

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou



Faculté De Génie Electrique Et D'informatique
DEPARTEMENT D'AUTOMATIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE

Spécialité : **Automatique et Informatique
Industrielle**

Présenté par
**Radja Djamel
Sadoudi Hamid**

Mémoire dirigé par **M. Bensidhoum** et co-dirigé par **M. Youssouf Bibi**

Thème

Conception d'un approximateur flou de la température de combustion de la turbine à gaz MS5002C

Mémoire soutenu publiquement le 12/07/2018 devant le jury composé de :

M Diche arezki

MAA, UMMTO, Président

M Bensidhoum Mohand Outahar

MCA, UMMTO, Encadreur

M^{me} Boukendour Ouiza

MAA, UMMTO, Examinatrice

M^{me} Chilali Ouerdia

MCB, UMMTO, Examinatrice

Projet réalisé à SH /DP OHANET ILIZI

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la A Recherche Scientifique

Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou



Faculté de Génie Electrique et d'Informatique
Département d'Automatique

**Mémoire de Fin d'Etude
de MASTER ACADEMIQUE
Spécialité : Automatique**

Présenté par
**Kaddour MOHAND KACI
Mohand ADDELLALI**

Mémoire dirigé par **Xavier ROBERT** et co-dirigé par **Prénoms NOM**

Thème

**Ecrire le thème sans modifier ni la police
ni la taille des caractères. Eviter de
modifier l'ensemble de cette page.
N'ajouter ni logo ni rubrique ni couleurs**

Mémoire soutenu publiquement le 24 juin 2014 devant le jury composé de :

M. Nacer BENNAMROUCHE

Pr, UMMTO, Président

M. Abdellah SID ELHAOURI

MA CArade, Lieu d'exercice, Rapporteur

M Prénom NOM

Grade, Lieu d'exercice, Examineur

M Prénom NOM

Grade, Lieu d'exercice, Examineur

Projet réalisé à SH /DP OHANET ILIZI

Remerciements

Nous remercions tout d'abord ALLAH le tout puissant pour nous avoir donné la force, la santé, et la patience pour arriver là où nous sommes.

Nous tenons également, à exprimer nos forts remerciements à notre encadreur, Monsieur BEN SIDHOUM ainsi que Monsieur bibi pour leur accueil, ses conseils et leur aide, et qui ont mis à notre disposition tous les nécessaires pour réaliser ce travail.

Nous remercions les membres de jurys qui ont bien voulu accepter d'examiner ce mémoire et à cet égards nous leurs présentons nos profonds respects, et notre grande gratitude.

Nous rendons grâce à tous les enseignants du département Automatique, qui nous ont suivis durant notre cursus, et tous ceux qui ont contribué, à ce que ce travail prenne forme.

Nous exprimons aussi nos remerciements à tout le personnel du SERVICE INSTRUMENTATION SH/DP OHANET.

Nous tenons à remercier : nos parents et tous nos amis, pour leur pensé et leur soutien tout le temps de travail.

Dédicaces

Avec un énorme plaisir, un cœur ouvert et une immense joie, que je dédie mon travail à mes très chers, respectueux et magnifiques parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.

A mes deux frères saïd et krïmo, mes sœurs, pour leurs appuis et leur encouragement.

*A tous mes amis et toute ma promotion, et en particulier essaïd chïbane et mon Co-promoteur youssouf bibi et djafour lounes
Allek mouloud pour leur aide et mon binôme hamid.*

A tous ce qui de loin ou de près n'ont pas cessé de m'apporter leur soutien, pendant mes années d'études.

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible.

DJAMEL

Dédicaces

Avec un énorme plaisir, un cœur ouvert et une immense joie, que je dédie mon travail à mes très chers, respectueux et magnifiques parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.

A mes frères et mes sœurs, pour leurs appuis et leur encouragement.

A tous mes amis et toute ma promotion, et en particulier A tous mes amis et toute ma promotion, et en particulier essaïd chibane et mon Co-promoteur youssouf bibi et djafour lounes Allék mouloud pour leur aide et mon binôme djamel.

A tous ce qui de loin ou de près n'ont pas cessé de m'apporter leur soutien, pendant mes années d'études.

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible.

HAMID

Abréviations

T: Température

CPD: Compressor Pressure Discharge

CTDA: Compressor Temperature Discharge

IONET: Input Output Network

ARCnet: Attached Resource Computer Network

DENet: Data Exchange Network

DCS: Distributed Control System

TMR : Triple Modular Redundant

SIFT: Software Implemented Fault Tolerance

TC: Thermocouple

SRV: Stop/Speed Ratio Valve

GCV: Gas Control Valve

FSR: Fuel Stroke Reference

IGV: Inlet Guide Vane

NGV: Nozzle Guide Vane

LEL: Low Explosive Limit

HMI: Human-Machine Interface

ESD: Emergency Shut Down

CPF: Central Processing Facility

GNL: Gaz Naturel Liquéfié

GPL : Gaz de Pétrole Liquéfié

HP : Haute Pression

BP : Basse Pression

TTXM : température d'échappement de la turbine

N-P : Nuovo Pignone

Listes des figures

Chapitre I

Présentation de la région d'Ohanet

| | |
|--|---|
| Figure I.1 : Emplacements de l'unité huile et les puits..... | 3 |
| Figure I.2 : Situation d'OHANET en ALGERIE..... | 4 |
| Figure I.3 : Emplacements de l'usine à gaz et les puits..... | 5 |
| Figure I.4 : Vue de l'usine d'OHANET..... | 7 |
| Figure I.5 : Schéma global d'écoulement du gaz..... | 8 |
| Figure I.6 : Organigramme structurel de la région OHANET..... | 9 |

Chapitre II

Généralité sur les turbine a gaz MS5002C

| | |
|--|----|
| Figure II.1 : Les types de la turbine..... | 13 |
| Figure II.2 : Les sections de la turbine à gaz..... | 14 |
| Figure II.3 : Filtre autonettoyant..... | 15 |
| Figure II.4 : Filtre conventionnel..... | 15 |
| Figure II.5 : Le compresseur axial rotor et stator..... | 16 |
| Figure II.6 : Le rotor du compresseur axial..... | 17 |
| Figure II.7 : Chambre de combustion..... | 17 |
| Figure II.8 : Schémas de placement des chambres de combustion..... | 18 |
| Figure II.9 : Refroidissement et dilution des gaz chauds de la chambre de combustion..... | 19 |
| Figure II.10 : Pièce de transition des gaz chauds..... | 20 |
| Figure II.11 : Les deux roues de la turbine à gaz..... | 21 |
| Figure II.12 : Les Nozzle 1ère étage..... | 21 |
| Figure II.13 Nozzle 2 ème étage et mécanisme de variation. | 22 |
| Figure : II.14 : Les paliers..... | 22 |
| Figure II.15 : L' échappement de la turbine. | 23 |
| Figure II.16 : Le système de lubrification de la turbine..... | 24 |
| Figure II.17 : Les auxiliaires de la turbine..... | 26 |

Listes des figures

| | |
|--|----|
| Figure II.18 : Les auxiliaires de démarrage..... | 27 |
| Figure II.19 : Les auxiliaires de la turbine..... | 28 |
| Figure II.20 : Engrenage des accessoires (Gearbox) | 29 |
| Figure II.21 : Listes des signaux a vérifiés pour le démarrage..... | 30 |

Chapitre III

Système de commande de la turbine a gaz MS5002C

| | |
|--|----|
| Figure III.1 : structure d'un système automatisé..... | 32 |
| Figure III.2 : Panneau de commande Mark V TMR SPEEDTRONIC..... | 34 |
| Figure III.3 : L'interface opérateur au niveau de l'HMI..... | 36 |
| Figure III.4 : Philosophie de contrôle de la turbine à gaz..... | 37 |
| Figure III.5 : Principe de sélection des boucles de contrôle. | 38 |
| Figure III.6 : Emplacement des thermocouples de la température de l'échappement..... | 39 |
| Figure III.7 : Disposition des T/C par rapport aux chambres de combustion..... | 39 |
| Figure III.8 : Courbe de contrôle de la température..... | 40 |
| Figure III.9 : Variation de la référence température et du cycle thermodynamique..... | 41 |
| Figure III.10 : Boucle de contrôle de température..... | 42 |
| Figure III.11 : boucles de contrôle de MARK V TMR SPEEDTRONIC..... | 43 |
| Figure III.12 : Le système de contrôle d'alimentation en gaz combustible..... | 44 |
| Figure III.13 : Boucle de commande de l'électrovanne 20HD..... | 46 |
| Figure III.14 : Système mécanique de protection contre la survitesse..... | 47 |
| Figure III.15 : Bently Nevada 3500..... | 48 |

Chapitre IV

La logique flou

| | |
|--|----|
| Figure IV.1 Comparaison entre la logique classique et la logique floue..... | 51 |
| Figure IV.2 : Exemple d'un ensemble flou. | 51 |
| Figure IV.3 : Formes des fonctions d'appartenances les plus utilisées..... | 52 |

Listes des figures

| | |
|---|----|
| Figure IV.4 : Variable linguistique décrivant le dimensionnement d'un pilier. | 52 |
| Figure IV.5 : Partition floue d'un univers de discours. | 53 |
| Figure IV.6 : L'union des sous ensembles flous petite OU moyenne. | 54 |
| Figure IV.7 : L'intersection des sous-ensembles flous petite ET moyenne. | 54 |
| Figure IV.8 : Le complément d'un sous-ensemble flou des personnes petites. | 55 |
| Figure IV.9 : Traitement de l'information par la logique floue. | 55 |
| Figure IV.10 : Exemple de fuzzification. | 56 |
| Figure. IV.11 : Exemple de forme linguistique..... | 56 |
| Figure IV.12 Exemple d'inférence Max-produit. | 57 |
| Figure IV.13 : Exemple d'inférence Max-min..... | 58 |
| Figure IV.14 : Exemple d'inférence Somme-Produit. | 58 |
| Figure IV.15 : Exemple de la méthode moyenne des maximums. | 59 |
| Figure IV.16 : Exemple de la méthode du centre de gravité. | 59 |
| Figure IV.17 : Les étapes de conception du contrôleur..... | 60 |
| Figure IV. 18 : Schéma en boucle fermée..... | 61 |
| Figure IV. 19 : Configuration du correcteur flou..... | 62 |
| Figure IV.20 : Configuration des ensembles d'entrée..... | 62 |
| Figure IV.21 : Les paramètres des fonctions d'appartenances de la sortie..... | 63 |
| Figure IV.22 : Configuration des règles..... | 63 |
| Figure IV.23 : Bloc de simulation..... | 64 |
| Figure IV.24 : Simulation du système avec les trois correcteurs..... | 64 |

Chapitre V

Conception de l'estimateur flou

| | |
|--|----|
| Figure V.1 : Écarts-types et les centres des fonctions d'appartenance pour le PCD..... | 71 |
| Figure V.2 : Fonctions d'appartenance du PCD..... | 72 |
| Figure V.3 : Écarts-types et les centres des fonctions d'appartenance pour le TTXM..... | 72 |
| Figure V.4 : les fonctions d'appartenance du TTXM..... | 73 |

Listes des figures

| | |
|--|----|
| Figure V.5 : Inférences du système..... | 73 |
| Figure V.6 : Diffuzzification du système..... | 74 |
| Figure V.7 : Schéma bloc des deux systèmes..... | 74 |
| Figure V.8 : Sortie TF des deux systèmes..... | 75 |
| Figure V.9 : Adaptations du système flou..... | 75 |
| Figure V.10 : Schéma bloc de simulation sans les adaptations..... | 76 |
| Figure V.11 : Paramétrage des réadaptations (ligne 141) | 76 |
| Figure V.12 : Sortie des deux systèmes après la réadaptation..... | 77 |

Introduction générale

La turbine à gaz a connu ces dernières années un développement considérable dans de nombreuses applications industrielles, et en particulier dans le domaine du transport du gaz, où elle est conçue avec deux lignes d'arbres et accouplée à un compresseur centrifuge.

Elle offre une grande souplesse d'exploitation. L'évolution de la machine et son succès ont été conditionnés par l'amélioration des performances techniques des turbines et des compresseurs.

La turbine à gaz demeure l'un des moyens de production de puissance les plus révolutionnaires, son invention a permis aux ingénieurs d'atteindre des niveaux de puissance qui ne sont jamais égaux avec des moteurs thermiques conventionnels.

L'utilisation de ce mode de production de puissance est très répandue dans différents domaines d'activité, en passant par la production de l'électricité, la propulsion aéronautique, la pétrochimie jusqu'à l'industrie pétrolière et gazière, compte tenu de la facilité d'adaptation, et une large gamme de régimes de fonctionnement.

Des nombreux progrès ont été réalisés ces dernières années sur le développement des turbines à gaz, ces améliorations dues essentiellement à l'avènement des technologies de pointes qui ont permis de diversifier la gamme des turbines à gaz et d'étendre leurs champs d'application.

Ils ont ainsi conduit à une augmentation de la durée de vie, à l'allongement des intervalles d'entretiens et l'amélioration du rendement.

Dans ce but, on va étudier la turbine à gaz MS5002C à fin de comprendre le système d'acquisition de la température de combustion (FSRT), dont le constructeur n' a pas donné son programme ou son modèle .

Pour cela, nous proposons une autre alternative pour ce système qui est basée sur la logique floue qui va nous assurés la même acquisition de la température aux niveaux des chambres de combustion.

Notre travail est divisé en quatre parties :

- Présentation de la région d'ohane.
- Généralités et description de la turbines à gaz MS5002C

- Système de commande de la turbine à gaz MS5002C
- Logique floue
- Conception de l'approximateur flou de la température de combustion

En outre, ce mémoire comporte aussi, introduction, conclusion générale, références bibliographiques.

I.1 Introduction

L'Algérie compte un potentiel d'hydrocarbures d'une importance capitale dans sa région Saharienne en matière de GAZ et de PETROLE. Juste après la nationalisation des hydrocarbures (24 Février 1971), l'initiative de l'extraction et l'exploitation de ces richesses ont été entreprises par SONATRACH et par d'autres sociétés étrangères en collaboration avec celle-ci.

L'extraction des hydrocarbures, étant complexe, est assurée par des installations et des dispositifs qui évoluent d'une manière synchrone avec l'évolution de la technologie afin d'optimiser le temps et le coût des opérations.

A nos jours, la technologie met en œuvre des techniques croissantes sans cesse pour gérer la production et réduire considérablement les facteurs de risques liés aux hydrocarbures.

L'exploitation des installations de traitement de gaz, permet la production de grandes quantités d'hydrocarbures dont une partie est transformée en d'autres formes d'énergie telle que l'électricité.

Parmi les plus importants gisements que comptent le Sud du pays, le champ d'OHANET.

Dans ce chapitre, nous allons présenter la région OHANET (huile, gaz) et nous allons citer les différentes unités du CPF pour le traitement du gaz naturel.

Puis, nous allons voir l'organisation de la région et les différents services de la division maintenance.

I.2 Création de la région

La Direction Régionale Ohanet a été créée en 1977, suite à la décentralisation de l'ancien district d'In-Amenas.

Les plus importantes tâches essentielles dévolues à la Direction Régionale sont :

- La conduite des opérations de production du pétrole brut avec les supports techniques et logistiques propres à la Région.

Chapitre I : Présentation de la région Ohanet

- Le suivi et la réalisation des travaux de développement des différents gisements.
- La gestion et l'exploitation des champs pétroliers (figure I.1) rattachés à la Région :
- **Ohanet Nord et Sud** : découvert en 1960 par l'intermédiaire du forage du puits Ohanet 101, foré par la compagnie d'exploitation pétrolière (CEP), il était mis en exploitation en 1962.
- **Timedratine et Timedratine Est** : situé à 30Km au sud du champ d'Ohanet, il fut découvert vers la fin de 1964, la production a débuté en juillet 1965.
- **Acheb et Acheb ouest-kreb** : le champ d'Acheb a été découvert en 1963 situé à 40Km au Sud-est d'Ohanet, 50Km au Nord-Ouest d'In Amenas et 54 Km au Sud-ouest d'Ohanet, sa date de mise en production mai 1966.
- **Askarène** : situé à 10 km à l'Est du champ d'Ohanet, il fut découvert en janvier 1962 par le forage AK101. Son exploitation a débuté en janvier 1962.
- **Guelta** : se trouvant à environ 30 km à l'Est du champ d'Ohanet, il fut découvert en août 1962 avec le forage du puits Guelta101. Sa date de mise en exploitation octobre 1962.
- **Edeyen** : le champ d'Edeyen est situé à 100 km au Sud-ouest d'Ohanet, il fut découvert en septembre 1964 et mis en production le 14 juillet 1974.

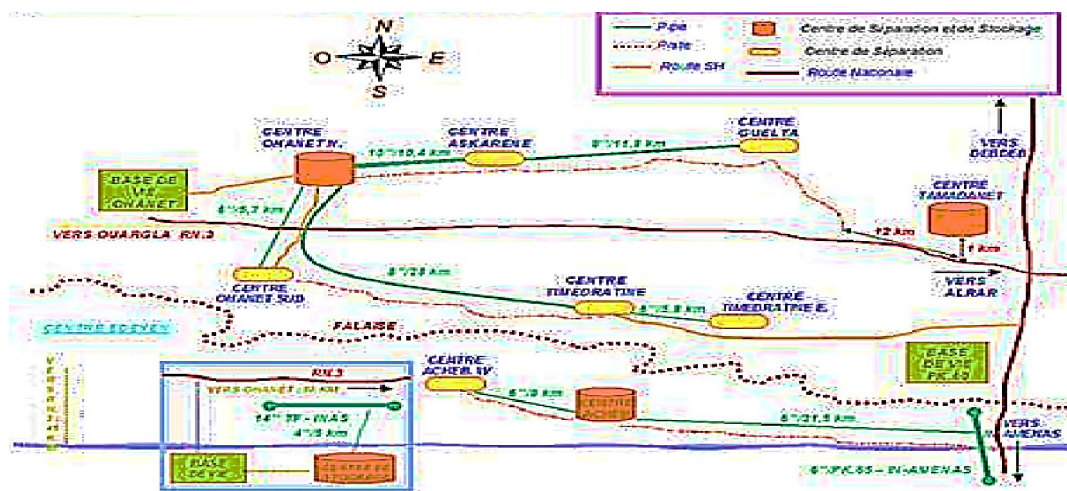


Figure I.1 : Emplacements de l'unité huile et les puits.

I.3 Situation géographique d'ohanet

La Région OHANET est située à 1500 kms au Sud Sud-est d'Alger, à 700 kms au Sud-est d'Ouargla sur le plateau de TINHERT et à 360 kms au Nord-est d'Ilizi (figure I.2), dont elle relève administrativement et elle est à 120 kms au Nord-Ouest d'IN-AMENAS.

Le climat, de type saharien, se caractérise par de fortes variations de températures. On distingue trois périodes :

- Une période chaude allant de mi-mai à mi-septembre avec des températures de 35°C à 50°C.
- Une période froide où le thermomètre peut descendre jusqu'à - 2°C (Décembre - Janvier).
- Il existe aussi, une période intermédiaire allant de Novembre à Avril où les températures deviennent plutôt douces de 15 à 25° C.

La pluviométrie y est rare, quelques pluies peuvent être enregistrées de Novembre à Février et des orages au mois d'Avril et Mai.

Les vents dominants sont de direction Nord Nord-est et Sud Sud-est, soufflent du mois de Février à Juin et engendrent souvent des tempêtes de sable.

L'accès y est facile puisque notre Région est située à proximité de la route nationale (R.N. 3).



Figure I.2 : Situation d'OHANET en ALGERIE.

I.4 Présentation générale du complexe de gaz

Dans le cadre du plan de développement de la région, SONATRACH et le Groupe AUSTRALIEN BROKEN HILL PROPRIETARY (BHP) associé aux compagnies JOOG (JAPAN) et PETROFAX (USA) ont procédé en Juillet 2000, à la signature d'un contrat de développement et d'exploitation des gisements d'OHANET.

Le contrat de type service à risques porte sur le développement et l'exploitation des réserves de gaz naturel en vue de la production des **GPL**, **condensat** et **gaz sec**.

L'usine de traitement de gaz d'OHANET est conçue pour traiter environ 20 millions Sm³ par jour de gaz de réservoir humide.

Quatre réservoirs de gaz humide (figure I.3):

- Dévonien ouest de DIMETA 0.22 trillions de m³.
- Dévonien d'IN ADAOUI 0.01 trillions de m³.
- Dévonien d'OHANET (couverture de gaz) combiné pour donner un total de 10 MMscm³/j 0.15 trillions de m³.
- Ordovicien d'OHANET 10 MMscm³/j (contenant 3,4% CO₂) 0.47 trillions de m³.

Fournissent jusqu'à 47 puits pendant la durée de vie du projet. Au démarrage, 34 puits seront utilisés. Certains des puits existent déjà et seront complétés à nouveau pour la production.

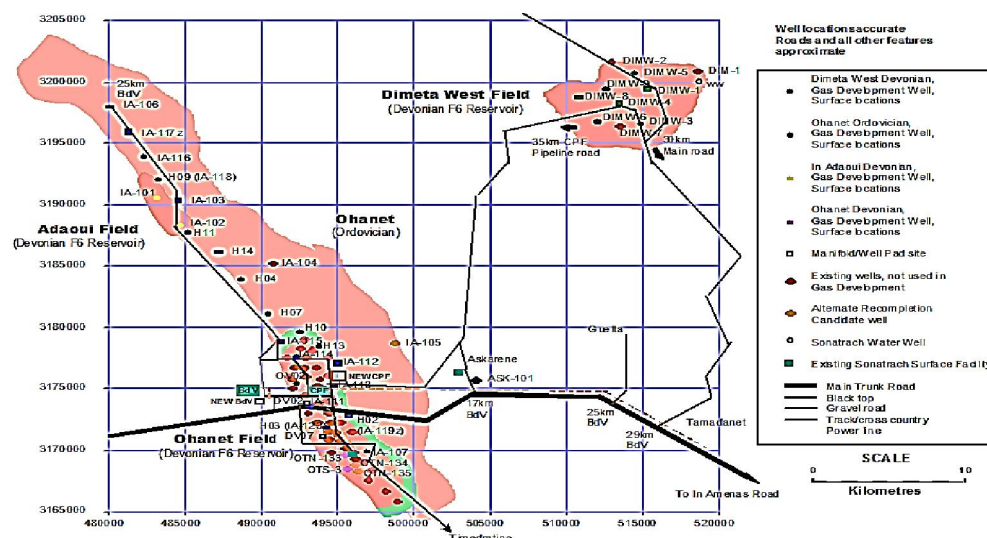


Figure I.3 : Emplacements de l'usine à gaz et les puits.

