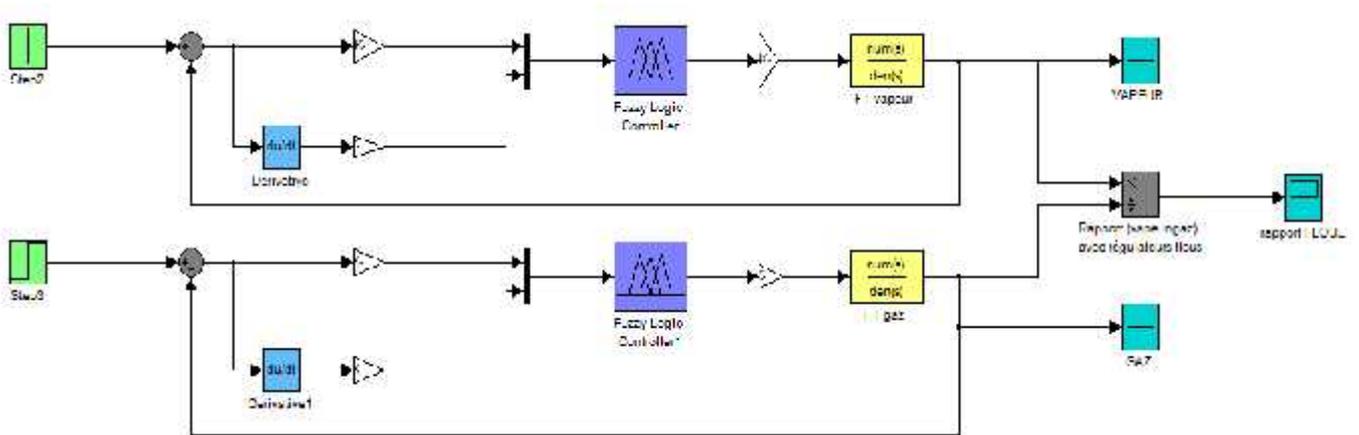


**Figure IV.39** : Résultat des calculs

#### IV.4.2.3. Déffuzification

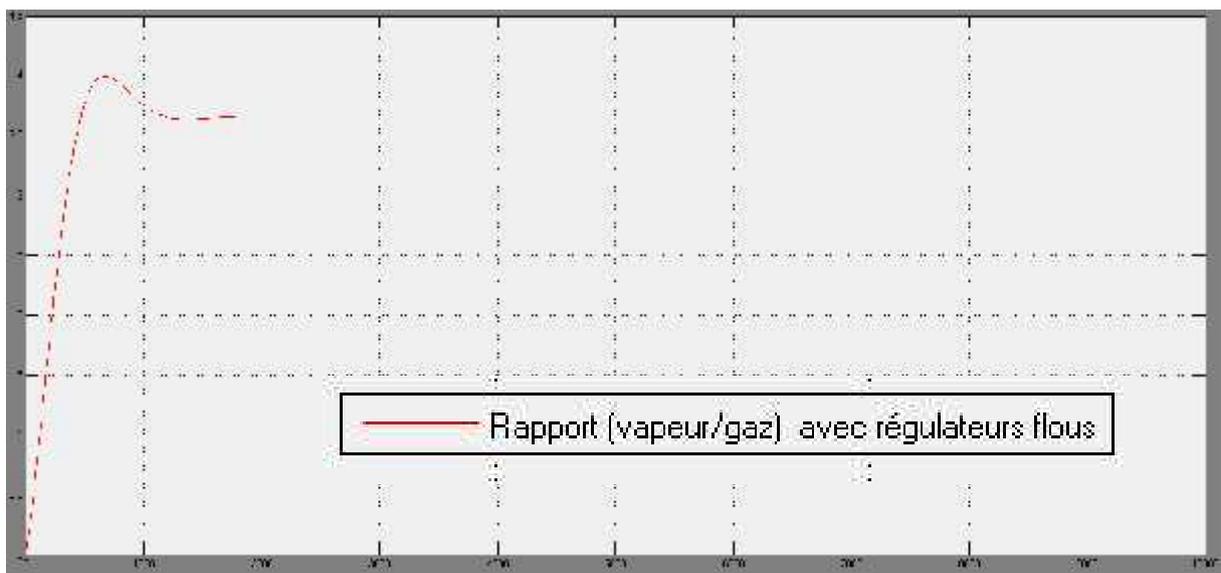
La méthode de Déffuzification utilisée est celle du centre de graviter, mais cette méthode nécessite un temps de calcul très important.