I.4.1 Les unités de L'usine

Le CPF se compose de plusieurs unités pour assurer le bon traitement du gaz (figure I.4) :

- **Unité 300** : Système d'entrée et installations communes contiennent deux compresseurs boosters, chacun d'une capacité moyenne de $10\text{MSm}^3/\text{J}$.
- **Unité 100 et 200** : Deux trains de traitement de gaz, chacun d'une capacité de $10\text{MSm}^3/\text{J}$.

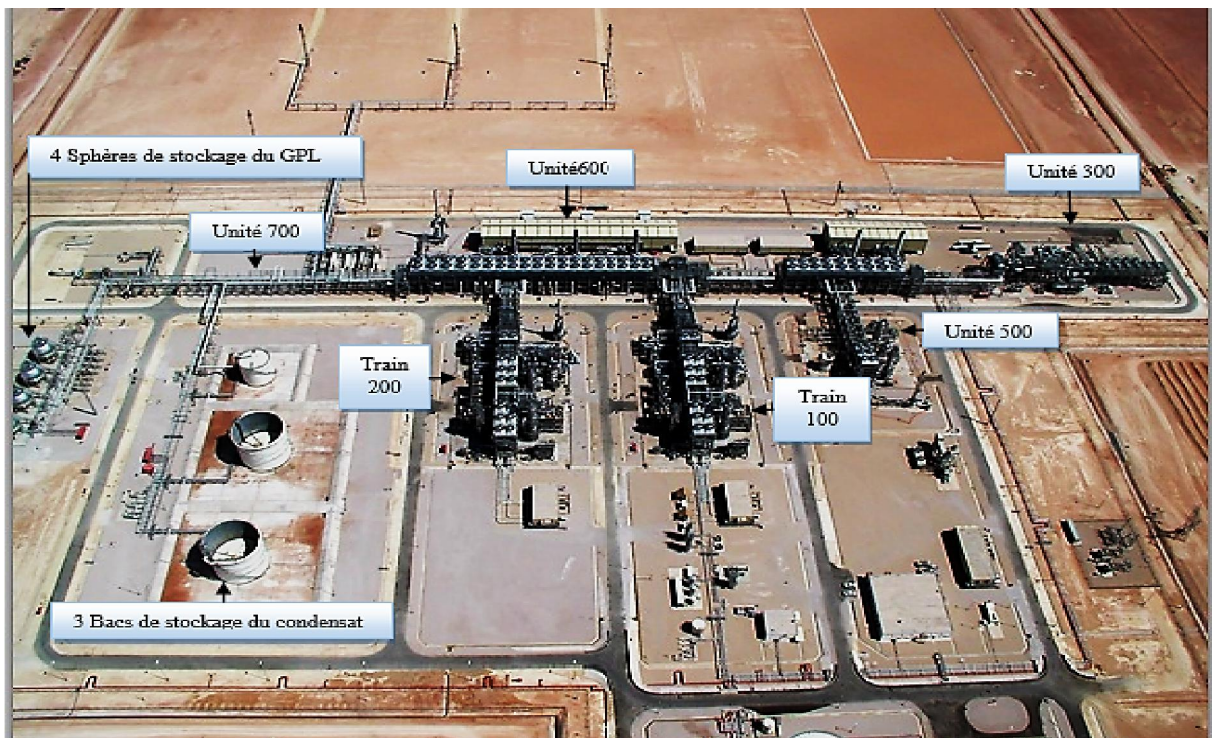


Figure I.4 : Vue de l'usine d'OHANET.

- **Unité 400** : Equipements et installations techniques (utilité) composées d' :
 - Une boucle d'huile diathermique pour le chauffage des fonds de colonnes.
 - Un turbogénérateur (Solar GE-401) d'une puissance de 7,2~10 MW.
 - Une unité de traitement des eaux brutes.
 - Une unité de traitement des eaux huileuses.
 - Un système d'air service, inerte et instrument pour les besoins de l'usine.
 - Un système de fuel gaz (HP, MP, BP).
 - Un système de détection feu & gaz et de l'eau pour lutter contre l'incendie.

Chapitre I : Présentation de la région Ohanet

- Un système de diesel.
- Un réseau de torches (HP, LP, Froide).
- **Unité 500** : Unité de décarbonatation d'une capacité de 10MSm³/J.
- **Unité 600** : Recompression et dosage des produits, contient trois compresseurs d'expédition de gaz de vente, chacun d'une capacité de 10MSm³/J.
- **Unité 700** : Stockage GPL et condensat :
 - Trois bacs de stockage de condensat (2 x 6000m³ «on-spec», 1 x 2000m³ «off-spec»).
 - Quatre sphères de stockage de GPL (3 x 500m³ «on-spec», 1 x 500 m³ «off-spec»).

Le gaz humide arrivant au CPF via le réseau de collecte est constituée de deux parties, un gaz riche en CO₂ (3.4%) ordovicien et un gaz pauvre en CO₂ (1.5%) dévonien.

Le gaz ordovicien sera préalablement traité dans l'unité de décarbonatation à fin d'éliminer une partie du dioxyde de carbone CO₂ qu'il contient, pour avoir une concentration du CO₂.

Unité de décarbonatation aux environ de 1.2% CO₂ avant d'être mélangé au gaz dévonien et tout le gaz humide sera ensuite acheminé vers les deux trains en partie égale pour être refroidis à travers les échangeurs de chaleur, asséchés à travers les tamis moléculaires et détendus à travers le turbo - expander.

Le gaz obtenu conforme aux spécifications techniques contractuelles sera chauffé à contre-courant dans les échangeurs puis décomprimé en vue d'une exportation après comptage fiscal.

Les hydrocarbures liquides récupérées à partir du gaz humide pendant la séparation au niveau des trains, se combinent aux hydrocarbures liquides récupérés dans les slug catcher (séparateurs d'arrives) pour être traités dans des colonnes de distillation pour fournir du GPL et condensât conformement aux spécifications qui seront exportées après comptage fiscal.

L'eau produite par les puits sera envoyée vers l'unité de traitement des eaux huileuses pour être débarrassée des hydrocarbures avant d'être envoyée vers le bassin d'évaporation (figure I.5).

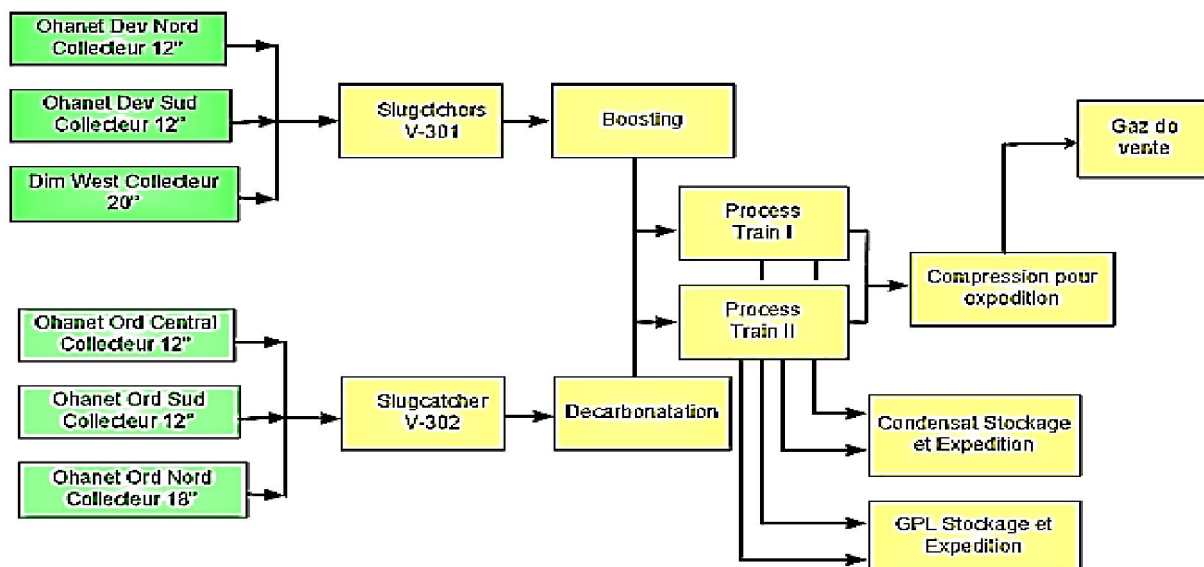


Figure I.5 : Schéma global d'écoulement du gaz.

I.4 .2 Production du CPF

Le tableau ci-dessous présente les quantités des hydrocarbures produits par jour pour l'année 2016 :

| | |
|------------------|----------------------------|
| Gaz Sec | 6.5 MSm ³ /Jour |
| GPL | 630 Tonnes/Jour |
| Condensât | 593 Tonnes/Jour |

Tableau I.1 : Production du CPF 2016.

I.4.3 Capacité minimale de service normal du CPF

Le CPF est capable de fonctionner normalement avec un débit de gaz de **3.33** million Sm³/jour avec un seul train en service en produisant du **gaz sec**, **GPL** et **condensât** conforme aux spécifications requises.

I.5 Organisation de la région ohanet

L'organisation de la région est montrée sous forme d'organigramme (figure I.6) :

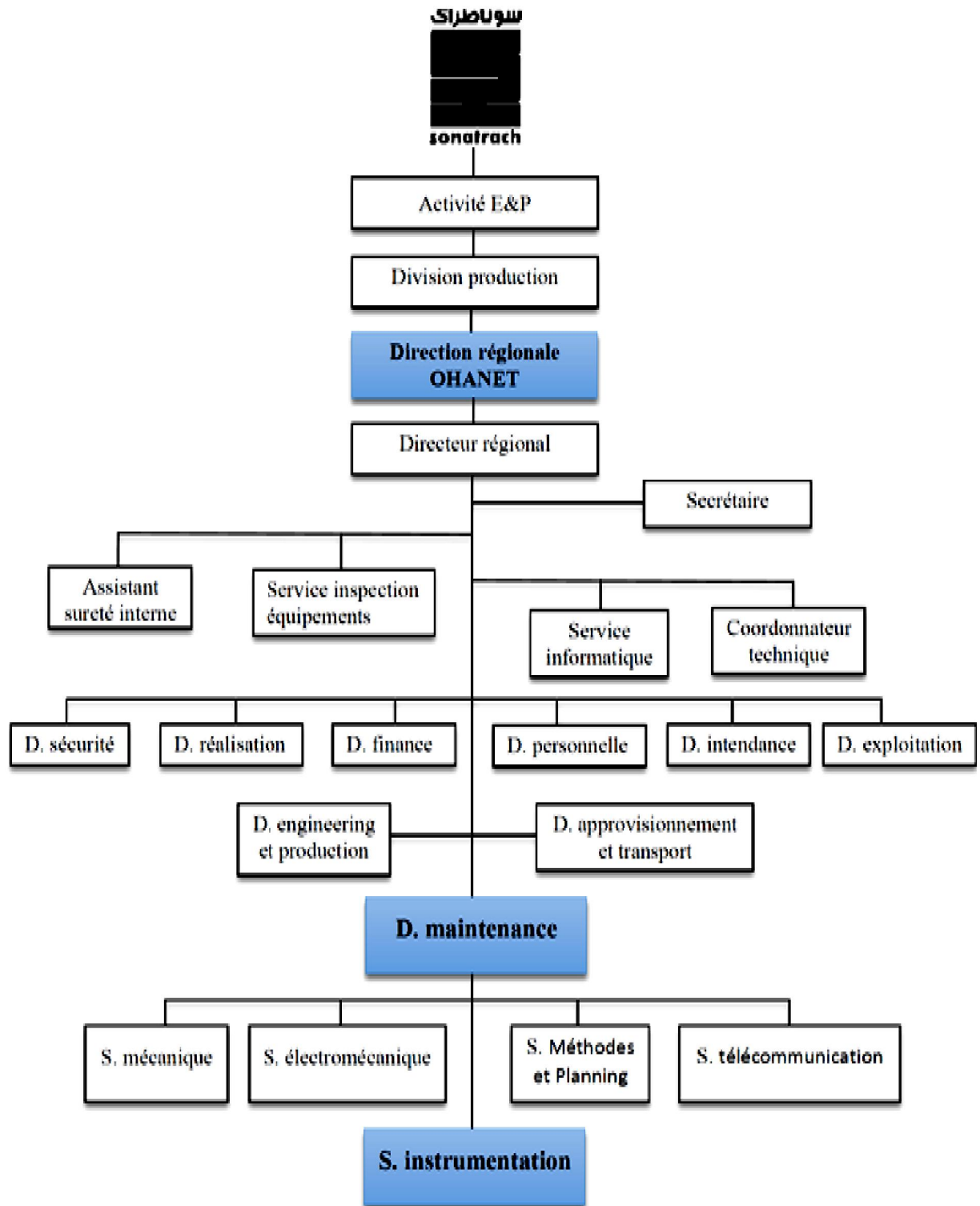


Figure I.6 : Organigramme structurel de la région OHANET.

I.5.1 Division maintenance

La division maintenance a pour mission essentielles :

- La planification, le développement, l'organisation et la mise en œuvre des services de maintenance pétrolière liés aux besoins actuels et futurs de la direction régionale.
- Les taches des services de maintenances nécessaires au bon fonctionnement des installations notamment :
- Contrôle, dépannage, réparation ou révision non confies aux complexes.
- Remise à neuf, mise à la reforme, rectification, fabrication de pièces, métallisation et galvanoplastie.
- Grandes révisions.

La division maintenance est composée de :

I.5.2 Service instrumentation.

Dont on trouve :

- Un service électromécanique.
- Un service mécanique industriel.
- Un service télécommunication.
- Un service méthodes et planning.

I.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu général sur la région OHANET, sa création, situation géographique et son climat.

Nous avons présenté aussi les différentes unités du CPF et les procédés de traitements avec les quantités produites par jour. Nous avons aussi vu l'organisation de la région, les différents services de la division maintenance et les tâches essentielles.

II.1 Introduction

Dans le domaine de l'énergie, **General Electric** est l'un des principaux constructeurs qui fournit des gros équipements pour la production, le transport et la distribution d'électricité, notamment les réseaux intelligents ainsi les centrales thermiques.

La Turbines à gaz MS5002C fournit par GE est très répandues dans l'industrie des hydrocarbures, compte tenu des puissances unitaires développées très élevées et de simples adaptations à des régimes variables des processus d'exploitation. On peut citer aussi les modes de démontage en blocs, qui permettent des périodes de fonctionnement entre maintenances de plus en plus élargies.

Dans ce chapitre nous allons voir tous ces compartiments ainsi son principe de fonctionnement.

II.2 Historique de la turbine à gaz

La première idée de l'invention de la turbine à gaz date de Léonarde de Vinci ; le premier brevet d'invention fut déposé en 1791 et la première turbine à gaz capable de produire de l'énergie mécanique fut réalisée en 1903.

Sur le marché, les premières turbines à gaz sont apparues à la fin des années 40 généralement elles ont été employées dans les chemins de fer. Spécifiquement, la turbine MS3001 construite par GE ayant une puissance de 3.312 MW a été employée dans le service Locomoteur.

Au cours du temps, les progrès obtenus dans la technologie des matériaux et les recherches approfondies sur la combustion, les chercheurs ont arrivées à l'amélioration des performances de la turbine en termes de puissance et du rendement, en augmentant les températures dans le cycle thermodynamique.

II.3 Domaine d'utilisation des turbines à gaz

Dans l'industrie, les turbines à gaz sont très répandues du fait qu'elles sont des génératrices de l'énergie mécanique qui est par la suite utilisée pour entrainer des machines dont on distingue :

II.3.1 Appareilles fixes

Elles sont destinées aux services industriels suivant :

Production de l'électricité par cycle ouvert, combiné ou cogénération.

Entrainement des pompes de réinjection

Entrainement des compresseurs de réinjection

Entrainement des compresseurs gazoducs

Entrainement des pompes pour oléoducs

II.3.2 Appareils mobiles (les turboréacteurs)

Elles comprennent les domaines suivants :

- Chemins de fer
- Propulsion maritime.
- Aviation et hélicoptère

II.4 Type de turbine

Dans l'industrie, on classe les turbines selon deux types :

II.4.1 Turbine à un seul arbre (mono arbre)

Elles sont généralement utilisées dans le cas où on cherche à entrainer une charge constante (générateurs d'électricité).

II.4.2 Turbine à deux arbres (bi- arbre)

Composées de deux parties, la première assure l'autonomie de la turbine, la deuxième est liée à la charge.

Elles ont l'avantage d'entrainer des appareils à charges variables (pompes, compresseur).

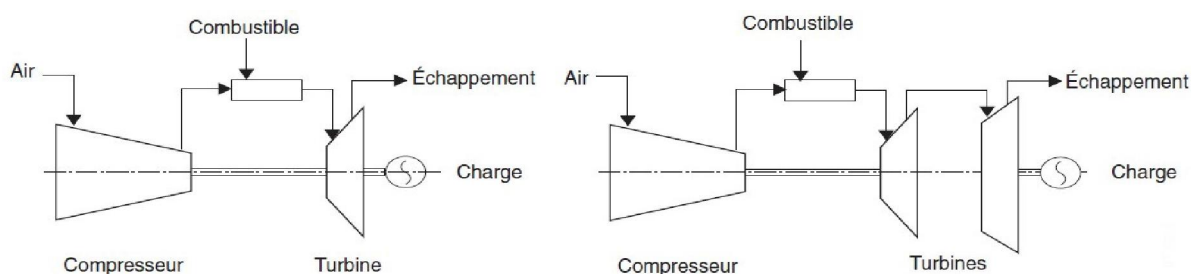


Figure II.1 : Types de la turbine

II.5 Les principales sections de la turbine à gaz

La turbine à gaz MS5002C comporte 5 sections principales à savoir :

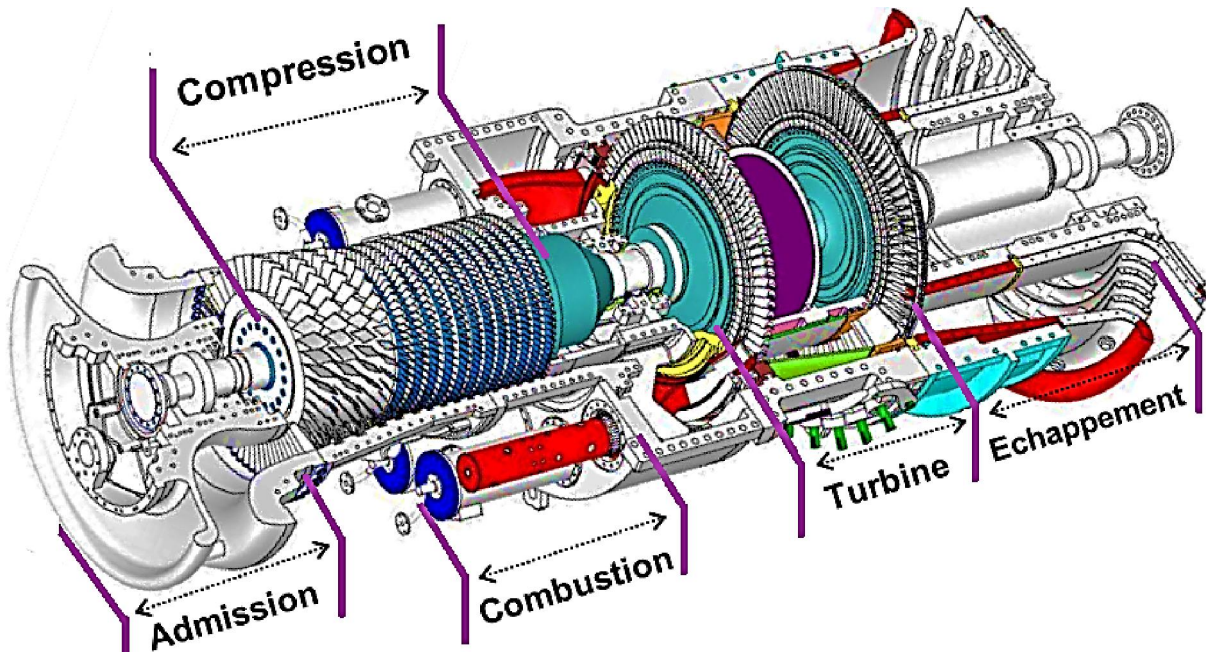


Figure II.2 : Sections de la turbine à gaz

II.5.1 Section de l'admission

C'est là où l'air ambiant soit entré dans le compresseur axial via le canal de l'aspiration qui est équipé d'un filtre pour assurer un air propre, sec, sans impuretés et avec un flux constant à l'entrée du compresseur (étage n°1).

On distingue deux types de filtres qui sont utilisés pour cet objectif :

II.5.1.1 Type autonettoyant

Ce type est constitué de plusieurs cartouches filtrantes d'une grande puissance, dont leurs régénération se fait par des jets d'air comprimé pendant le fonctionnement de la turbine. Cette opération s'effectue automatiquement en se basant sur la différence de pression de l'aire aspiré à l'entrée et à la sortie du filtre pour bien choisir le moment exacte pour la régénération des cartouches.



Figure II.3 : Filtre autonettoyant

II.5.1.2 Type conventionnel

Il est constitué en premier d'un pré-filtre et un filtre cubique dont leurs démontages est possible pour la phase du nettoyage.

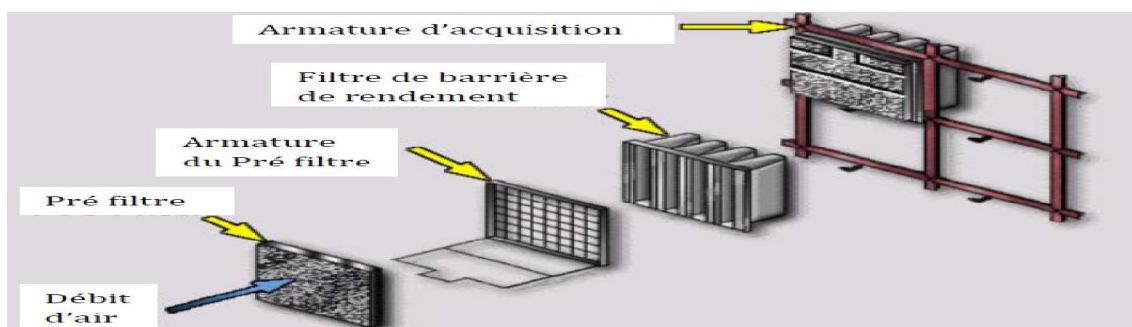


Figure II.4 : Filtre conventionnel

II.5.2 Section de compression

Dans cette section l'air aspiré (pur et sec) à la pression atmosphérique, subit une compression à travers son écoulement dans les 16 étages du compresseur axial pour atteindre 8 bars à la sortie.

II.5.2.1 Le compresseur axial

Le compresseur axial est un équipement mécanique permettant de fournir la quantité d'air nécessaire pour la combustion des gaz dans la turbine (en fonction de la charge à fournir) et aussi d'alimenter en air les divers circuits de refroidissement.

Il est constitué d'un stator et d'un rotor, dont les deux ont des ailettes fixes (stator) et rotatives (rotor), où l'ensemble de ces ailettes représente un étage.

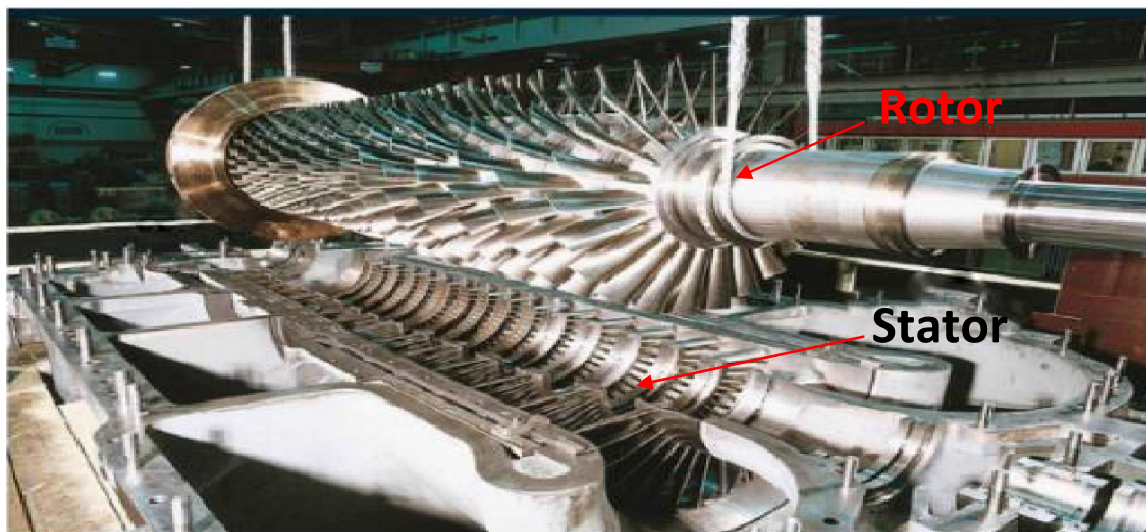


Figure II.5 : Compresseur axial rotor et stator

II.5.2.2 Le rotor du compresseur

Le rotor du compresseur se compose d'une série d'étages d'aubes orientables, fixées par des boulons sur un arbre fusé. Chaque étage comporte des rainures brochées dans les quelles s'insèrent les aubes. Ces dernières sont maintenues en place dans le sens axial, par des entretoises qui sont bloquées à chaque extrémité des rainures.

Le nombre d'étages de compression est lié à la structure de la turbine à gaz et surtout, au taux de compression à obtenir.

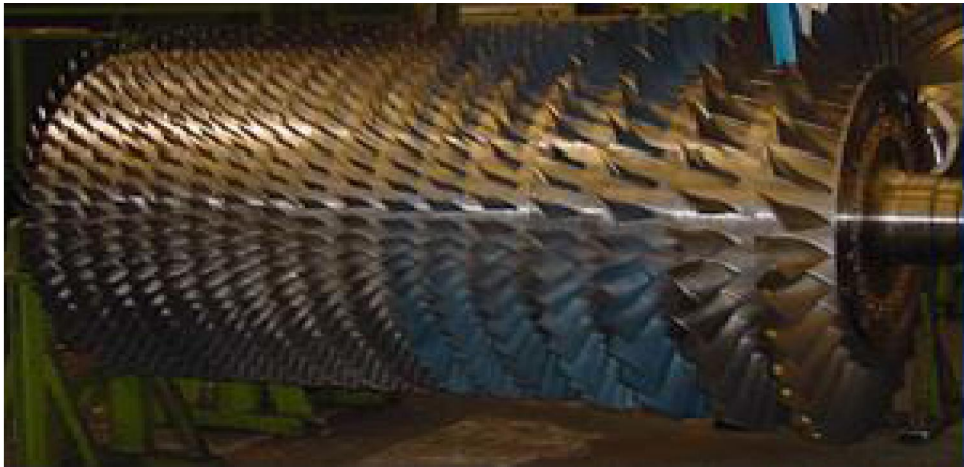


Figure II.6 : Rotor du compresseur axial

L'air pénètre et s'écoule dans le sens de l'axe de l'arbre du compresseur axial à travers des rangées d'ailettes fixes (stator) et rotatives (rotor) et ainsi comprimé par étapes successives. L'aubage du rotor fournit l'énergie nécessaire à la compression de l'air dans chacun des étages et l'aubage fixe du stator le dirige de sorte à ce qu'il pénètre dans le prochain étage du rotor sous un certain angle.

II.5.3 Section de Combustion

Cette section comprend 12 chambres de combustion dont seulement deux qui sont équipées de bougie d'allumage, toutes ces 12 chambres sont coaxial avec le compresseur axial.

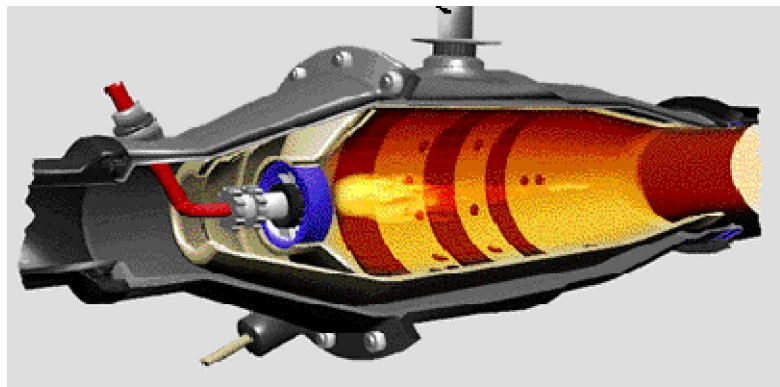


Figure II.7 : Chambre de combustion

Elles sont aussi liées entre elles par un tube de raccordement (crossfire tube) pour propager la flamme dans toutes les chambres au lieu d'équiper chacune d'elles de bougies.

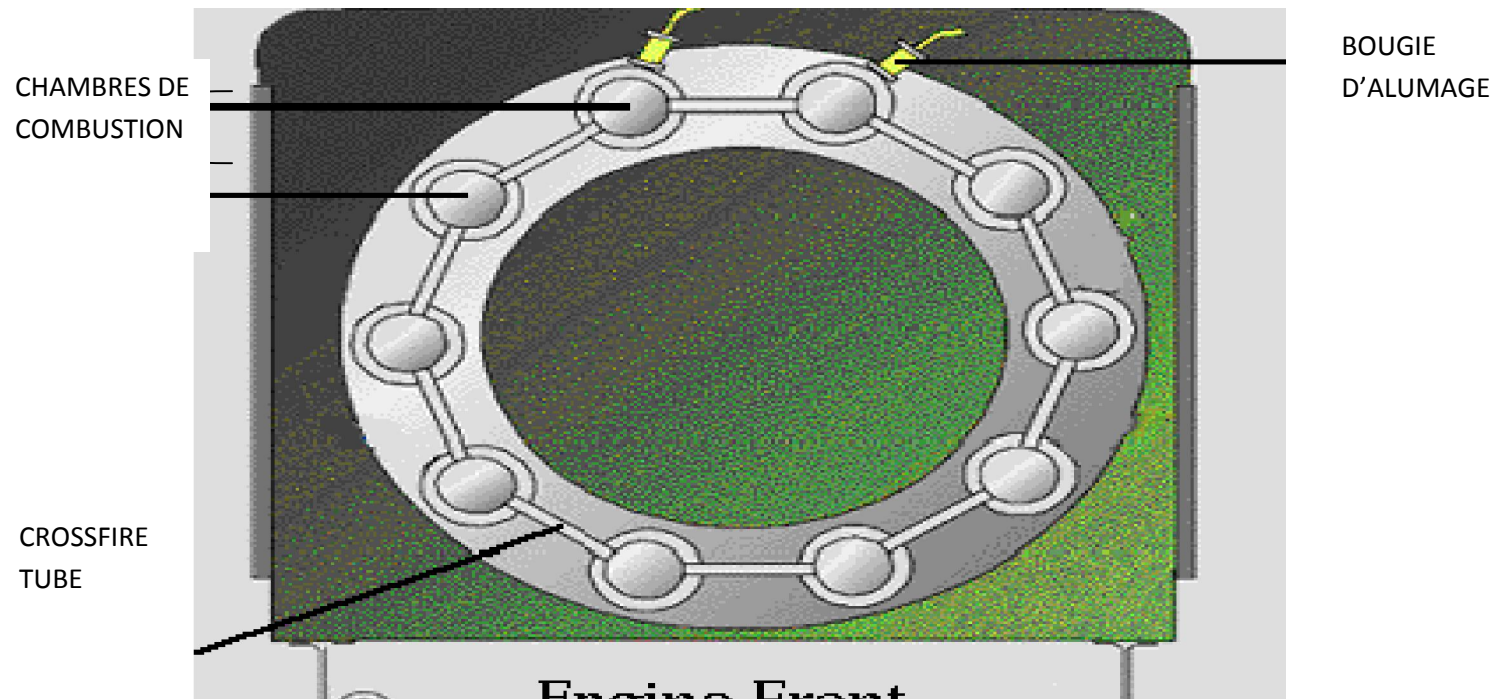


Figure II.8: Schémas de placement des chambres de combustion

II.5.3.1 Fonctionnement des chambres de combustion

Pour fonctionner efficacement, une chambre de combustion on doit fournir un mélange correct d'air et de carburant ainsi qu' un moyen pour refroidir les gaz chauds à une température tolérée par les composants de la turbine.

Pour cela, le flux d'air à travers la chambre de combustion est divisé en deux voies :

- Primaire : Il représente 25% de l'air total qui entre dans la chambre
- Secondaire : Il représente 75% de l'air total qui entre dans la chambre

L'air primaire, est envoyé dans la zone de combustion (brûleur).l'autre moitié de l'air primaire s'écoule axialement à l'entrée de la chambre combustion dans la zone des injecteurs. Le reste de l'air primaire pénètre dans le sens radial à travers les petits trous dans le tiers avant de la chambre combustion

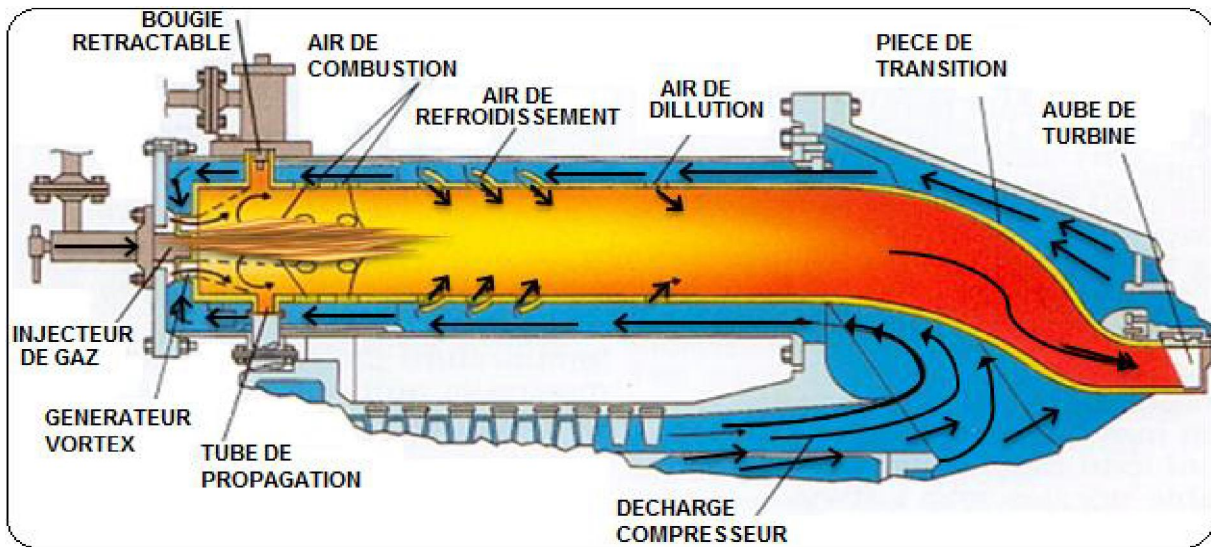


Figure II.9: Refroidissement et dilution des gaz chauds de la chambre de combustion.

Tout le flux d'air primaire favorise la combustion. L'air restant qui pénètre dans la chambre, environ 75%, est de l'air secondaire.

La moitié de cet air sert pour le refroidissement à l'intérieur et l'extérieur de la chambre combustion.

Une partie de ce flux d'air centre la flamme pour empêcher le contact avec la chambre de combustion. L'autre moitié de l'air secondaire entre dans la chambre de combustion vers l'arrière. Cette partie du flux d'air dilue les gaz de combustion à une température acceptable pour augmenter la durée de vie des composants de la turbine.

II.5.3.2 Pièce de transition

Les gaz chauds qui résultent de la combustion sont dirigés vers l'ensemble de tuyère fixe du premier étage via les pièces de transition.



Figure II.10 : Pièce de transition des gaz chauds

II.5.4 Section turbine

Cette section comporte deux roues séparées par la directrice à aubes variables, la première roue (roue HP) entraîne le compresseur axial, ainsi que les auxiliaires attelés à l'arbre; la deuxième roue (roue BP) entraîne la charge, chaque arbre est équipé de deux paliers.

Les roues HP et BP sont indépendantes mécaniquement l'une de l'autre, ce qui permet aux roues de tourner à des vitesses différentes.

Cette section comprend les éléments suivants :

- Corps de la turbine
- Nozzle 1^{ère} étage dite fixe.
- Nozzle 2^{ème} étage (aubage réglable ou directrice).

II.5.4.1 Le corps de la turbine

C'est l'élément structurel principal de la turbine car il contient tous les organes qui constituent la voie d'écoulement des gaz depuis les chambres de combustion à travers les roues jusqu'à l'échappement.

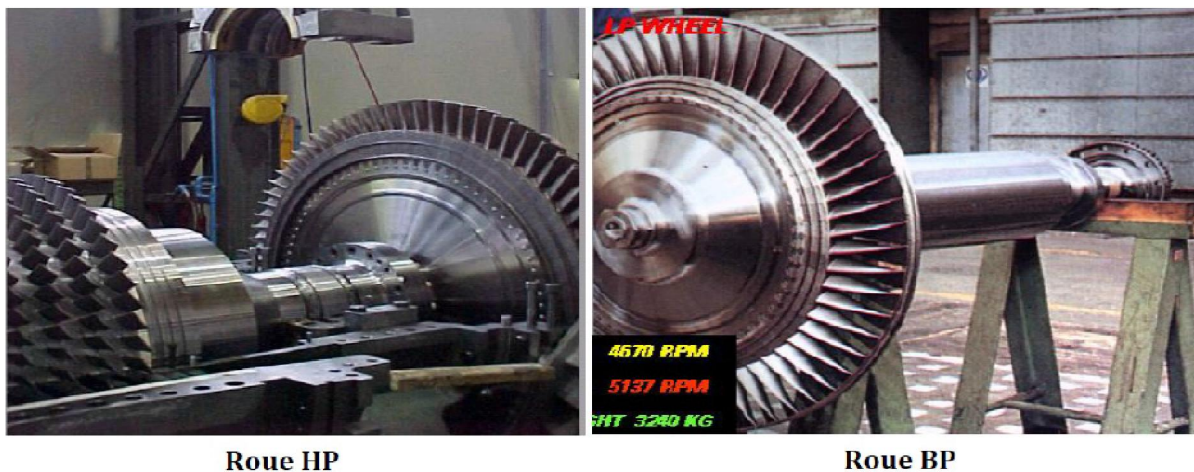


Figure II.11 : Roues HP et BP de la turbine à gaz

II.5.4.2 Nozzle 1^{er} étage

Les gaz chauds à haute pression quittent les chambres de combustion ensuite acheminent à travers une pièce de transition vers les aubes de la roue HP via la Nozzle 1^{ère} étage dite aussi Nozzle fixe. La Nozzle est fabriquée par des alliages spéciaux (à cause des températures trop élevées des gaz chauds) et comprend les segments d'aube directrice montés dans une bague de retenue.

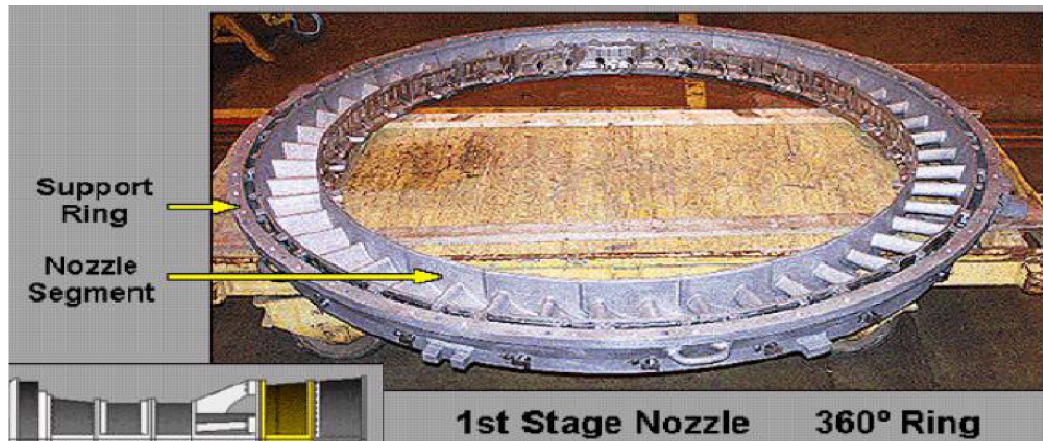


Figure II.12 : Nozzles 1^{ère} étage

II.5.4.3 Nozzle 2^{ème} étage

La Nozzle du second étage se compose d'aubes formant une directrice à angles variables dans l'espace circulaire de la veine des gaz chauds. Elle est insérée juste avant la roue BP. Ces aubes peuvent être variées à la fois, grâce à un mécanisme qui comporte une bague de commande qui tourne sous l'action d'un cylindre hydraulique.



Figure II.13 : Nozzles 2^{ème} étage et mécanisme de variation.

II.5.4.4 Les paliers

La turbine à gaz possède 4 paliers de type à patins oscillant qui supportent le rotor du compresseur axial et celui de la turbine, ainsi qu'un palier de butée prévus pour supporter les charges de poussée engendrées sur les surfaces rétorques de la turbine à gaz :

- Palier N°1 : se trouve dans le corps d'admission du compresseur axial.
- Palier N°2 : se trouve dans le corps de refoulement du compresseur axial.
- Paliers N°3 et 4 : supportent le rotor de turbine BP.



Figure : II.14 : Paliers de support

II.5.5 Section de l'échappement

Le caisson d'échappement a la même forme que le plenum mais il est destiné à décharger puis libérer vers atmosphère les gaz d'échappement. Il comporte le cadre d'échappement et les silencieux aussi il est relié par des joints de dilatation au plenum.

La cheminée est assez élevée pour permettre un refroidissement progressif des fumées et le dégagement de celle-ci dans des endroits sécurisés.



Figure II.15 : Echappement de la turbine.

II.6 Les différents systèmes de commande de la turbine MS5002C

La turbine à gaz comprend un certain nombre de systèmes de commande et de Protection, ainsi que des auxiliaires associés au fonctionnement correct de la turbine.

Les systèmes de commande comprennent généralement les dispositifs nécessaires à la commande de la turbine pour le démarrage normal, le fonctionnement et la mise en charge. Ils comprennent également les fonctions de commande de vitesse, de température, commande de lancement et commande de combustible.

Les systèmes de protection sont ceux nécessaires à assurer la protection pour un lancement et une mise à l'arrêt normaux, ainsi qu'à éviter des incidents en cas de mauvais fonctionnement ou de conditions anormales ou d'urgence.

Ces conditions anormales, peuvent être le résultat d'un défaut mécanique ou d'une défaillance dans le système de commande, ces systèmes comprennent :

II.6.1 Système de gaz combustible

Ce système sert à envoyer le combustible gazeux aux chambres de combustion de la turbine à la pression et aux débits appropriés, pour satisfaire à toutes les exigences de lancement et de bon fonctionnement de la turbine

II.6.2 système d'huile de lubrification

Le graissage de la turbine à gaz est réalisé par un circuit de graissage alimenté en huile sous pression de 10 bars.

Il comporte des divers accessoires tels que pompes, filtres, vannes et autres dispositifs de contrôle et de protection.