- Après ces trois étapes nous devons faire la structure des systèmes vapeur et gaz par les régulateurs flous sur simulink (**Figure IV.40**)



**Figure IV.40 :** systèmes de vapeur et gaz avec régulateurs flous

Cette structure nous donne le rapport (vapeur/ gaz) suivant (**Figure IV.41**)



**Figure IV.41 :** Illustration de la réponse indicielle du système de contrôle de rapport vapeur/gaz avec un régulateur flou

On constate que la commande floue donne des meilleurs résultats, ça réponse présente dépassement, un rapport vapeur /gaz très acceptable.

### IV.4. Comparaison entre les deux modes de commande

Maintenant nous allons faire une comparaison entre la régulation classique (**PID**), et la régulation intelligente (**logique floue**), nous avons la structure et le résultat suivant (**Figure IV.42**) :

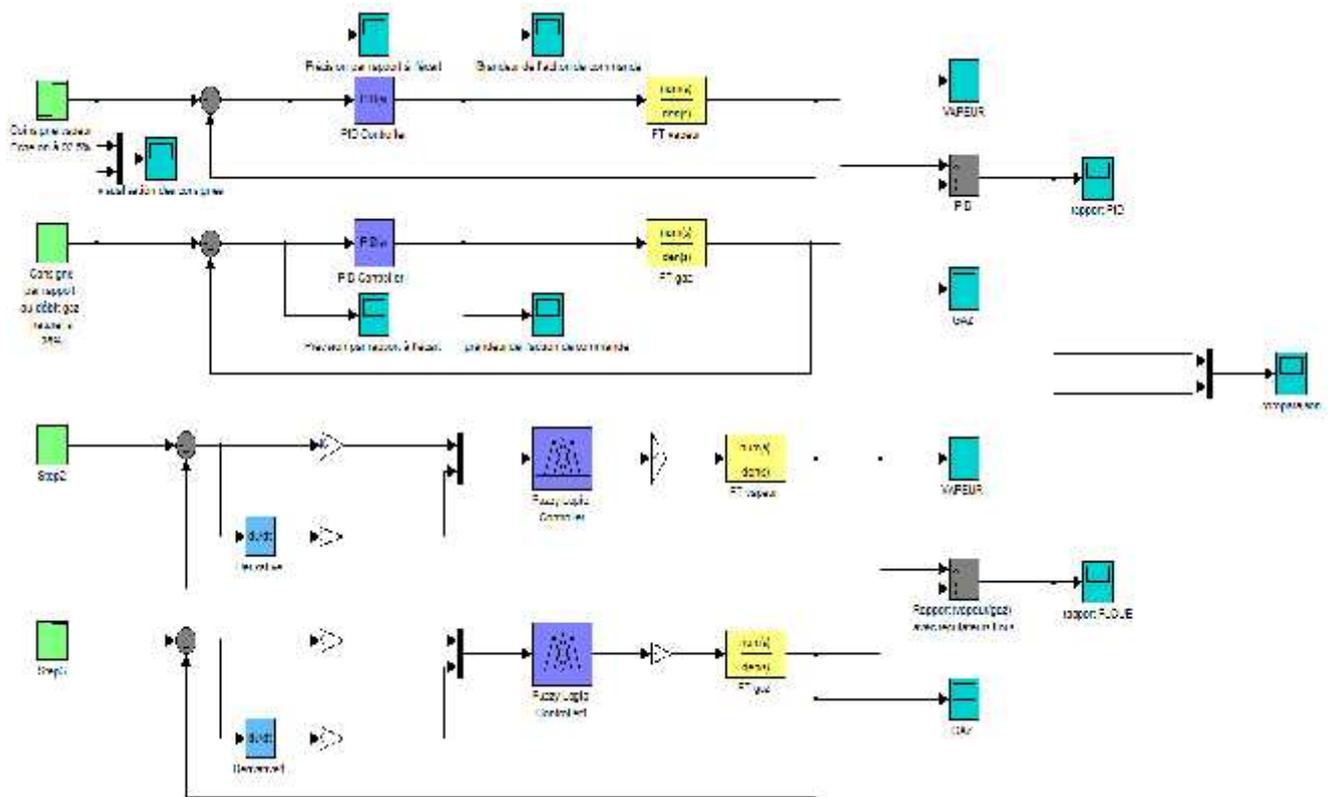


Figure IV.42 : Schéma de comparaison

On obtient le résultat suivant (**Figure IV.43**)

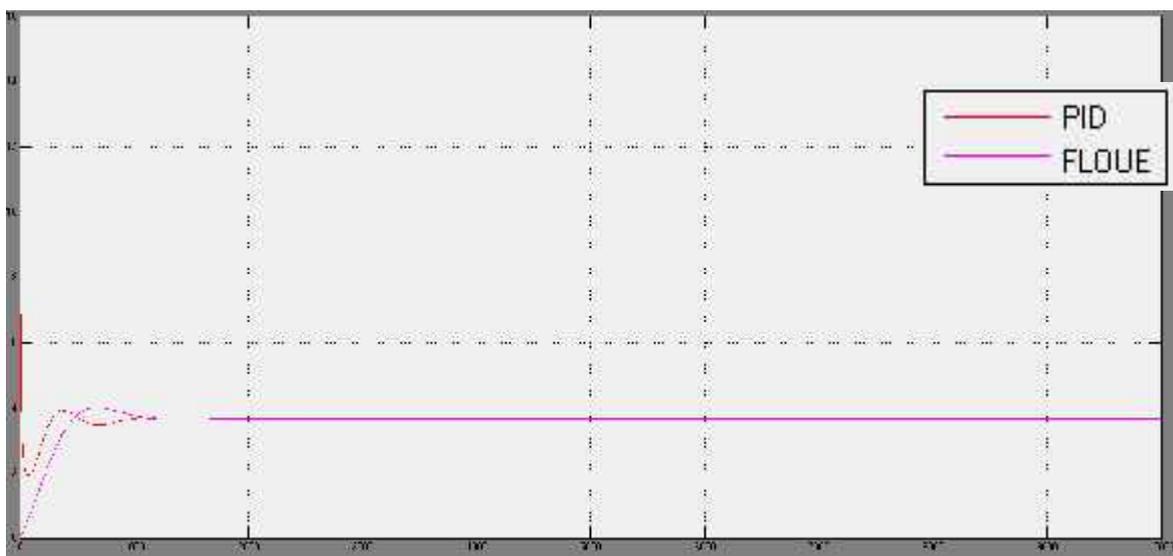


Figure IV.43 : Comparaison entre les méthodes de régulation.

On remarque que le rapport donné par le régulateur flou est le meilleur que celui du régulateur PID.

Le régulateur flou nous permet d'améliorer le rapport vapeur/gaz avec une valeur très acceptable.

## **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons proposé une technique de commande par logique floue pour la régulation de la vanne de vapeur et la vanne de gaz dont le but est d'obtenir de bonnes performances de fonctionnement du système tout en gardant le rapport de vapeur/gaz désiré .

D'après les résultats obtenus, on peut conclure que la commande par logique floue pour le réglage des systèmes de vapeur et de gaz par l'utilisation de régulateurs de type Mamdani donne de meilleures performances .

## Conclusion générale

Dans ce travail on a étudié un processus chimique plus complexe car la problématique posée concerne le contrôle et la commande d'un rapport entre un débit de gaz naturel et un autre débit de vapeur «  $R= V/G$  ». Cependant la conduite est manuelle, c'est à l'opérateur que revient la tâche ardue de stabiliser le processus de vapocraquage des gaz par un débit convenable en vapeur. Cette conduite peut avoir des incidences négatifs et du fait qu'on manipule des flux gazeux et vapeur à haute pression et température. Il ressort que la sécurité des intervenants humains et des installations est primordiale mais aussi il a un impact très important sur le plan sécurité du catalyseur et aussi sur la production.