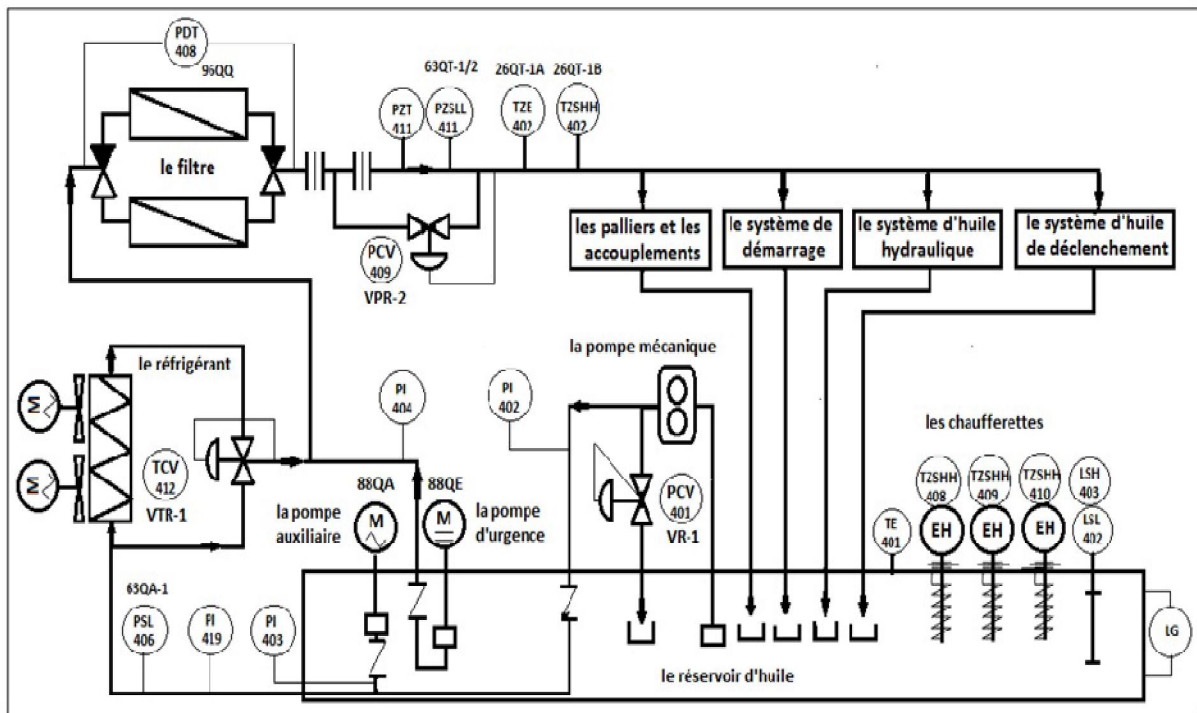


Figure II.16 : Système de lubrification de la turbine

II.6.2.1 Principe de fonctionnement

Une pompe aspire l'huile du réservoir, ensuite augmente sa pression à 24,5 PSI, l'huile sous pression s'écoule dans un circuit fermé en passant par un réfrigérant qui règle sa température, ensuite il sera filtré où les éléments qui dépassent 25 microns de grandeur sont séparés, après ça il s'écoule à la fin dans les parties concernées de lubrification et fait le retour à la caisse d'huile par la force de gravité.

Le circuit d'huile est doté d'un dispositif de commande et de protection contre les hautes températures et les basses pressions, ces conditions limites activent des alarmes pour la prévention, ou un arrêt de la turbine pour éviter des dommages qui peuvent affaiblir ces différents compartiment.

Ce système comprend 3 pompes à savoir :

II.6.2.1.1 La pompe principale

C'est une pompe volumétrique entraînée par l'engrenage des accessoires et actionnée juste après le désaccouplement du système de démarrage de l'arbre de la turbine HP (à la fin de cycle de démarrage) et l'arrêt de la pompe auxiliaire.

II.6.2.1.2 La pompe auxiliaire (88 QA)

C'est une pompe centrifuge, entraînée par un moteur à courant alternatif AC elle assure la pression nécessaire au huile de lubrification pendant le démarrage jusqu'à le lancement de la pompe mécanique, à la fin du cycle de démarrage et aussi pendant le déclenchement d'une alarme de basse pression par le pressostat 63QA-1 qui influe sur le réglage de la soupape de pression VPR-2.

Elle fonctionne encore à la phase d'arrêt et pendant la période de refroidissement (environ 10 heure après l'arrêt de la turbine).

II.6.2.1.3 La pompe d'urgence (88QE)

C'est une pompe centrifuge, entraînée par un moteur à courant continu et commandée par les pressostats 63QT-1/63QT-2, elle fonctionne pendant la coupure du courant, ou en cas où l'une des pompes mécanique ou auxiliaire est incapables de maintenir une pression adéquate de l'huile, pour le fonctionnement normal de la turbine à cause d'une défaillance quelconque dans la pompe auxiliaire ou la pompe mécanique.

II.6.3 Système de protection anti-incendie

Il est basé sur l'injection du CO₂ qui est fourni par des bouteilles à haute pression à un système de distribution qui le dirige à travers des conduites aux injecteurs de décharge situés au niveau des divers compartiments du bloc de la turbine.

II.7 Les auxiliaires de la turbine

II.7.1 Le socle des auxiliaires

Le socle pour les auxiliaires est une structure d'acier qui est prévue pour monter (soit dessus, soit à l'intérieur) tous les auxiliaires et les équipements qui ne sont pas immédiatement connecté avec la turbine elle-même.

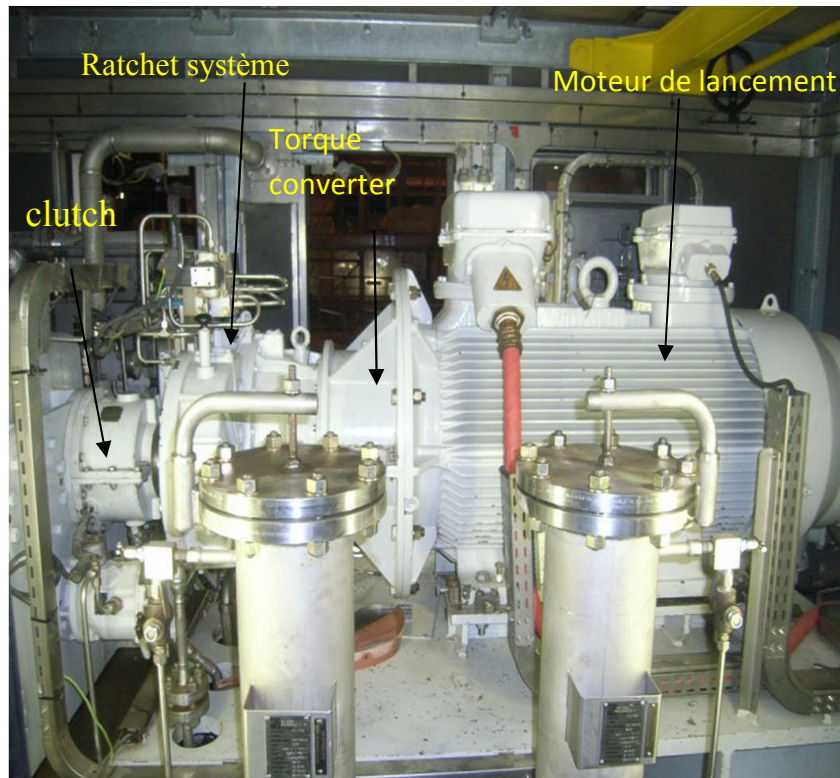


Figure II.17 : Socle des auxiliaires

Ces équipements, dont la plupart sont identifiés sur le socle des auxiliaires et illustres dans la figure haute comprennent:

- 1- Réservoir d'huile de 8500 L monté à l'intérieur de la structure en mécano-soude avec poutrelles en I.
- 2- Réducteur d'entraînement des auxiliaires avec pompe de graissage principale et pompe hydraulique, plus vireur hydraulique.
- 3- Turbine à gaz à expansion et son embrayage.
- 4- Double filtre à huile de graissage monté sur le réservoir d'huile.
- 5- Pompe de graissage des auxiliaires et de secours.
- 6- Pompe hydraulique des auxiliaires et pompe pour le vireur hydraulique.

- 7- Double filtre à huile de graissage pour l'accouplement.
- 8- Ensemble combine vanne-arrêt/régulation et vanne de contrôle du fuel gaz (GCV,SRV).
- 9- Armoire de jauge, vannes et interrupteurs.

II.7.2 Les auxiliaires de démarrage de la turbine

Ces auxiliaires englobe les équipements dont la turbine sert à démarrer et accélérer jusqu'à la vitesse minimale d'autonomie (93i%), ils comprennent les équipements suivants :

II.7.2.1 Mécanisme d'encliquetage hydraulique (Ratchet)

C'est un mécanisme hydraulique qui est alimenté en huile via une pompe à courant continu, il sert à aider le moteur de lancement en donnant 3 coups consécutif au bras de raccordement du compresseur axial avec le moteur de lancement, pour vaincre le couple de démarrage, ce mécanisme est aussi utilisé pendant le cycle de refroidissement pour faire tourner le bras de raccordement de 1/8 tour tout les trois minutes pour éviter l'endommagement et pour tourner également le rotor pendant l'inspection

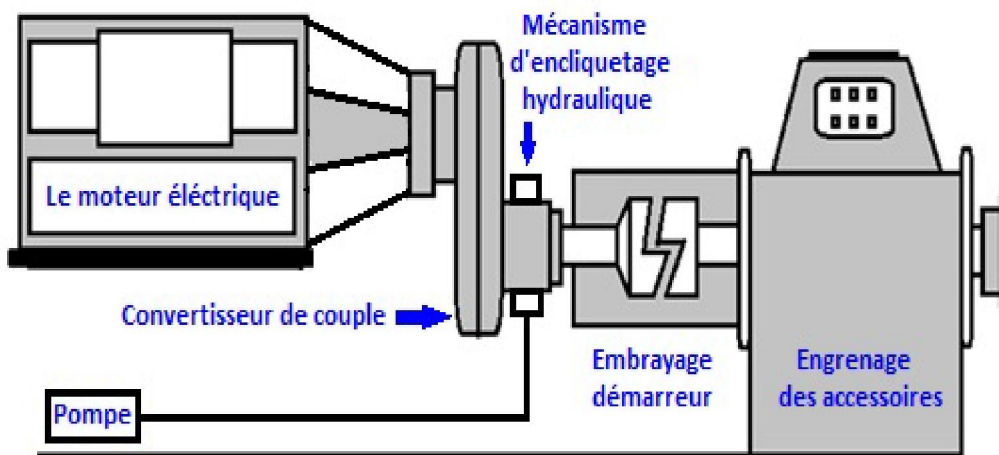


Figure II.18 : Auxiliaires de démarrage

II.7.2.2 Le moteur de démarrage

Le lancement de la turbine MS-5002C, est assuré par un moteur électrique de 5.5 k volt à courant alternatif. Après le balayage et l'allumage des chambres de combustion, le processus de démarrage commence l'accélération jusqu'à une vitesse de 60% (3000tr/mn) de la vitesse nominale.

A cette vitesse, le moteur de lancement est découplé du compresseur axial et la turbine atteint la phase d'autonomie, où elle continue d'accélérer jusqu'à sa vitesse nominale.



Figure II.19 : Auxiliaires de la turbine

II.7.2.3 Convertisseur de couple

Il contient un accouplement d'entrée, attaché à l'arbre du moteur et un accouplement de sortie attaché à l'engrenage de sortie, le convertisseur de couple a un mécanisme hydraulique d'encliquetage et un embrayage de démarrage pour coupler les deux accouplements (d'entrée et de sortie) ainsi transmettre la vitesse de rotation du moteur électrique au réducteur auxiliaire de vitesse de la turbine à gaz par un engrenage.

II.7.2.4 Embrayage de démarrage (Clutch)

Ce mécanisme connecte et sépare l'arbre du système de démarrage de l'arbre du compresseur axial pendant le cycle de démarrage et aussi, juste après l'arrêt de la turbine pour le refroidissement.

L'embrayage démarreur est couplé par des cylindres hydrauliques (huile fournie du module de la vanne de réglage à clapet) et découplé automatiquement par des ressorts de rappel dans les cylindres lorsque la turbine à gaz arrive à la vitesse d'autonomie.

L'ensemble de l'embrayage démarreur et les cylindres d'engagement sont montés sur l'ensemble de l'engrenage auxiliaire.

II.7.2.5 Engrenage des accessoires (Gearbox)

L'engrenage des accessoires, ou le réducteur auxiliaire de vitesse, est un mécanisme de transfert de rotation de l'arbre de la turbine aux plusieurs arbres pour alimenter les pompes principales du système d'huile de graissage et d'huile hydraulique.

L'engrenage des accessoires est couplé en permanence à l'arbre du compresseur axial par un couplage flexible.

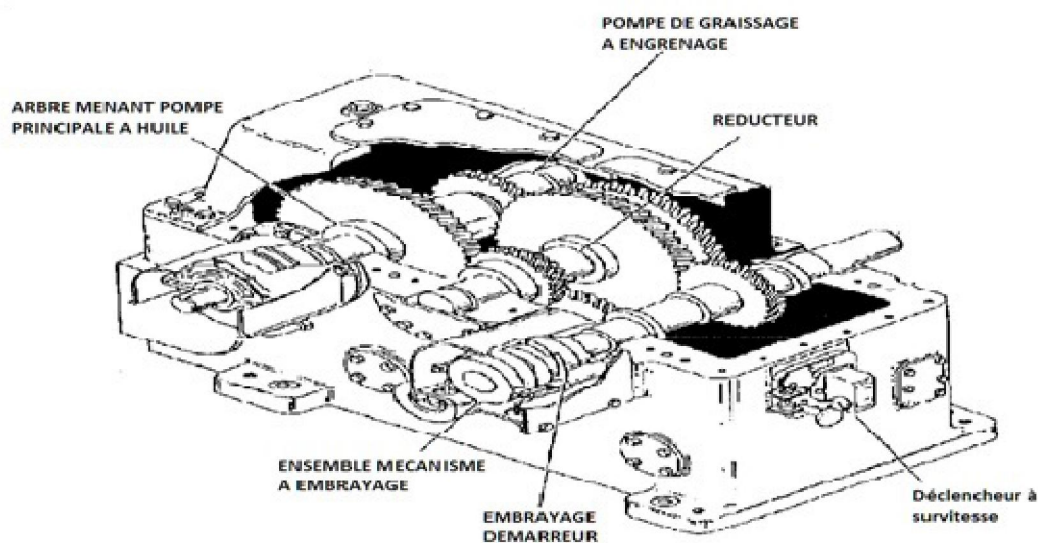


Figure II.20 : Engrenage des accessoires (Gearbox)

L'arbre principal d'engrenage des accessoires est tourné soit par le système de démarrage pendant le cycle de démarrage ou par l'énergie de combustion qui entraîne l'arbre de compresseur pendant le cycle de fonctionnement normal de la turbine, comme une mesure de sécurité contre la survitesse de l'arbre HP, un déclencheur à survitesse est monté à l'extérieur de la boîte d'engrenage des accessoires et actionné manuellement ou par le boulon de survitesse installé dans l'arbre principale, le déclencheur à survitesse déverse mécaniquement l'huile du circuit de déclenchement dans le réservoir d'huile, ce qui entraîne la fermeture de la vanne SRV et arrête la turbine en conséquence.

II.8 Sequence du démarrage de la turbine MS5002C

II.8.1 Verification des conditions de démarrage

La phase de préparation de la turbine pour le lancement consiste à vérifier certain nombre de conditions indispensables pour un fonctionnement normal et fiable de la turbine.

Le système de commande Mark V doit assurer tout d'abord l'absence de tous les causes de trip et affirme l'arrêt total de la machine (état de repos).

L'étape suivante sera l'inspection des auxiliaires (niveau d'huile dans les réservoir, tous les pompes et le moteur de lancement sont sous tension et les portes du compartiment turbine sont fermées ...etc.).

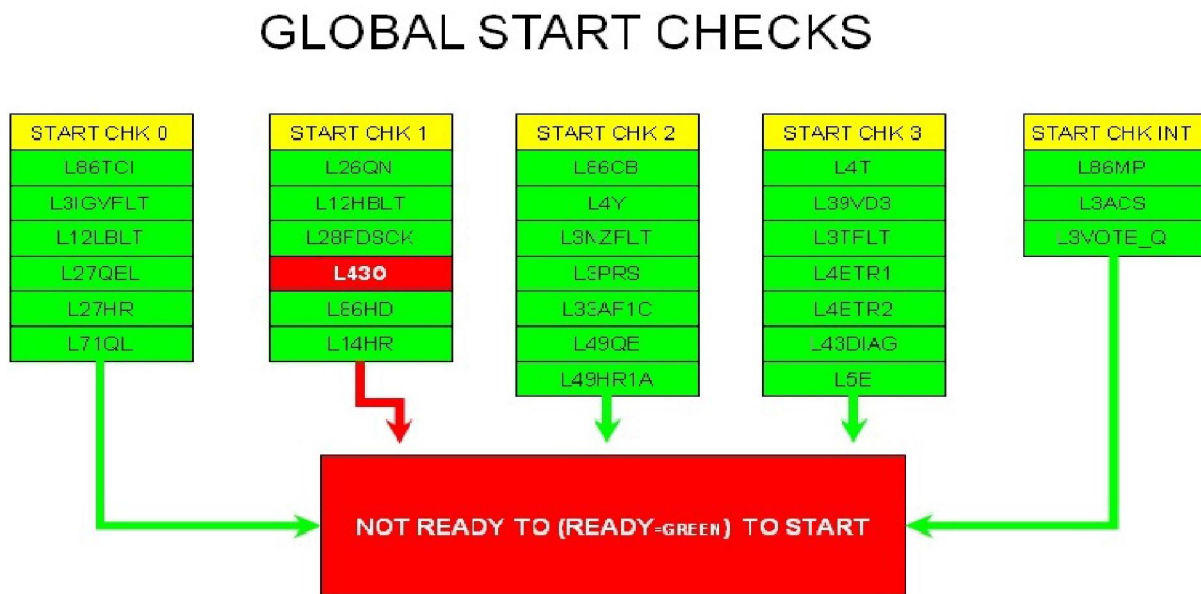


Figure II.21 : Listes des signaux à vérifiés pour le démarrage

Une fois que ces conditions sont vérifiés , le message « READY TO START» sera affiché sur HMI en vert et un signal envoyé à la salle de contrôle pour indiquer à l'opérateur que la turbine est prête à démarrer, et lui demandant un permissif pour le choix de démarrage (télécommandé , manuel) si il y a une condition non vérifié le message affiché sera « NOT READY TO START » l'opérateur sera informé mais ne peut pas donné le permissif de démarrage.

II.8.2 Démarrage des auxiliaires

Le signal de démarrage (mode automatique) active les équipements auxiliaires de démarrage ainsi que le système d'huile de lubrification (les trois pompes), pour assurer la lubrification des paliers. Après l'achèvement des vérifications automatiques du système et l'établissement de la pression d'huile de graissage, le moteur de lancement est mis en marche donc la turbine va commencer d'accélérer jusqu'à la vitesse du crank (20% de la vitesse HP).

II.8.3 La purge

Quand la turbine HP atteint la vitesse 20 %, le débit d'air crée par le compresseur axial assure un balayage ou un nettoyage des chambres de combustion.

L'évacuation du mélange de combustible à l'échappement a pour but d'éviter l'explosion, la durée de cette phase est trois minutes.

II.8.4 L'allumage

La fin de la purge va franchir l'allumage des bougies dans 10 secondes et autorise l'entrée de combustible à gaz aux chambres de combustion, le système de commande Mark V doit détecter la présence de flamme. Si aucune flamme n'est détectée dans les délais préfix (60 secondes) La machine retourne au mode crank immédiatement, les vannes de gaz GCV et SRV se ferment et on peut redémarrer la machine à partir de ce stade sans retourner au point de départ.

II.8.5 Réchauffage

Dès que le détecteur de flamme signale l'allumage au niveau des chambres de combustion, un temporisateur de réchauffage est initialisé (une minute) et le FSR réchauffage (14%) va dominer au lieu du FSR allumage (18%). L'objectif principal de cette dégradation du débit de gaz est d'éviter le choc thermique des chambres de combustion.

II.8.6 Accélération

La fin de réchauffage, l'accélération de la turbine commence, où le signal FSR ACCEL prend la place du FSR réchauffage. La croissance du signal FSR est de 0.05 % au

démarrage ensuite il devient 0.11%. Le débit de combustible continue à augmenter jusqu'à 100% de la vitesse Hp, où le FSR vitesse prend le relais pour contrôler la turbine.

II.8.7 Fin de la séquence

Lorsque la vitesse de la roue HP atteint 93%, la pompe auxiliaire et la pompe hydraulique s'arrêtent et la pompe mécanique va assurer le graissage et dans ce cas la machine est autonome. Le système de commande Mark V génère le signal qui indique la fin de la séquence dès que la vitesse opérationnelle minimum BP est atteinte 75%.

II.8.8 Mise en charge de la machine

Quand la turbine sera prête à être chargée, c'est-à-dire que la vitesse de HP=100 % et celle de BP=75% la charge (le compresseur centrifuge) tourne à la même vitesse que BP pour augmenter la pression du gaz venant des deux trains (train 100 et train 200) et l'expédier vers les stations de compression.

II.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mis en évidence les différentes sections ainsi que le principe de fonctionnement de la turbine à gaz, afin de mieux expliquer son système de commande.

III.1 Introduction

La turbine est munie de plusieurs systèmes de commande et de protection prévus pour assurer la fiabilité et la sécurité du fonctionnement de la machine.

Les systèmes de protection sont prévus afin d'éviter des conditions anormales pouvant endommager la turbine.

Les systèmes de protection contrôlent les paramètres de fonctionnement critiques température, vitesse, vibration, pression, flammeetc.

Dans ce chapitre nous allons décrire le système de commande de la turbine SPEEDTRONIC Mark V qui est utilisé pour la commande et la protection des turbines à gaz NP-GE.

III.2 Généralités sur les Automates Programmables

III.2.1 Présentation

Le rôle de l'automate programmable est de réaliser la logique de l'automatisme à partir des informations venant des capteurs pour en déduire les ordres appropriés à envoyer aux actionneurs, en utilisant une technologie électronique entièrement statique.

La logique est mémorisée sous forme d'un programme ou logiciel et non plus sous forme de câblage électrique, pneumatique ou hydraulique.

La logique programmée s'adapte facilement aux besoins et aux modifications par simple changements dans le programme alors que la logique câblée nécessite à chaque fois une reprise du câblage (câblage et relais).

Un automate programmable industriel (API) est une sorte de mini-ordinateur spécialisé destiné à travailler dans un milieu difficile, perturbé, en liaison avec des capteurs et des actionneurs de toute nature.

III.2.2 Structure d'un système automatisé

Un système automatisé est un objet technique qui se substitue aux opérations Manuelles pour assurer le fonctionnement autonome d'une installation ou d'une Machine.

Un système automatisé est composé de trois parties distinctes.

- Partie opérative
- Partie commande

➤ Poste de contrôle

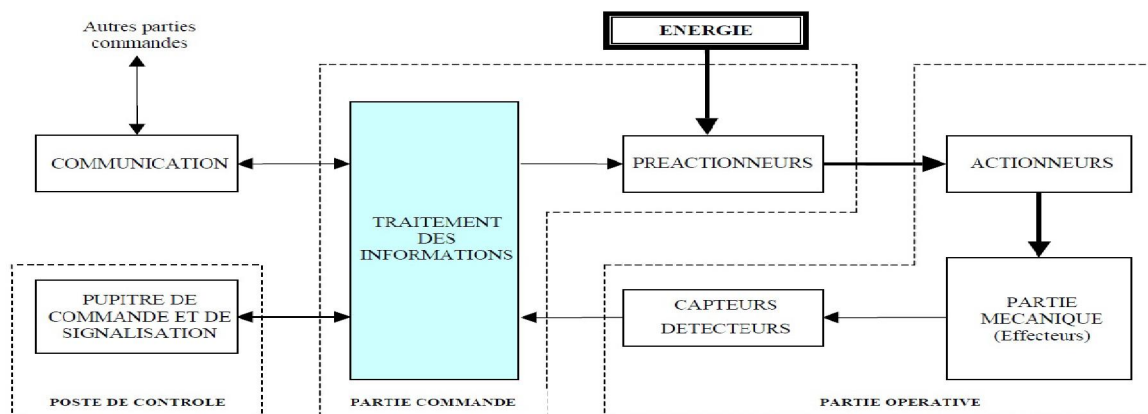


Figure III.1 : structure d'un système automatisé

➤ La partie commande

Elle est en général composée d'un automate qui contient un programme qui gère le fonctionnement du système. Elle sélectionne les ordres nécessaires au fonctionnement de la partie opérative en fonction des consignes qu'elle reçoit du pupitre de commande (opérateur) et les informations de la partie opérative transmises par les capteurs / détecteurs.

Les pré-actionneurs permettent de commander les actionneurs ; ils assurent le transfert d'énergie entre la source de puissance (réseau électrique, pneumatique ...etc.) et les actionneurs.

Exemple : contacteur, distributeur ...etc.

➤ La partie opérative

Cette partie exécute les ordres reçus de la partie commande, elle agit sur la matière d'œuvre afin de lui donner sa valeur ajoutée. Les actionneurs (moteurs, vérins) agissent sur la partie mécanique du système qui agit à son tour sur la matière d'œuvre. En même temps, elle transmet l'état du système à la partie commande à travers les capteurs / détecteurs.

➤ Poste de contrôle

Composé des pupitres de commande et de signalisation, il permet à l'opérateur de commander le système (marche, arrêt, départ cycle ...etc.) Il permet également de visualiser les différents états du système à l'aide de voyants, de terminal de dialogue ou d'interface homme-machine (HMI).

III.3 Système de commande Mark V TMR

III.3.1 Présentation

Le système de contrôle MARK V représente la 2ème génération des commandes à redondance triple basé sur microprocesseur dont la 1ère génération fut réalisée en 1982 (MARK IV).

Ce système de commande est la réalisation numérique des techniques automatiques apprises et affinées au cours des quarante dernières années.

Le système MARK V SPEEDTRONIC est un système de régulation dédié aux turbines à gaz et à vapeur.

Il contient un certain nombre de systèmes, de commandes, protections conçus pour assurer un fonctionnement fiable et sûr de la turbine à gaz.

Les besoins de la régulation de la turbine sont satisfaits en utilisant de simples organigrammes et des schémas unifilaires des systèmes de protection et de régulation Mark V SPEEDTRONIC.

III.3.2 Architecture du système

Dans sa configuration la plus commune, le MARK V améliore encore la fiabilité de l'unité grâce à l'utilisation de trois processeurs de commande redondante (R), (S) et (T).

Cette conception redondante modulaire triple (TMR) permet d'exploiter, commander et protéger de manière sûre une unité si l'un de ces processeurs de commande ou si l'un des composants du processeur de commande tombe en panne.

L'armoire de commande MARK V (TMR) comprend :

- Trois processeurs de commande identique (R), (S) et (T) (collectivement appelé (Q)).
- Un processeur de communication (C)
- Un module de protection (P)
- Un module de distribution d'alimentation (PD)
- Un module E/S numérique du processeur de communication (CD)
- Un module E/S numérique du processeur de commande (QD1)

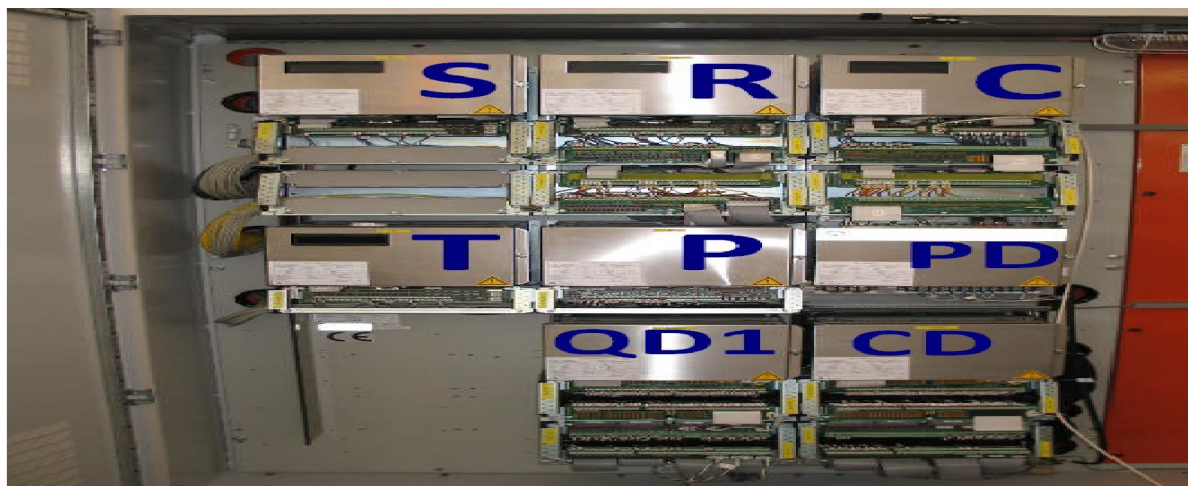


Figure III.2 : Panneau de commande Mark V TMR SPEEDTRONIC

III.3.2.1 Modules de commande <R>, <S> et <T>

Ces trois modules (processeurs) de commande sont identiques et grâce à leur conception redondante modulaire triple (TMR) ça permet d'exploiter, commander et protéger de manière sûr et plus fiable la machine même si l'un de ces processeurs de commande ou si l'un des composants de ce dernier tombe en panne.

III.3.2.2 Module de communication <C>

Le contrôleur <C> constitue l'interface des E/S non critiques et sans déclenchement et assure l'interface de maintenance de l'opérateur, par l'intermédiaire de deux ports ARCNET.

Toutes les commandes et tous les contrôles de l'opérateur s'effectuent à partir de cette interface, ainsi que toutes les fonctions de maintenance, y compris la modification des constantes de régulation, l'édition du logiciel d'application, la modification de l'affectation des E/S et l'édition des affichages. Le traitement des communications s'effectue dans un système d'exploitation multitâche en temps réel. Les communications entre les différents contrôleurs s'effectuent sur des liaisons ARCNET rapides.

III.3.2.3 Interface opérateur <I>

L'interface opérateur <I> est utilisé pour émettre des commandes de mise en marche/arrêt de l'unité, pour mettre sous charge/enlever la charge à l'unité, gérer et consigner les alarmes et surveiller le fonctionnement de l'unité. La communication entre l'interface <I> et les trois processeurs se fait par l'intermédiaire du processeur de communication <C>.

III.3.2.4 Module de Protection <P>

Le module de protection, <P>, assure un second niveau de protection des fonctions critiques. Il contient trois jeux de cartes identiques (X, Y et Z), comportant chacun sa propre alimentation et son propre processeur.

Ils fournissent des circuits de commande de relais et des relais séparés pour chacun des contrôleurs <R>, <S> et <T>, avant leur mise en interface avec les solénoïdes de déclenchement hydraulique. Le module <P> assure également des fonctions de détection de flamme, survitesse et de synchronisation automatique.

III.3.2.5 Modules entrée/sortie logique

<CD>: Reçoit les entrées/sorties non critiques qui sont traitées par le processeur de communication (C).

<QD1>: Reçoit les entrées/sorties critiques qui sont traitées par les contrôleurs(R), (S) et (T).

III.3.2.6 Module de distribution d'alimentation <PD>

Le module de distribution d'alimentation assure la distribution du 125 VDC vers les cartes d'alimentation des contrôleurs (R), (S), (T), (C) et (P), il fournit aussi la tension de 125 VAC pour le transformateur d'allumage des bougies. Le (PD) permet d'alimenter indépendamment chacun des contrôleurs par l'intermédiaire de Switcher qui permettent de mettre hors tension le contrôleur désiré ce qui permet de le réparer sans danger.

III.3.2.7 Interface homme machine (HMI)

L'interface d'opérateur désigné généralement sous le nom de l'interface homme machine (HMI).

C'est un PC avec le système d'exploitation Windows, avec pilotes de communication pour les magistrales de données et le logiciel d'affichage graphique CIMPLICITY.

L'opérateur donne les commandes temps réel et peut visualiser les données et les alarmes de la turbine en temps réel sur les affichages graphiques.

Les diagnostics détaillés E/S et la configuration du système sont disponibles à l'aide d'outils du logiciel. Une HMI peut être configurée comme serveur, pour pouvoir accéder aux outils et logiciels utilitaires Mark V.

Toutes les commandes et protections sont résidentes dans la commande de Mark V, qui permet au HMI d'être un composant non essentiel du système de commande.

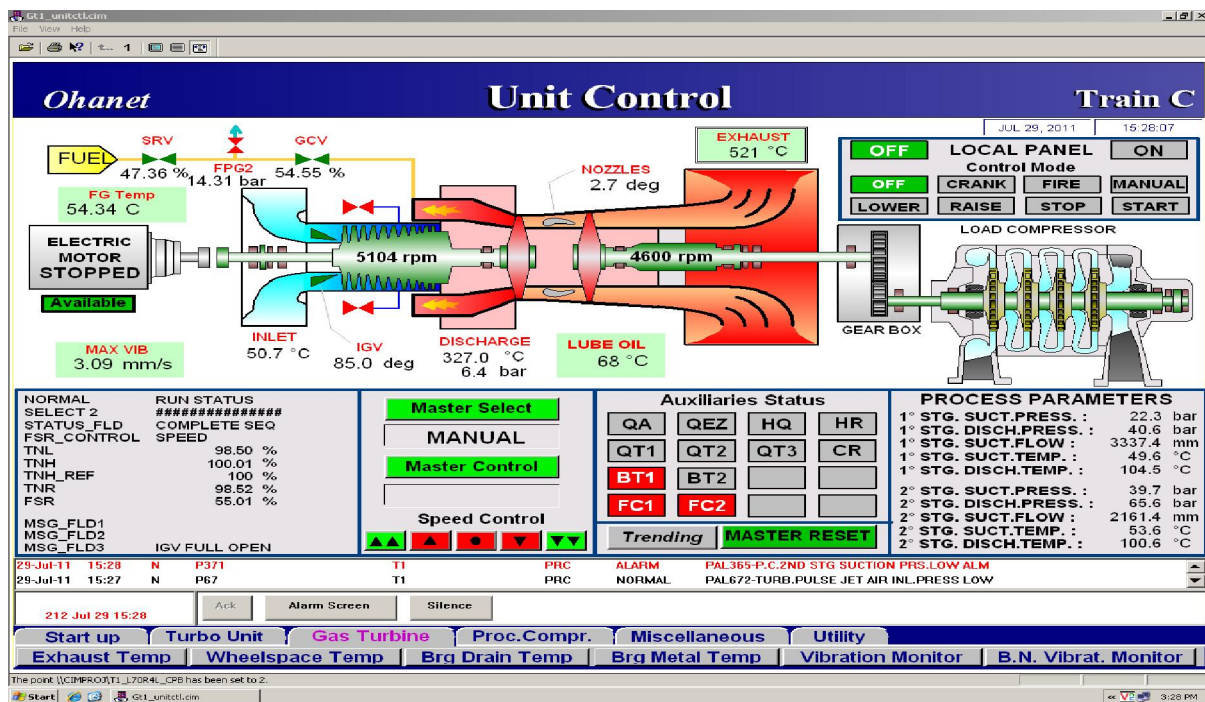


Figure III.3 : Interface opérateur au niveau de l'HMI

III.3.3 Réseaux de communication du MARK V

ARCNet : C'est le réseau de communication entre l'interface (I) et le communicateur(C). Ce réseau permet la communication rapide (câble coaxial) et le transfert de tout signal connu du Mark V.

Modbus : C'est le réseau de communication entre le MARK V et un système de commande central (DCS). Ce réseau est lent (liaison série) et ne permet la transmission que de certains signaux qui ont été sélectionnés l'ors de la configuration de la centrale.

IONet : C'est un réseau interne. Il permet la transmission de signaux entre les microprocesseurs principaux et les cartes d'interface déportées dans d'autres modules.

DENet : C'est le réseau qui permet l'échange de données entre processeurs afin d'assurer les votes et transmission d'ordres.

III.4.Principe de contrôle du MARK V

Les fonctions principales du système de commande de la turbine Mark V sont les suivantes :

- La commande de la vitesse pendant le démarrage de la turbine.
- La commande de la charge de la turbine pendant le fonctionnement normal.
- La protection contre la surchauffe de la turbine et contre les survitesses lors des pertes de charge.

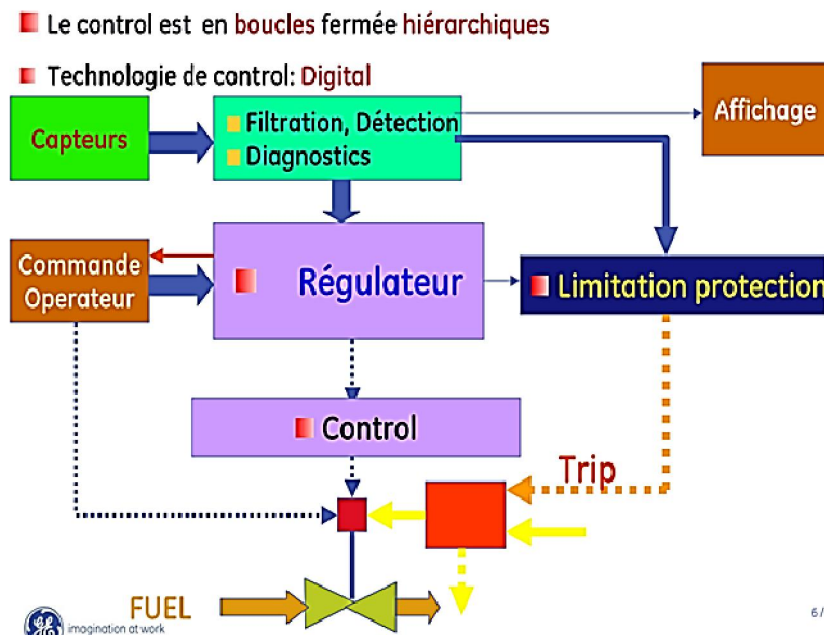


Figure III.4 : Philosophie de contrôle de la turbine à gaz

La régulation de la turbine à gaz se fait par des fonctions de commande de démarrage, d'accélération de turbine HP et BP, de vitesse de la turbine basse pression BP, de vitesse de HP, de température, d'arrêt et de régulation manuelle.

Des capteurs surveillent la vitesse de la turbine, la température d'échappement, la pression de refoulement du compresseur et d'autres paramètres pour déterminer les conditions d'exploitation de l'unité.

Lorsqu'il est nécessaire de modifier les conditions de fonctionnement de la turbine en raison de changements dans les conditions de charge ou d'environnement, la régulation module le débit du combustible à destination de la turbine à gaz. Ainsi, si la température d'échappement tend à dépasser sa valeur admissible pour une condition de fonctionnement

donnée, le système de régulation de température réduit le combustible envoyé vers la turbine et, par conséquent, limite la température d'échappement.

Il y a trois boucles de régulations principales « démarrage, vitesse et température » qui peuvent assurer le contrôle durant le fonctionnement de la turbine. Les sorties de ces boucles de régulations sont connectées à un sélecteur de la valeur minimale. Les modes de régulation secondaires de l'accélération, du FSR manuel et de l'arrêt fonctionnent de manière similaire.

La turbine à gaz à deux arbres, comme la turbine MS5002C, est munie d'une autre boucle de contrôle pour contrôler la turbine HP en modulant l'angle des aubes directrices variables du deuxième étage pour maintenir la vitesse de l'arbre HP entre la vitesse minimale d'arrêt et la vitesse maximale d'arrêt afin que la turbine fonctionne à une température convenable.

Quand une variation des conditions ambiantes ou autres (variation de charge) impose à la turbine de nouvelles conditions de fonctionnement, Ce changement est obtenu en modulant l'alimentation en combustible de la turbine.

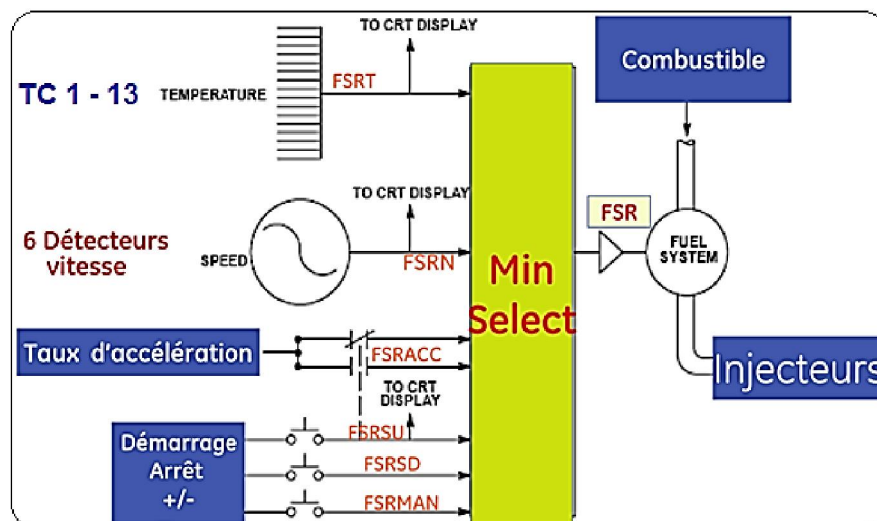


Figure III.5 : Principe de sélection des boucles de contrôle.

III.4.1 Système de contrôle de la température

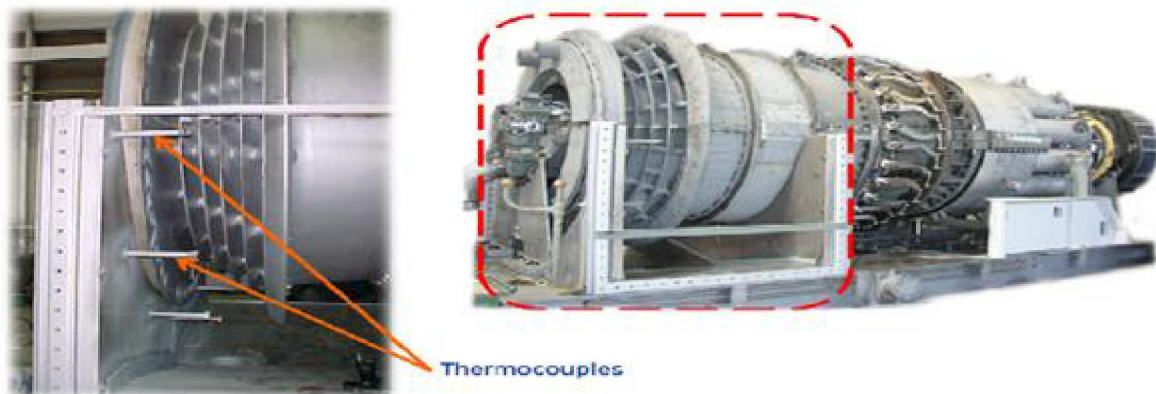


Figure III.6: Emplacement des thermocouples de la température de l'échappement

III.4.1.1 Dispositif matériel de contrôle de la température d'échappement

13 thermocouples de type K à gaine en acier inoxydable de 1/16" de diamètre (1,6 mm) sont utilisés et montés et repartis de manière circumférentielle à l'intérieur des diffuseurs d'échappement. Ils ont des capots de radiation individuels qui permettent au flux du diffuseur extérieur radial de passer sur ces thermocouples à une vitesse élevée.

Le signal de chaque thermocouple est envoyé au contrôleur SPEEDTRONIC Mark V à travers des câbles blindés vers la carte TBQA qui est montée sur le contrôleur R et contient 45 entrées T/C, ces dernières seront ensuite reparties entre les 3 contrôleurs redondants RST de cette façon :

En position 12H et en allant dans le sens de rotation du rotor le 1^{er} T/C vers R, le 2^{eme} vers S, le 3^{eme} vers T, le 4^{eme} vers R, le 5^{eme} vers S, et ainsi de suite.

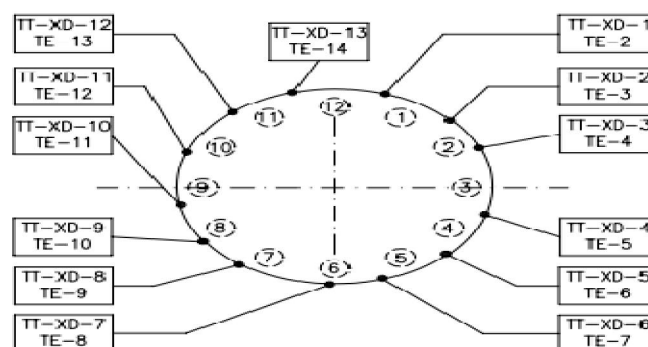


Figure III.7: Disposition des T/C par rapport aux chambres de combustion.

III.4.1.2 Principe du système de contrôle de température

Le système de contrôle de la température va limiter le débit de carburant vers la turbine à gaz, pour maintenir les températures internes avec les limites supportées par les pièces du chemin des gaz chauds. La plus haute température se produit dans la flamme des chambres de combustion.

Les gaz de combustion dans cette zone sont dilués par l'air de refroidissement, après ils vont s'écouler dans la section turbine à travers les nozzles de premier étage.

La température de ces gaz lorsqu'ils sortent des nozzles est connu comme « température d'allumage » de la turbine à gaz, c'est cette température qui doit être limitée par le système de contrôle.