De ce fait, la remise en marche de la boucle de régulation de rapport est une nécessité absolue. C'est cet objectif qui avait animée notre désir de résoudre ce problème épineux et qui nous a été posé par le service de régulation de l'unité. En foi de quoi, on pense par le biais de cette étude, qu'on a pu atteindre le but qui nous a été assigné à savoir la commande automatique de ce processus technique de séparation de gaz.

Ceci dit, on a réalisé l'étude technique comparative entre la conduite automatique par PID analogique classique et par la conduite par système expert dit fuzzy logique.

Dans les deux cas d'étude, les résultats semblent être acceptables mais toutefois il ressort ce qui suit :

Régulation	Dépassement	Temps de réponse	Observation
PID Classique	Trop important Au 1 <sup>er</sup> pic il est 16% et au 3 <sup>ème</sup> pic est de 0.5%	100secondes, environ 1mn 30s	Performances Acceptables ; Le régime transitoire est assez marqué Temps montée assez marqué
Contrôle Fuzzy	Absence	Environ 1mn30s	Meilleurs que le PID classique ; Rapide avec un temps de montée assez bref

Il en ressort que la première régulation classique de type (**PID**) souffre d'une perte de performance notamment durant le processus transitoire qui est caractérisée par un

dépassement marqué et un temps de montée important, comparé aux performances accrues du deuxième régulateur intelligent basé sur la logique floue qui donne de très bons résultats sur le plan de la robustesse et de la rapidité.

La réalisation de cette étude est riche, et nous a permis d'appliquer quelques divers outils didactiques que nous avons étudiés dans notre cursus universitaire, à savoir :

- Identification : Méthode ARX et ARMX ;
- Choix et calcul des paramètres d'ajustement du régulateur par ARX ;
- Implémentation d'un correcteur flou.

Au terme de cette humble étude, on laisse à l'aimable lecteur d'apporter des suggestions constructives pour la complémentation de celle-ci.

## ii. Anexe

### ii.1. Présentation de l'entreprise :

Fertial en tant que EPE/SPA a été créée le 01/03/2001, le 04/08/2005 Fertial a été organisé sous la forme d'une société par actions (SPA) : 66% pour le groupe espagnol Vilar Mir, 34% pour ASMIDAL.-Fertial-Algérie qui représente un capital social de 17.697.000.00000 DA, ou le siège social de la direction est situé à la plate forme ANNABA route des salines-BP3088. Il y a deux pôles industriels:

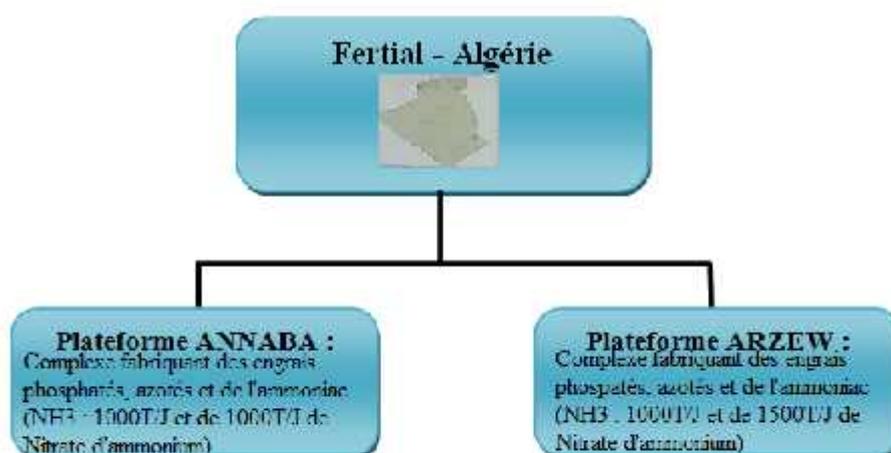


Figure i.1: Emplacement de FERTIAL en Algérie

### ii.2. PRESENTATION DE LA PLATFORME- ANNABA

Elle est dirigée par un directeur et emploie environ 800 travailleurs répartis comme suit: - Cadres supérieures : aux environs de 50.