Avec des relations thermodynamiques, et conditions du site connues, la température d'allumage peut être déterminée comme fonction de température d'échappement et pression de refoulement du compresseur axial (CPD).

Le système mesure et contrôle la température d'échappement plutôt que la température d'allumage parce que ce n'est pas pratique de mesurer la température directement dans les chambres de combustion.

La température d'allumage peut être aussi approximée comme une fonction de température d'échappement et le flux de gaz combustible (FSR). Cette fonction est utilisée comme sauvegarde pour la première basée sur le CPD.

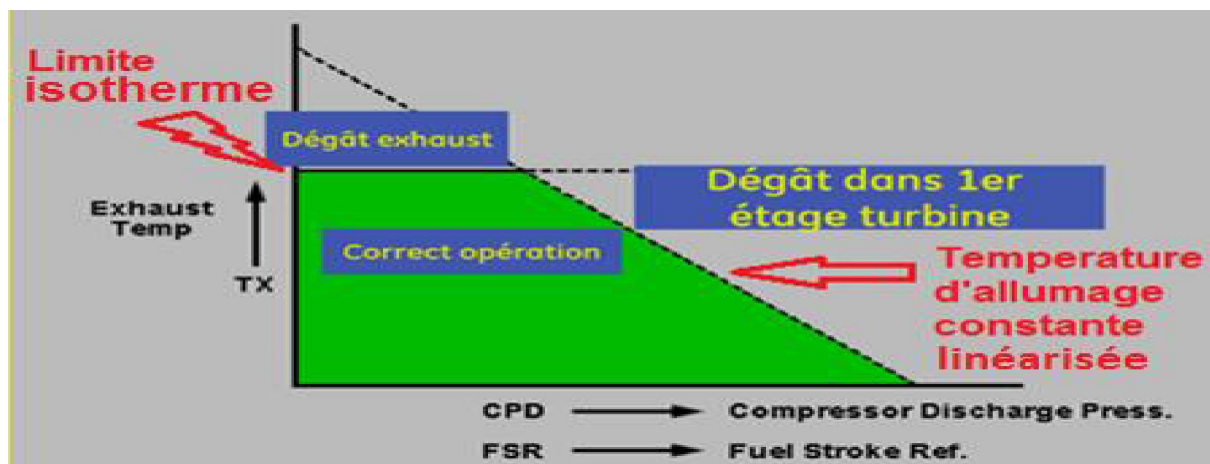


Figure III.8: Courbe de contrôle de la température

La courbe linéarisée « température d'allumage constante linéarisée » est utilisée dans le système de contrôle pour limiter les températures de fonctionnement de la turbine à gaz tandis que la "limite isotherme" (limite définie par les matériaux utilisés) protège le système

d'échappement pendant le démarrage, le conduit d'échappement et tout équipement de récupération de chaleur en aval.

III.4. 1.3 Variation de la consigne de référence de température (ttrx)

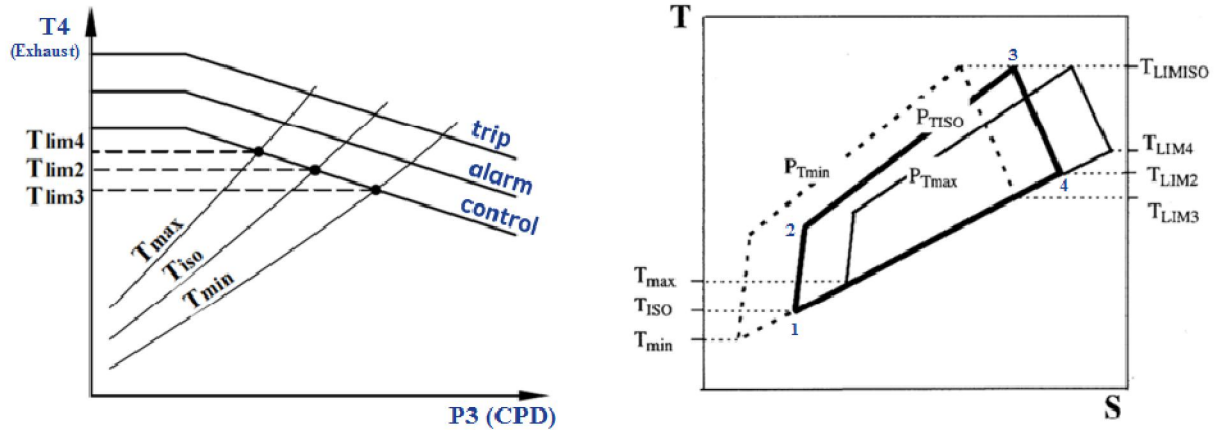


Figure III.9: Variation de la référence température et du cycle thermodynamique

Quand la température ambiante chute de TISO à Tmin le taux de compression augmente puisque la masse volumique de l'air augmente. Le cycle thermodynamique devient celui en pointillé. De manière à ne pas dépasser la limite de température ISO (TLIMISO) la valeur limite de température d'échappement doit être changée de TLIM2 à TLIM3.

Le système de contrôle de débit de combustible, recalcule les nouvelles valeurs de limitation en température et quantité de combustible admissible dans ces conditions.

Le même raisonnement est valide pour la limite supérieure de température plus grande que TISO raison pour laquelle la valeur de température d'échappement monte à TLIM4 Le cycle Thermodynamique devient celui en ligne fine, De manière à ne pas dépasser la limite de température ISO (TLIMISO) la valeur limite de température d'échappement doit être changée de TLIM2 à TLIM4

Quand la température ambiante chute de Tiso à Tmin le taux de compression augmente et la pression d'entrée de la turbine augmente. Si on ne corrige pas la température tolérée à l'échappement, la conséquence sera un taux de détente plus forte et une température de détente beaucoup plus forte ce qui risque la détérioration des pièces et compartiment de la turbine.

III.4.1.4 Programme du contrôleur de température



Figure III.10 : Boucle de contrôle de température

Le programme de contrôle de la température lit les valeurs de température des thermocouples d'échappement et les classe du plus haut au plus bas. Ce tableau (TTXD2) est utilisé dans le programme de surveillance de la combustion ainsi que dans le programme de contrôle de la température.

Toutes les entrées de thermocouples d'échappement sont Surveillées et si une valeur est trop basse par rapport à une constante (TTKXCO), elle sera rejetée. La valeur la plus élevée avec la plus basse sont rejetées, les valeurs restantes feront la moyenne, cette moyenne étant Le signal TTXM.

III.5 Le signal de commande de combustible à gaz FSR

Le signal de tension FSR (Fuel Stroke Reference) est utilisé par le contrôleur MARK V TMR pour commander le débit de combustible entrant à la turbine à travers les deux soupapes SRV et GCV, le signal FSR, qui varie entre FSR MIN et FSR MAX, est utilisé en pourcentage par rapport au FSRMAX. Il y a cinq valeurs utilisées par les modes de contrôle :

- **FSR zéro** : Au moment de la phase initiale du lancement, le FSR est maintenu à une valeur nulle. Lorsqu'une quantité suffisante d'air est fournie au système de combustion, la turbine est prête Pour l'allumage.

- **FSR allumage** : Le FSR d'allumage fournit une quantité suffisante de combustible aux chambres de combustion pour assurer un allumage correct et la propagation de la flamme entre les chambres de combustion.
- **FSR réchauffage** : Après détection de flamme, le niveau du FSR est abaissé pour réduire le combustible et le choc thermique sur les pièces exposées au gaz chaud, ce qui permet à la turbine de se réchauffer.
- **FSR accélération** : Après réchauffage, on peut accélérer la turbine, le FSR est augmenté progressivement du niveau de réchauffage à un niveau d'accélération maximum, pour préparer la prise en charge par le régulateur de vitesse.
- **FSR maximum** : Ceci est la valeur maximum du FSR qui peut être demandée par la turbine quand elle est sous la commande du régulateur de vitesse.
- **FSR minimum** : La FSR minimum, appelé plus correctement « le combustible minimum d'extinction », Cette quantité de combustible maintient la flamme dans les chambres de combustion, mais ne produit pas suffisamment d'énergie pour garder la turbine à la vitesse nominale.

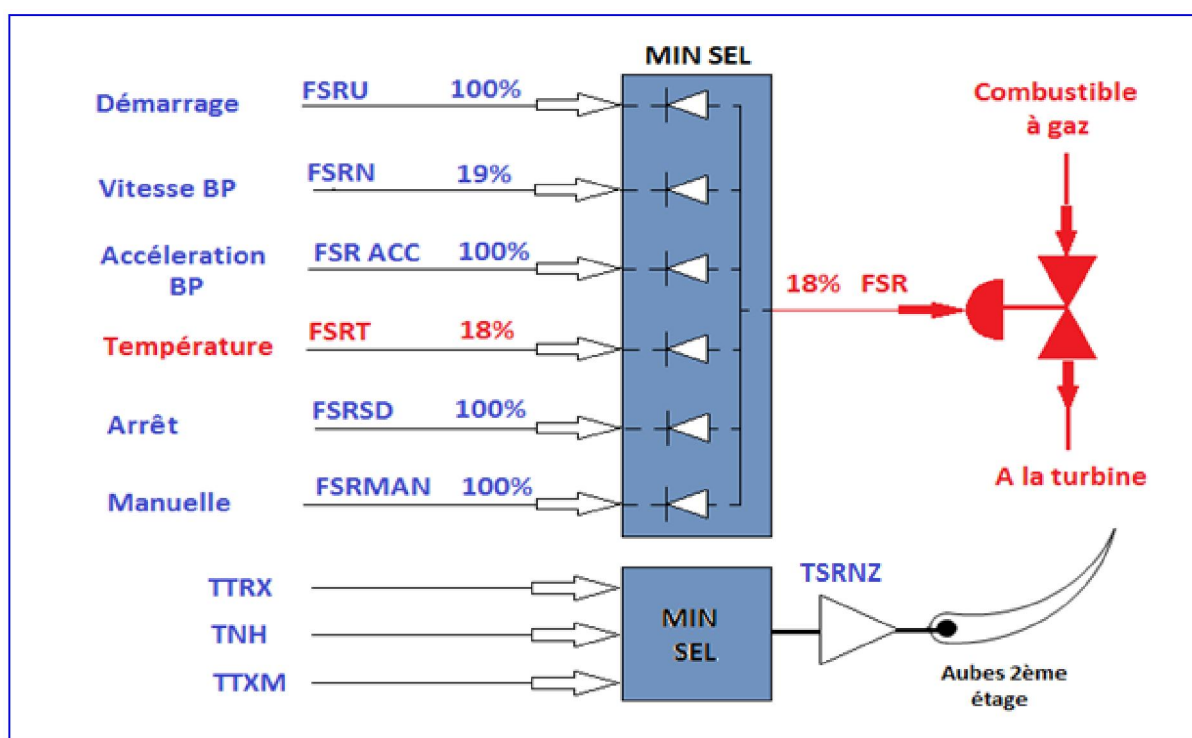


Figure III.11 : Boucles de contrôle de MARK V TMR SPEEDTRONIC.

III.5.1 Le système de contrôle d'alimentation en gaz combustible

Le système de contrôle commande la turbine en fonction de combustible à gaz entrant à la turbine en utilisant le signal FSR. Il compare la vitesse actuelle des arbres HP et LP avec la vitesse de consigne demandée et récompense la différence en changeant le FSR qui se convertit à une position aux soupapes SRV et GCV ainsi que d'autres paramètres (la position des I.G.V et la position des NGV. Même procédure dans cas où le système est en contrôle de température où le paramètre contrôlé est la température au lieu de vitesse.

La commande de chaque soupape de combustible (SRV, GCV) se fait par une servo-soupape excitée par trois bobines redondantes reliée chacune à un des trois contrôleurs RST.

La servo-soupape est l'interface entre le signal électrique d'excitation et le système mécanique qui change la position de soupape, le taux de mouvement d'un actionneur hydraulique de la soupape est en fonction du courant entrant à la servo-soupape.

Un mécanisme de sécurité par un ressort positionne la soupape SRV « la position fermée » en cas d'une défaillance à la commande de la servo-soupape.

Les deux soupapes SRV et GCV sont munies de deux capteurs de positionnement d'actionneur de soupape LVDT chacune et comme mesure de sécurité, mal fonctionnement d'un LVDT à une des deux vannes n'influe pas sur le fonctionnement de soupape. Une tension AC est créée par LVDT comme un signal de retour (rétroaction) indiquant au contrôleur le positionnement de la soupape.

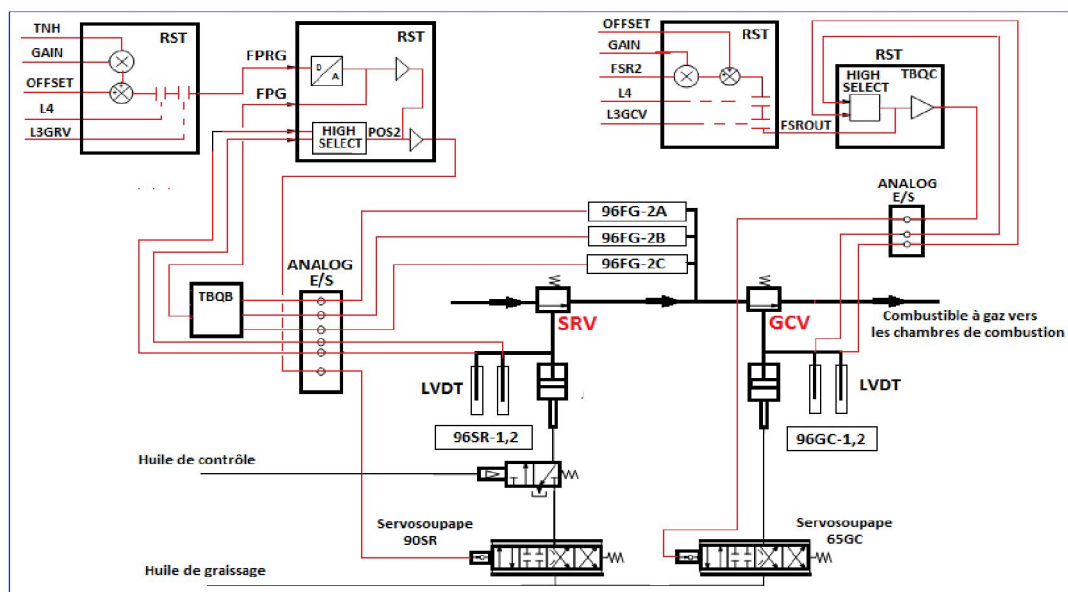


Figure III.12 : Système de contrôle d'alimentation en gaz combustible.

III.6 Les caractéristiques de MARK V TMR

III.6.1 L'architecture (TMR)

Le système de contrôle Mark V a une architecture redondante modulaire triple (TMR) qui utilise la procédure de vote et la procédure SIFT (Software Implemented Fault Tolerance) pour une commande précise et fiable de la machine.

Au début de chaque trame de temps de calcul, chaque module de contrôle R.S.T lit indépendamment les signaux des capteurs (rassemblés en valeurs numériques dans un tableau dans le processeur) et échange ces données avec les deux autres modules.

La valeur médiane de chaque entrée analogique de chaque module de contrôle est calculée en chaque dispositif de commande et ensuite utilisée en tant que paramètre de commande pour ce module de contrôle.

L'algorithme de microprocesseur de chaque module de contrôle lit toutes les entrées analogiques et les compare avec les valeurs d'une bande prédéfinie, Si une des entrées analogiques s'écarte de cette bande, une alarme est activée pour alerter l'opérateur.

Les contacts d'entrées redondants sont liés à un point terminal unique et montés en parallèle sur trois cartes de contact d'entrée et ensuite transmis aux contrôleurs R.S.T pour un vote individuel et similaire avant l'exécution des applications de logiciel.

III.6.2 Fonction SIFT

La procédure SIFT (Software Implemented Fault Tolerance) fait appel à un échange de données par la liaison de vote directement entre les processeurs (R), (S), (T) et (C).

Chaque processeur de commande mesure tous ses signaux d'entrée et de sortie, ensuite chaque signal est représenté par une valeur numérique dans le processeur. Ces valeurs numériques qui doivent être soumises à un vote sont rassemblées dans un tableau de valeurs. Chaque processeur de commande envoie ses tableaux sur la liaison de votes et reçoit les tableaux des autres processeurs.

Considérons par exemple le processeur (R), il envoie ses tableaux aux processeurs (S) et (T) et reçoit de ceux-ci leurs tableaux. Les trois tableaux se trouvent alors dans le processeur (R) qui choisit la valeur médiane de chaque sortie de détecteur

III.6.4.1 Survitesse mécanique HP/BP

Le système mécanique de protection contre la survitesse remplace le système électronique de protection contre la survitesse en cas de défaillance de ce dernier.

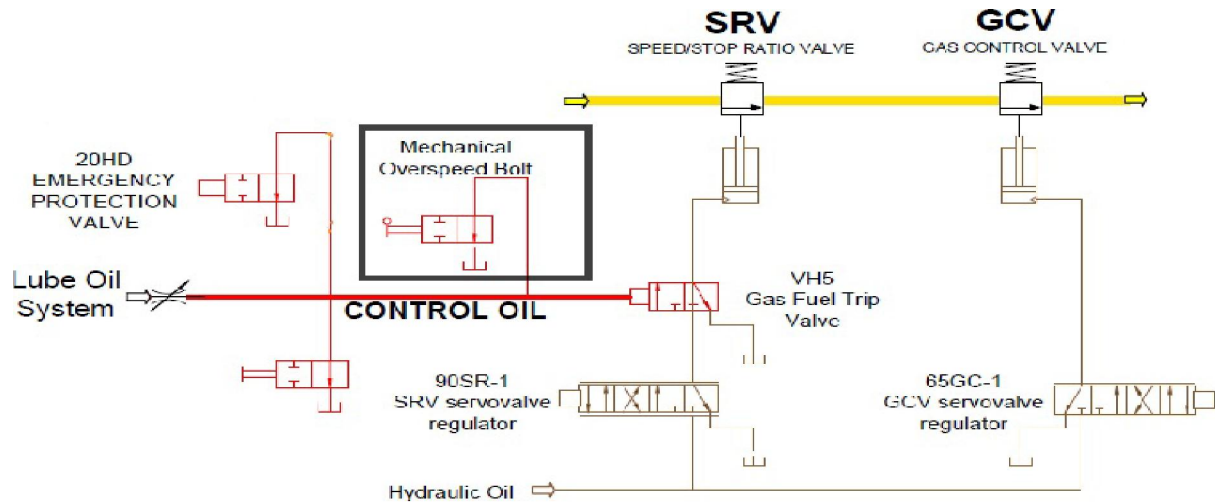


Figure III.14 : Système mécanique de protection contre la survitesse

III.6.4.2 Vanne de décharge manuelle

La vanne de décharge manuelle est utilisée en cas d'arrêt d'urgence de la turbine.

III.7 Les différents systèmes de protections

Plusieurs systèmes de protection sont incorporés dans le système global de commande pour couper l'arrivée du combustible de façon à protéger la turbine dans les cas où des états anormaux se présentent.

Le système BENTLY NIVADA control les vibrations des arbres de la turbine et du compresseur centrifuge.

La turbine MS-5002C est dotée aussi par le système DET TRONIC qui assure la protection de la turbine en cas d'une fuite de gaz, ou un incident à l'intérieur de l'enclosure de la turbine.

Le compresseur centrifuge est doté par un système anti-pompage de régulation du débit à l'aspiration, permettant de maintenir le compresseur dans un champ stable de fonctionnement en assurant le rapport de compression quel que soit sa nature.

Ces trois systèmes coordonnent avec le MARK V pour assurer le bon fonctionnement de l'unité.

III.7.1 Protection de survitesse

Le système de protection de survitesse consiste en un système primaire et secondaire. Le système primaire est un système de protection électronique et le système de protection secondaire est mécanique, il comprend des masses de survitesse HP et BP.

La masse de survitesse HP est assemblée dans l'arbre du réducteur des auxiliaires, ainsi la masse de survitesse BP est placée dans l'arbre de la turbine second étage.

III.7.2 Protection d'excès de température

Le système protège la turbine contre les dégâts pouvant être provoqués par un excès de combustible.

Il s'agit d'un système de sécurité qui n'agit qu'après défaillance de la boucle de régulation de la température.

La température moyenne à l'échappement est comparée à un seuil d'alarme pour fournir un signal d'alarme, elle est aussi comparée à un seuil de déclenchement pour fournir un signal de déclenchement pour arrêter la turbine à gaz.

III.7.3 Protection contre les vibrations (BENTLY NEVADA)

Le système de protection contre les vibrations d'une turbine à gaz utilise des capteurs de vibration pour la turbine et le compresseur centrifuge.

Les signaux délivrés par ces capteurs sont traités puis comparés à un seuil d'alarme et un seuil de déclenchement pour fournir un signal d'alarme, ou pour l'arrêt de la turbine à gaz en cas de vibrations excessives.



Figure III.15 : Bently Nevada 3500

III.7.4 Protection contre les basses pressions d'huile de lubrification

Ce système de protection est conçu pour protéger les paliers de la turbine à gaz contre tout dommage éventuel causé par une basse pression d'huile ce qui peut causer des frottements des arbres contre les paliers.

III.7.5 Protection contre la perte de flamme

Les détecteurs de flamme remplissent deux fonctions, l'une dans le système de séquence de lancement et l'autre dans le système de protection.

Pendant le démarrage, ils indiquent le moment où la flamme s'est établie dans les chambres de combustion, permettant à la séquence de lancement de se poursuivre.

Durant la marche normale, si les détecteurs indiquent une perte de flamme alors la turbine est immédiatement arrêtée pour empêcher le combustible non brûlé de pénétrer dans l'échappement.

III.7.6 Protection contre l'incendie

Le système de protection anti-incendie par injection de dioxyde de carbone(CO₂) est conçu pour éteindre les incendies, en réduisant rapidement la teneur en oxygène de l'air dans un compartiment à moins de 15 % (en volume) par rapport à une concentration normale dans l'air ambiant située à environ 21 % ; cette concentration est insuffisante pour permettre le phénomène de combustion.

La décharge initiale ouvre une partie des bouteilles et produit une grande concentration de CO₂ dans le compartiment.

Dans le même temps les volets d'entrée et sortie des ouvertures du compartiment sont fermées par leurs propres vérins grâce au même signal qui a déclenché les bouteilles.

Pour compenser les fuites par les volets et maintenir la pression de CO₂ une décharge graduelle de la deuxième partie des bouteilles est réalisée automatiquement.