-Cadres: aux environs de 350.

-Maitrises: aux environs de 400.

Dans le complexe, il a lieu de distinguer deux zones ; la zone sud qui comprend les anciens ateliers dont le démarrage remonte à 1972 «engrais phosphatés » et la zone Nord « Engrais azotés» qui comprend les ateliers dit nouveaux et le démarrage remonte à 1982.

**a. ZONE SUD:** «Engrais phosphatés»: Composé de trois ateliers principaux :

- Atelier d'engrais: NPK et UAN liquide.
- Ateliers super simple phosphate: SSP.
- Centrale utilités 1.

**b. ZONE NORD:** «Engrais azotés»: cette zone comprend également cinq ensembles:

- Atelier acide nitrique
  - Atelier nitrate d'ammonium
  - Atelier d'ammoniac (NI-13)
  - L'installation de manutention et de stockage.
  - Centrale utilités 2.

### **ii.3. Les unités**

- a. Unité Acide Nitrique.
- b. Unité Nitrate d'Ammonium.
- c. Unité SSP : destiné pour fabriquer deux types d'engrais SSP (simple super phosphate) et TSP
- d. (Triple simple phosphate).
- e. Unité NPK.
- f. Unité d'ammoniac (qui est bien détailler dans ce chapitre).

### **ii.4. LES OBJECTIFS DE L'ENTREPRISE**

- a. Dans le cadre national du développement économique et social du pays, l'entreprise est
- b. chargée de :
- c. Promouvoir et développer l'industrie des engrais et produits phytosanitaires.

d. Exploiter gérer et rentabiliser les moyens humains, matériels et financiers dont elle dispose.

e. En vue de satisfaire les besoins du marché national et international.

f. Favoriser l'épanouissement de l'esprit d'imagination et l'initiative et faire appel aux moyens locaux.

g. Développer la coopération dans le cadre de la politique nationale en la matière.

<b>Production</b>	<b>Pays</b>
<b>-NH<sub>3</sub></b>	-Espagne ;France ;Italie ;Grèce ;Belgique ;Cuba ;Gr Bretagne
<b>-Nitrate</b>	-Tunisie ; Maroc
<b>-VAN</b>	-France ; Espagne ; USA
<b>-SSP</b>	-Maroc ; Grèce ; France ; Italie ; Brésil

**Tableau i.1** :L'exportation des productions

# Bibliographie

[1] Techniques de l'ingénieur l'article: J6135.

[12] [http://www.mocis-lagis.fr/wp-content/uploads/2011/10/IDENTIFICATION-DES-SYSTEMES\\_2012-Mode-de-compatibilité5](http://www.mocis-lagis.fr/wp-content/uploads/2011/10/IDENTIFICATION-DES-SYSTEMES_2012-Mode-de-compatibilité5).

[3] Techniques de l'ingénieur l'article : S7140.

[4] Mémoire de Magister. Thème: Identification des systèmes non-linéaire : Application au cas systèmes d'ordre non-entier. Univéristé Mouloud Maamri. Tizi Ouezou.

[5] Identification de modèles paramétriques à temps continu. Méthodes, outil logiciel et avantages. Hugues Garnier, Marion Gilson, Thierry Bastogne.

[6] Identification des Systèmes Linéaires. Amine, HADJ ABDELKADER. Octobre 2007. Université de Tlemcen.

[7] Identification des systèmes linéaires G. Laurent 2009.

[8] Automatique / Régulation. Cours. Institut National des sciences Appliquées de Lyon. Edition 2008. J.M.RETIF.

[9] Instrumentation et régulation en 30 fiches. Patrick Prouvost Agrégé en génie mécanique au Lycée Val de Marigny à Reims.

[10] Réponse temporelle des systèmes dynamique continus LTI. Cours 2. INSA Rouen.

[11] Perry's CHEMICAL ENGINEERS'. Handbook. Chapitre 08. Process Control. Fuzzy Logic control.

[12] <http://vwww.ferdinandpiette.com/blog/2011/08/1a-logique-floue-interets-et-limites/> .

[13] Techniques de l'ingénieur l'article: R7032.