III.7.7 Protection contre les pulsations au démarrage et à l'arrêt

Les caractéristiques de pression et de débit du compresseur sont telles qu'elles demandent un équipement spécial et une séquentielle des composants de la turbine pour empêcher le pompage du compresseur au cours de l'accélération pour prendre sa vitesse dans la séquence de démarrage.

La protection contre le pompage est également nécessaire pendant la séquence d'arrêt et de décélération lorsque la turbine est déclenchée et qu'il n'y a plus de flamme dans le système de combustion.

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit l'automate programmable MARK V SpeedTronic ainsi son architecture et la spécification de chaque module, aussi que le système de contrôle de la température de combustion.

Le MARK V est conçu spécialement pour la protection et la surveillance de la turbine à gaz. L'avantage majeur du MARK V SpeedTronic par rapport aux autres automates est la redondance matérielle et le système de vote dans le contrôle, qui a amélioré la fiabilité du système.

La sécurité de la turbine est assurée par un certain nombre de dispositifs, dont certains sont réservés pour des conditions de marche anormale ou des cas d'urgences demandant l'arrêt immédiat de la turbine pour empêcher tout dommage important aux équipements et composants de la turbine.

IV.1 Introduction

La logique floue est une extension de la logique classique qui permet la modélisation des imperfections des données et se rapproche dans une certaine mesure de la flexibilité du raisonnement humain.

IV. 2 Notions sur la logique floue

La pensée humaine est une symbiose de la logique et de l'imagination, agissant de concert ou séparément.

La logique humaine est un enchaînement d'idées, de concepts, concrets ou abstraits, aboutissant à des conclusions.

Les sens et le jugement d'un être humain ne lui permettent pas une évaluation exacte de certaines grandeurs (comme la hauteur d'une construction par exemple), les ingénieurs qui n'ont pas la possibilité d'effectuer des mesures formelles ou probabilistes, ils s'intéressent aux concepts introduits par les mathématiques floues.

Les mathématiques floues sont utilisées quand il n'existe pas d'antécédent, ou dans le cas des interactions homme-machine et surtout quand on doit mettre en œuvre des nouveautés scientifiques dont seulement quelques experts sont capables de proposer des données.

L'introduction de nouveaux formalismes tels que La logique floue dans le domaine de l'automatique a suscité un intérêt sans cesse croissant depuis les années soixante dix leur intérêt réside dans leur capacité à traiter l'imprécis, l'incertain le vague, et de l'exprimer avec des outils mathématique approchés (une autre tentative pour modéliser les incertitudes). Nous allons voir quelques définitions sur la logique floue et les étapes de son raisonnement.

IV.2.1 Historique de la logique floue

IV.2.1.1 Apparition de la logique floue

La plupart des histoires que l'on peut rencontrer sur la logique floue se présentent à la manière d'une histoire des idées.

Il s'agit généralement d'histoires de l'invention d'une théorie.

Ces récits insistent le plus souvent sur le fait que la logique floue permet de prendre en compte une infinité de degrés de vérité contrairement à la logique binaire, qui ne permet d'exprimer que deux valeurs de vérité ("vrai" et "faux").

Le premier article sur la logique floue a été publié en 1965 par un professeur d'automatique de l'Université de Californie à Berkeley, Lotfi Zadeh.

Plusieurs de ces récits sont structurés par le déploiement d'un registre spécifique, celui des motivations du développement d'une théorie logique, propres à son inventeur.

IV.2.1.2 Le premier contrôleur floue

Le premier contrôleur flou a vu le jour en 1975 à Londres grâce aux études faites par le professeur Mamdani qui a développé une stratégie pour le contrôle des procédés.

Ce travail est la première application de la logique floue. Trois ans plus tard, une société danoise F.L.Smidth réalise le premier contrôleur industriel pour un four à ciment.

Dans les années 80, plusieurs applications commencent à immerger (Notamment au Japon).

En 1987, l'explosion du floue au Japon (avec le contrôle du métro de Sendai) et qui atteint son apogée en 1990 (fuzzymania).

IV.3 Les différents types de régulateurs flous

IV.3.1 Le régulateur de type Mamdani

Mamdani avait présenté pour la première fois la technique de réglage par logique floue, qui consiste à déterminer un ensemble de comportement dynamique du système à commander.

Un contrôleur de ce type est conçu pour réguler, asservir une variable de sortie d'un système, soit uniquement à partir de l'erreur, ou à partir de l'erreur et de sa variation.

La forme générale des règles de Mamdani est :

Si $X_1 = A1$ ET $X_2 = A2$ ALORS $Z = B1$

IV.3.2 Régulateur de type Sugeno

Le modèle de Sugeno est connu sous le nom TSK, car il a été proposé par Talkagi, Sugeno et Kang en 1988. Dans ce type de régulateurs les sorties sont des fonctions linéaires. La méthode de Sugeno est bien adaptée à l'automatique et aux problèmes d'ingénierie en général. Le système flou de type Sugeno, utilise des règles écrites de la manière suivante :

Si $X_1 = A1$ ET $X_2 = A2$ ALORS $Y = Z_1 X_1 + Z_2 X_2 + Z_0$

IV.4 Définitions de base

IV.4.1 La logique floue

Contrairement à la logique classique (binaire), les variables de la logique floue peuvent prendre plusieurs valeurs intermédiaires du vrai vers le faux.

La logique floue n'est pas floue mais fondé sur la théorie des sous-ensembles flous qui permet de traiter des problèmes vagues, imprécis et flous

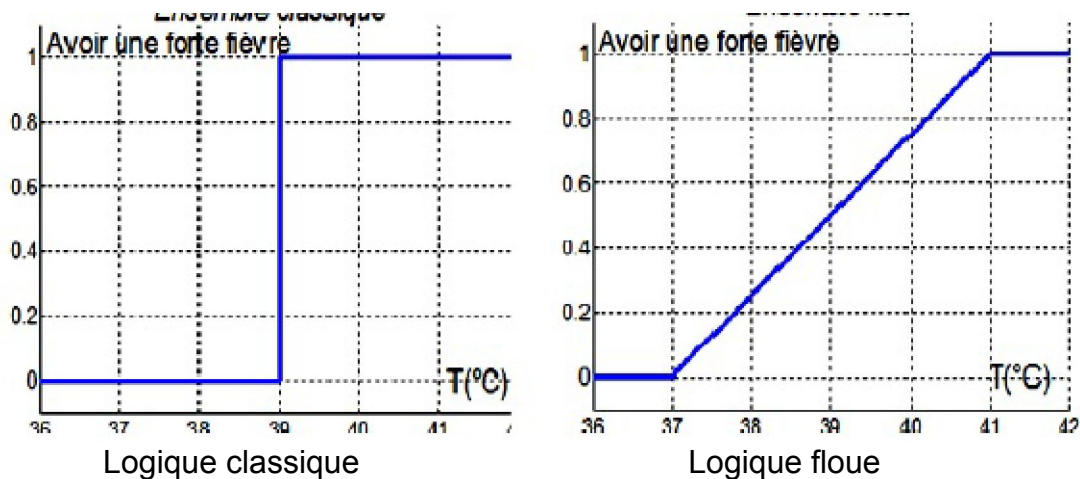


Figure IV.1 : Comparaison entre la logique classique et la logique floue

IV.4.2 Ensemble flou

C'est l'élément de base de la logique floue introduit pour la première fois par Zadeh en 1965.

L'ensemble flou est une extension de l'ensemble classique.

L'appartenance d'un tel élément à un tel ensemble peut prendre toutes les valeurs comprise entre 0 et 1.

Un ensemble flou A est défini sur un univers de discours U (ensemble d'éléments discrets ou continus) par sa fonction d'appartenance μ_A .

La grandeur $\mu_A(x)$ définit le degré d'appartenance de l'élément x à l'ensemble A.

$$\mu_A : U \rightarrow [0, 1] / x \rightarrow \mu_A(x).$$

$$A = \{(x, \mu_A(x)) / x \in U\}.$$

$$\text{Sup}(A) = \{x \in U / \mu_A(x) \neq 0\}.$$

$$\text{Noy}(A) = \{x \in U / \mu_A(x) = 1\}.$$

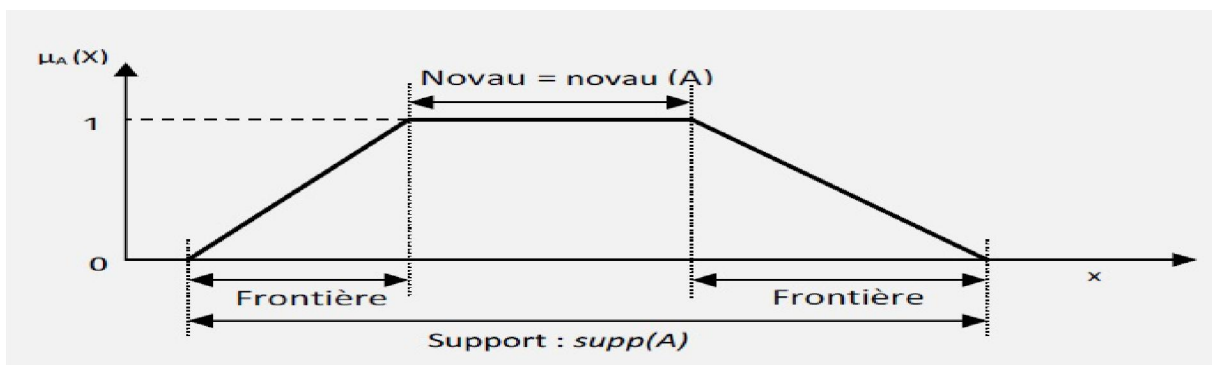


Figure IV.2 : Exemple d'un ensemble flou.

• L'ensemble flou vide est noté \emptyset , il est défini par :

$\mu_{\emptyset}(x) = 0$, avec $x \in U$.

IV.4.3 La fonction d'appartenance

La fonction d'appartenance permet de mesurer le degré d'appartenance d'un élément à un ensemble flou. Elle est noté $\mu_A(x)$, les fonctions d'appartenance peuvent théoriquement prendre n'importe quelle forme mais en général les formes les plus utilisées sont définies par des formes géométriques comme le montre la figure IV.3 :

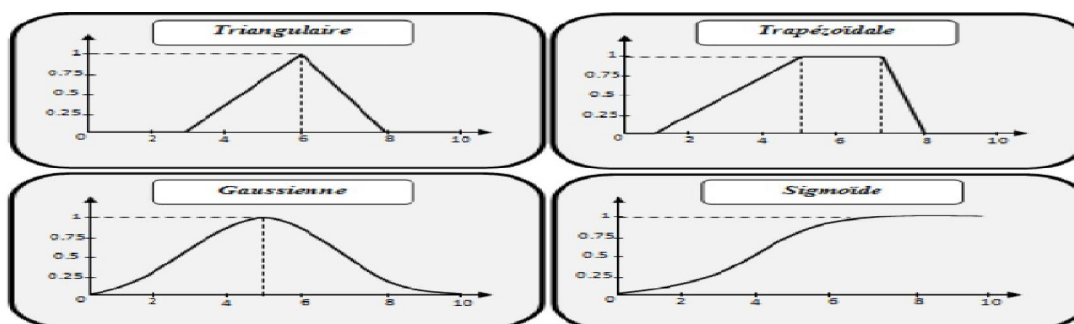


Figure IV.3: Formes des fonctions d'appartenances les plus utilisées

IV.4.4 Variables linguistiques

Une variable linguistique est un triplet (V, X, T_v) , dans lequel V est une variable définie sur un ensemble de référence X . L'ensemble $T_v = A_1, A_2, \dots$, fini ou infini, contient des sous-ensembles flous normalisés de X , utilisables pour caractériser V .

Selon l'utilisation qui doit être faite, le nombre d'éléments de T_v est plus ou moins grand.

La figure IV.4 illustre une variable linguistique (V, X, T_v) utilisée pour décrire le dimensionnement d'un pilier souterrain, dont $V =$ Dimensionnement et $T_v =$ Très Petit, Petit, Moyen, Grand, Immense.

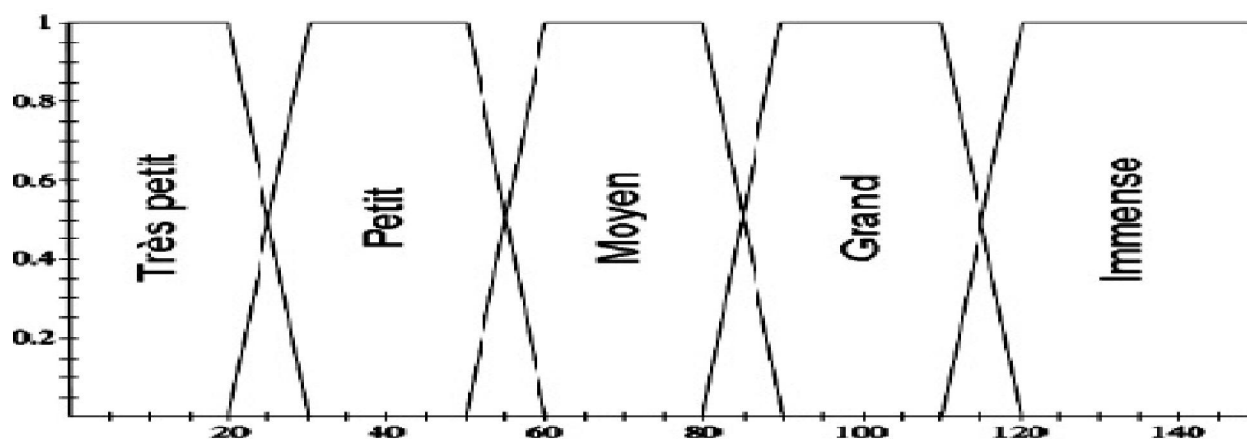


Figure IV.4 : Variable linguistique décrivant le dimensionnement d'un pilier.

IV.4.5 Univers de discours

Pour expliquer qu'est-ce qu'un univers de discours, on peut prendre un exemple : La taille des personnes ou l'utilisateur pourra décrire la variable la taille_ par un certain nombre de mots par exemple «petite, moyenne, grande». L'univers de discours d'une variable donnée couvre l'ensemble des valeurs prises par cette variable dans le cas réel.

Exemple : une personne mesure 1m62, se traduit en logique floue par :

- «Adel est petit» à un degré de 75 %.
- «Adel est moyen » à 25 %.
- «Adel est grand » à 0 %.

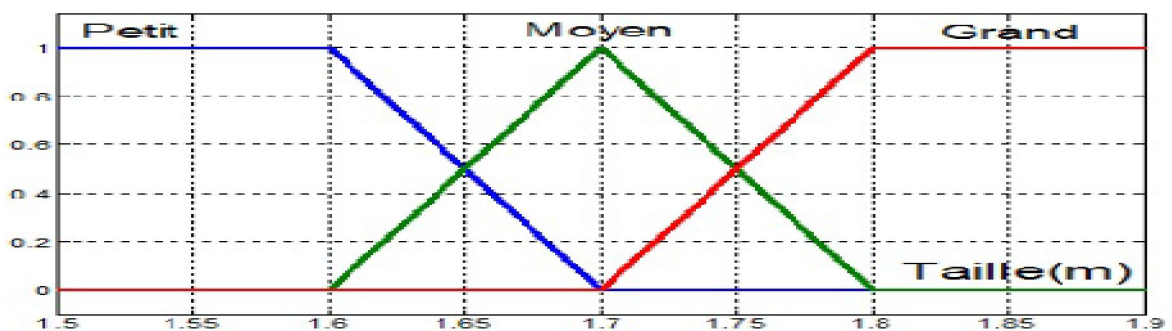


Figure IV.5 : Partition floue d'un univers de discours.

IV.4.6 Opérateur logique floues

Les opérateurs les plus utilisés sont ceux de Zadeh, on définit l'union, l'intersection et le complément des ensembles flous.

IV.4.6.1 L'union

On prend :

- A est l'ensemble flou des personnes petites.
- B est l'ensemble flou des personnes moyennes.

L'ensemble des personnes petites OU moyennes est un ensemble flou de fonction d'appartenance :

$$\mu (A \cup B) (x) = \max (\mu A (x), \mu B (x)) \forall x \in U.$$

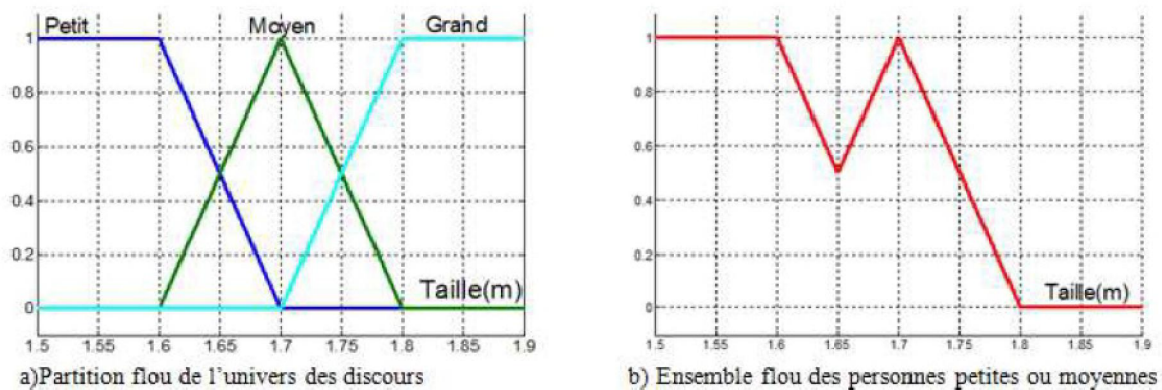


Figure IV.6 : L'union des sous ensembles flous petite OU moyenne.

IV.4.6.2 L'intersection

L'ensemble des personnes petites ET moyennes est un ensemble flou de fonction d'appartenance :

$$\mu (A \cap B) (x) = \min (\mu A (x), \mu B (x)) \forall x \in U.$$

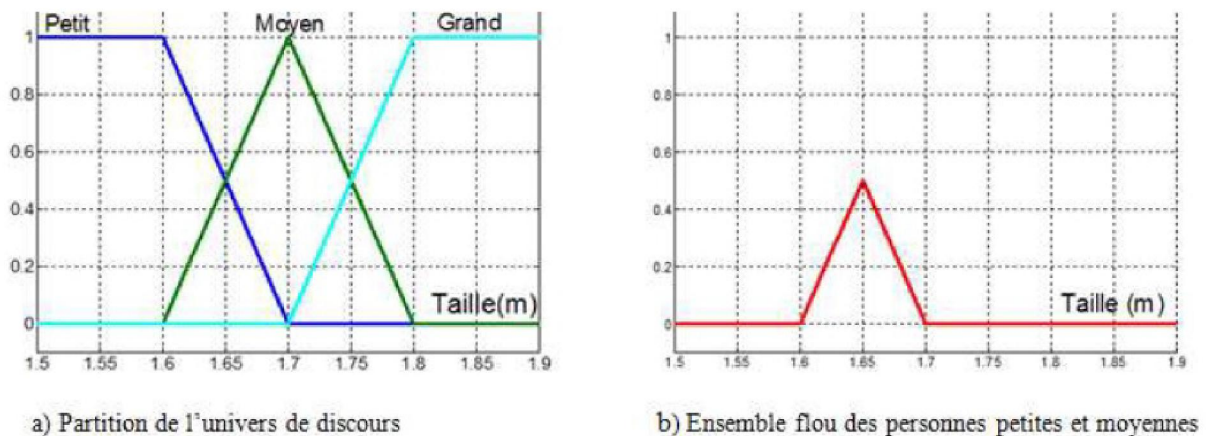


Figure IV.7 : Intersection des sous-ensembles flous petite ET moyenne.

IV.4.6.3 Le complément

- A est l'ensemble flou des personnes petites.

L'ensemble des personnes NON petites est un ensemble flou de fonction d'appartenance :

$$\mu A(x)=1-\mu A(x) \forall x \in U.$$

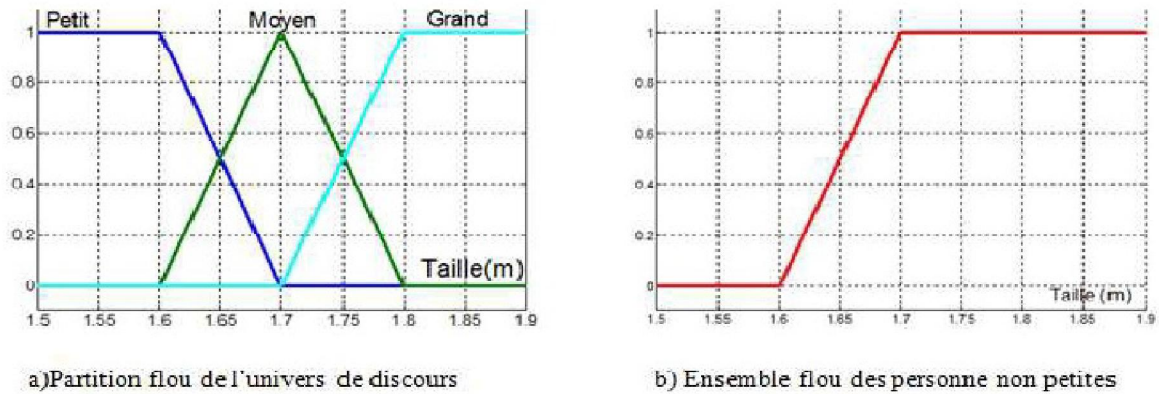


Figure IV.8 : Complément d'un sous-ensemble flou des personnes petites.

IV.4.7 Les règles floues

C'est une combinaison entre une condition, généralement nommée prémisse qui dépendre de plusieurs variables liées entre elles par des opérateurs ET, OU, NON et une conclusion ou conséquence, exemple : SI « température est élevée ET pression est forte » ALORS « ventilation forte ET soupape grande ouverte » .

IV.5 La régulation par la logique floue

Contrairement à la régulation classique, la régulation par la logique floue ne traite pas une information comme une relation mathématique bien définie, mais elle utilise des inférences avec plusieurs règles.

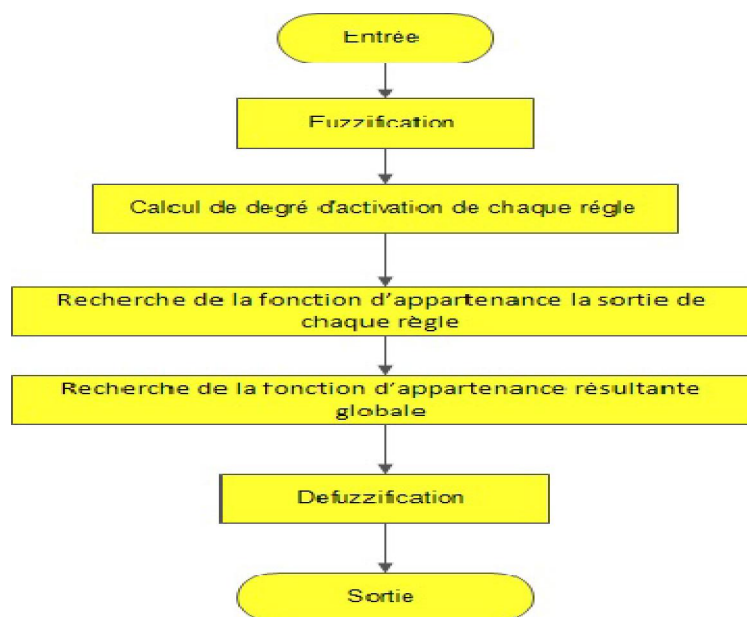


Figure IV.9 : Traitement de l'information par la logique floue.

IV5.1 Fuzzification

C'est une phase délicate du processus mis en œuvre par la logique floue, elle est souvent réalisée de manière itérative et demande de l'expérience.

Pour réaliser cette phase de fuzzification on doit définir la plage de variations possibles de l'entrée considéré (univers du discours), une partition en classe floue de cet univers et les fonctions d'appartenances de chacune de ces classes.

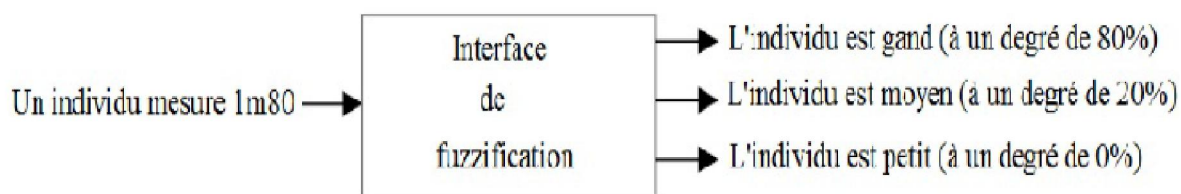


Figure IV.10 : Exemple de fuzzification.

IV5.2 Inférence floue

Opération logique par laquelle on admet une proposition en vertu de sa liaison avec d'autres propositions tenues pour vraies.

On peut écrire les règles d'inférence sous plusieurs formes :

➤ Sous forme linguistique

Exemple :

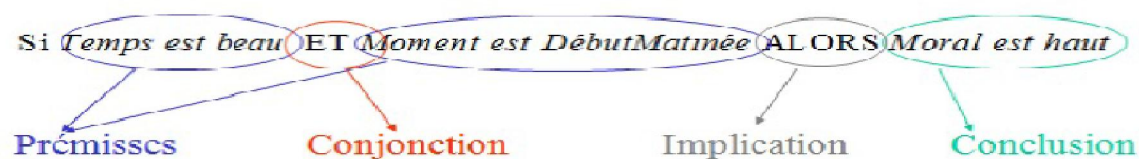


Figure. IV.11 : Exemple de forme linguistique

➤ Par des symboles

Exemple : si T est B alors P est F :

Avec T : Température, B : Basse, P : Pression, F : Forte.

➤ Avec la matrice d'inférence

Cette méthode rassemble toutes les règles d'inférences sous forme d'un tableau.

Exemple :

| | | | | |
|---|---|---|---|----|
| U | | T | | |
| F | | M | E | |
| V | F | Z | P | GP |
| V | E | Z | Z | P |

Table IV.1 : Représentation matricielle des règles d'inférences floues.

IV.6 Méthodes d'inférence

➤ Méthode d'inférence Max-produit

Dans cette méthode :

- L'opérateur ET réalise la fonction minimum entre les conditions d'une règle.
- L'opérateur OU réalise la fonction maximum entre deux ou plusieurs règles.
- L'opérateur ALORS réalise le produit.

Dans cette méthode (appelée aussi l'implication de larsen) la conclusion ALORS est réalisée par le produit.

La figure IV.12 illustre un exemple d'inférence Max-produit.

➤ Méthode d'inférence Max-min

Dans cette méthode :

- L'opérateur ET réalise la fonction minimum entre les conditions d'une règle.
- L'opérateur OU réalise la fonction maximum entre deux ou plusieurs règles.

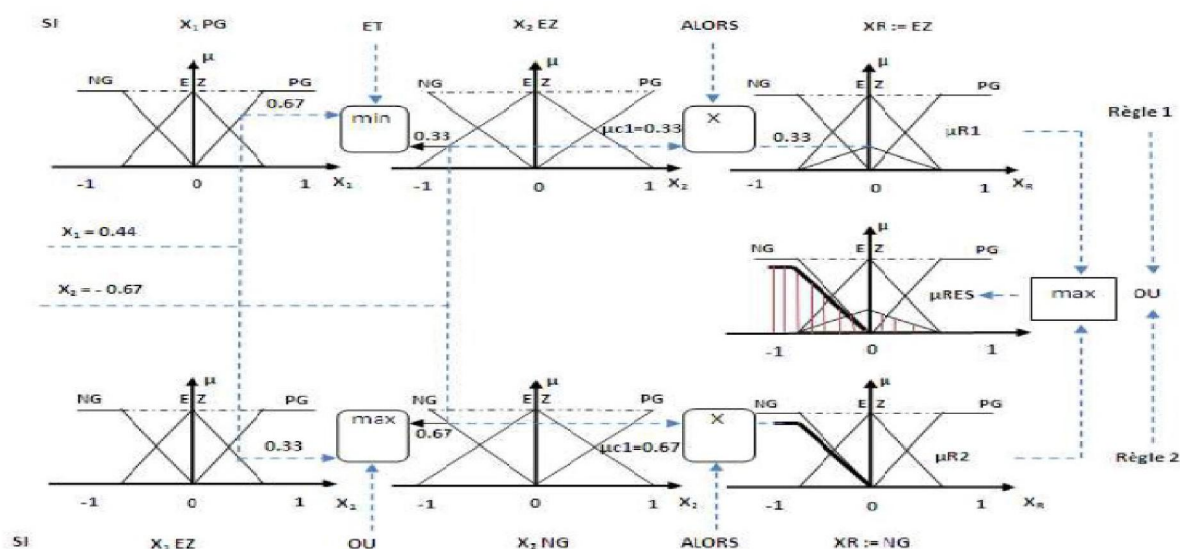


Figure IV.12 : Exemple d'inférence Max-produit.

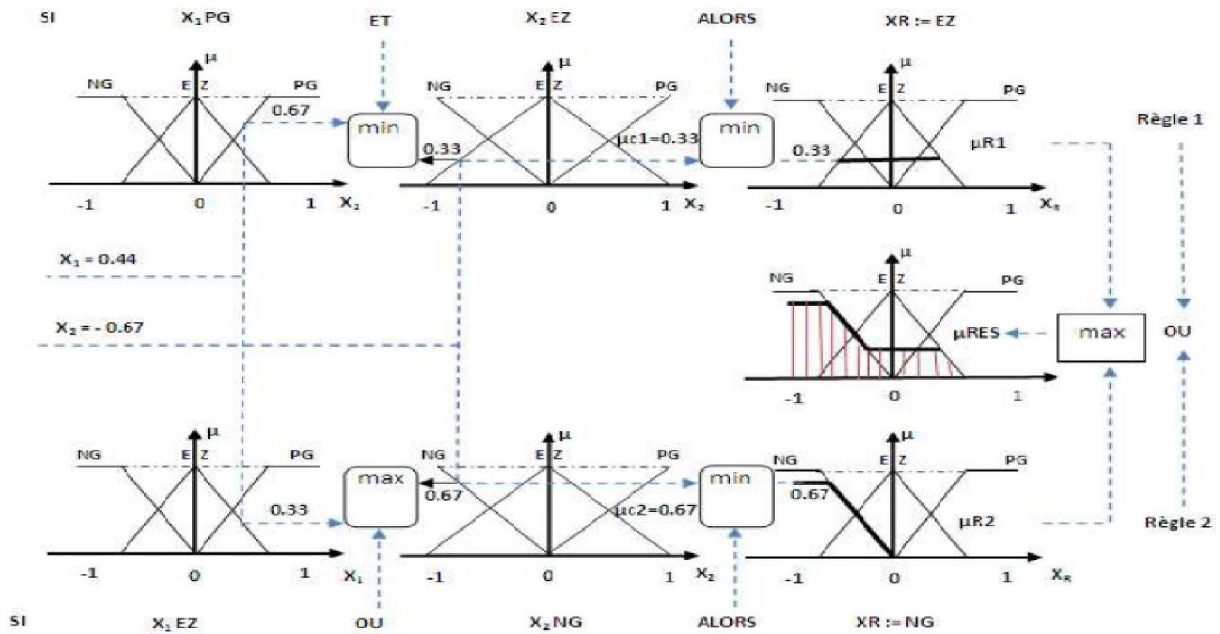


Figure IV.13 : Exemple d'inférence Max-min.

Cette méthode dite aussi «méthode de Mamdani », est la plus utilisée.

La figure IV.13 illustre un exemple d'inférence Max-min.

➤ **Méthode d'inférence Somme-Produit**

Dans cette méthode :

- L'opérateur OU est réaliser par la somme.
- L'opérateur ET est réaliser par le produit.
- L'opérateur ALORS est réalisé par le produit.

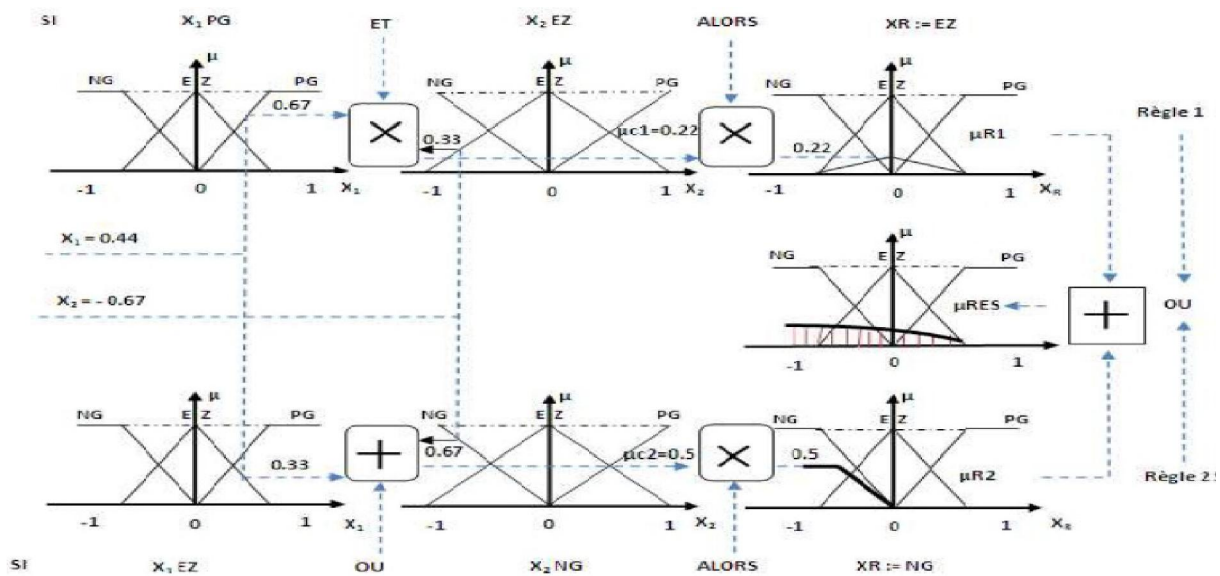


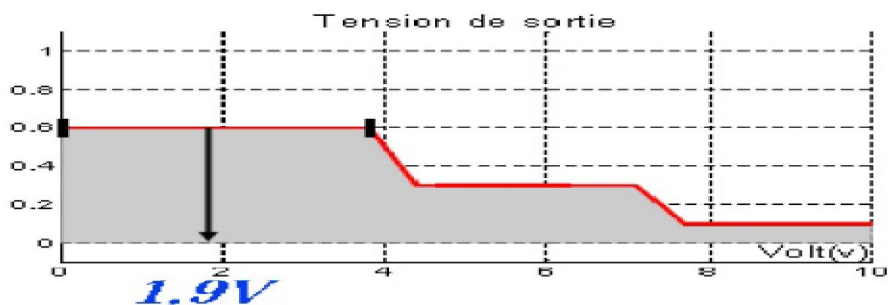
Figure IV.14 : Exemple d'inférence Somme-Produit.

IV.7 Défuzzification

Il s'agit de déterminer la valeur de la sortie physique à appliquer au système. Passage de variables floues aux variables réels. Pour déterminer la valeur de la sortie, on donne les deux méthodes les plus utilisées :

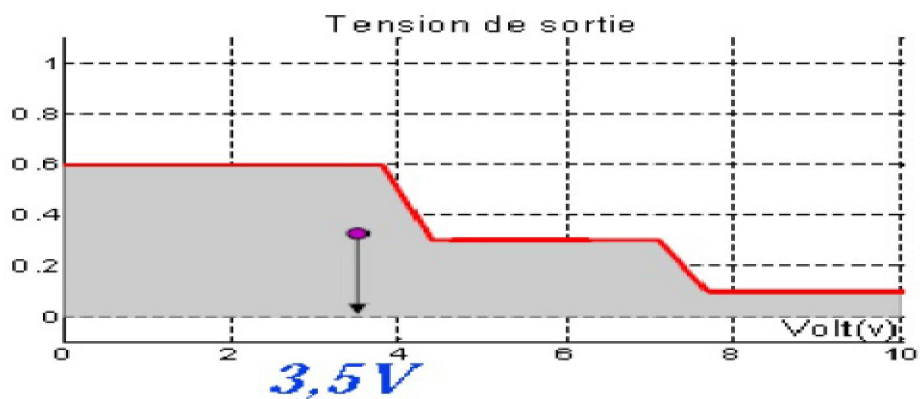
➤ **Méthode moyenne des maximums (MM)**

C'est la moyenne des valeurs de sorties les plus vraisemblables :



➤ **Méthode du centre de gravité (COG)**

C'est l'abscisse du centre de gravité de la surface sous la courbe résultat :



IV.8 Les étapes de conception de contrôleur flou FLC

Les étapes de conception de contrôleur flou FLC sont résumées dans l'organigramme suivant :

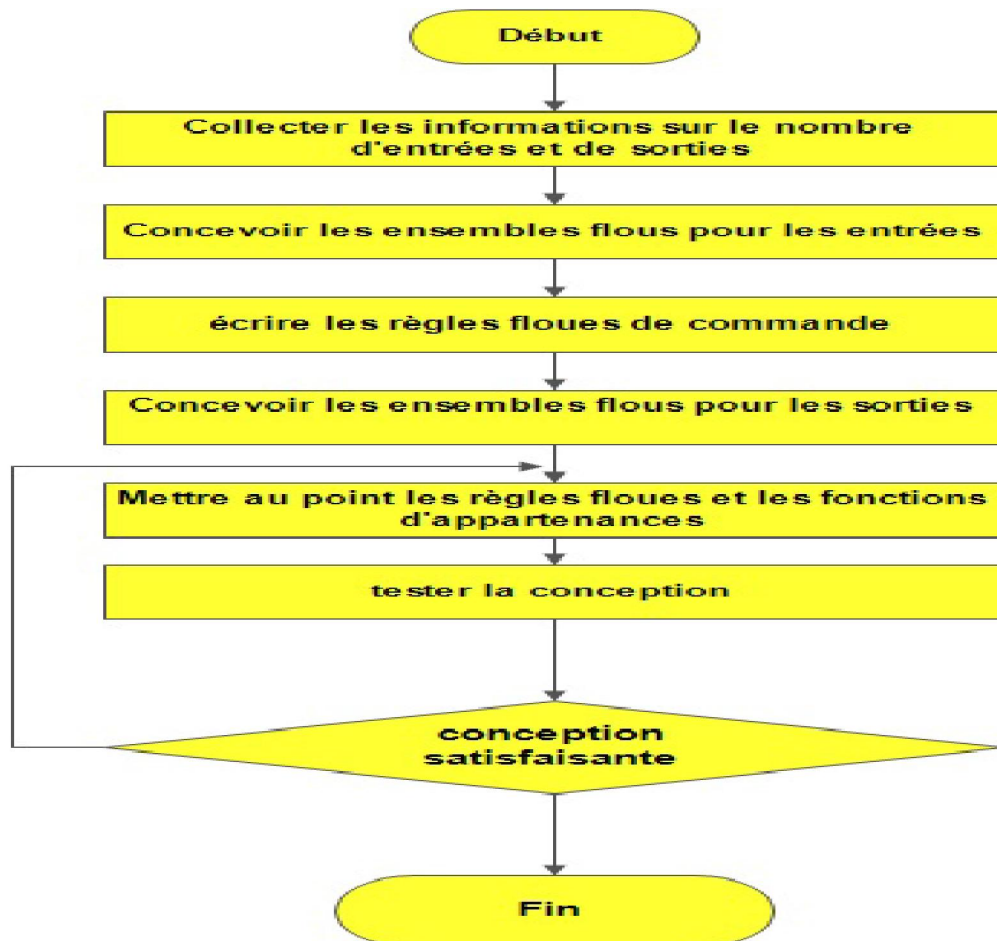


Figure IV.17 : Etapes de conception du contrôleur flou

IV.9 Exemple de comparaison entre la régulation classique et la régulation basée sur la logique floue

IV.9.1 Objectif

L'objectif de ce TP est de comparer trois correcteurs différents, un correcteur Proportionnel Intégral (PI), un correcteur Proportionnel Intégral Dérivé (PID) et un correcteur basé sur la logique floue.

IV.9.2 Cahier des charges

Soit le système linéaire à temps continu représenté par sa fonction de transfert :

$$G(p) = \left(\frac{1}{(1+5p)^2} \right)$$

On souhaite introduire ce système dans une boucle de correction afin d'améliorer ses performances (minimiser le dépassement, éliminer l'erreur statique).

Le schéma de correction adopté est indiqué sur la figure suivante :

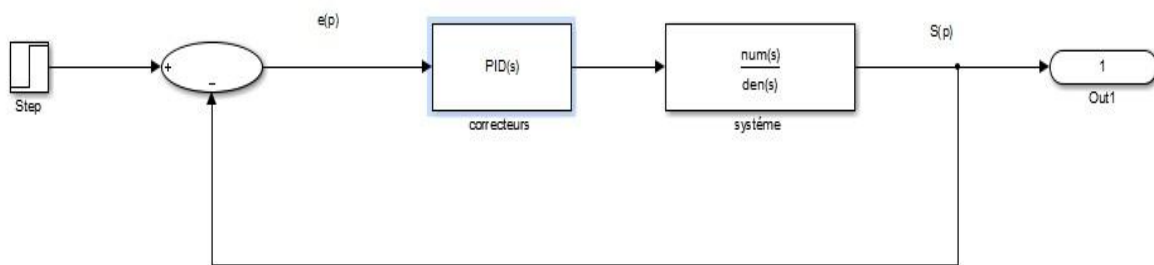


Figure IV. 18 : Schéma bloc en boucle fermée

L'objectif de ce TP est de synthétiser le correcteur qui permet l'obtention des caractéristiques suivantes :

- Dépassement minimal
- Erreur statique de position nulle : $\lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon(t) = 0$

On donne $T_i = 25 \text{ s}$ et $K = 5.4$ et $T_d = 0.5 \text{ s}$

IV.9.3 Synthèse du correcteur PI

Fonction de transfert

$$C(p) = k \frac{1+T_i p}{T_i p}$$

$$C(p) = \frac{13}{2} \frac{5p+5.4}{5p}$$

IV.9.4 Synthèse du correcteur PID

Fonction de transfert en boucle fermée

$$C(p) = k \left(1 + \frac{1}{T_i p} + T_d p \right)$$

$$H(p) = \frac{134.3 P^2 + 268.6 P + 13.43}{500 P^3 + 200 P^2 + 20 P}$$

IV.9.5 Synthèse du correcteur basé sur la logique floue

IV.9.5.1 Choix et configuration du correcteur

Dans cette étape on définit le nombre des entrées, sorties et le type du correcteur (Sugeno, Mamdani).

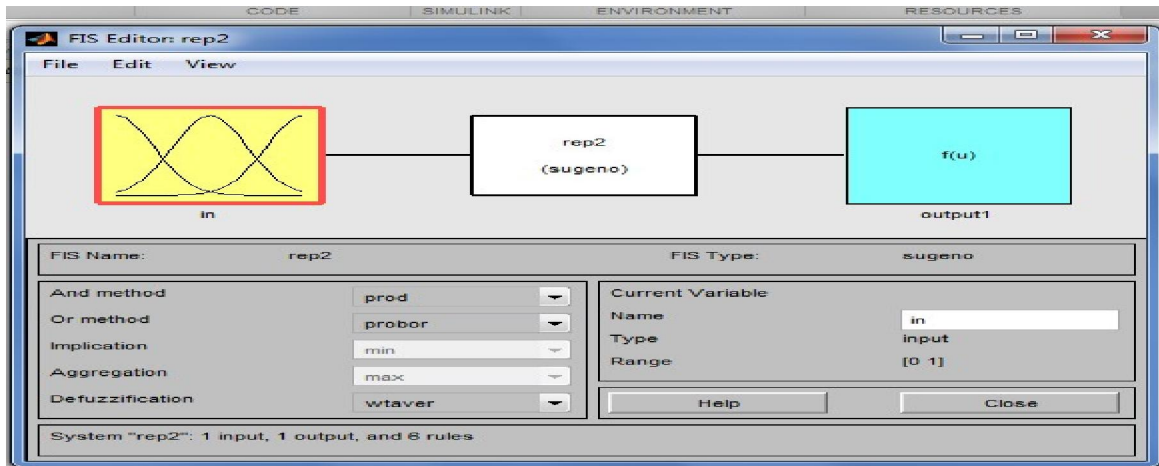


Figure IV.19 : Configuration du correcteur flou

IV.9.5.2 Configuration des ensembles d'entrée

Dans cette étape on fixe les frontières et le centre pour chaque ensemble.

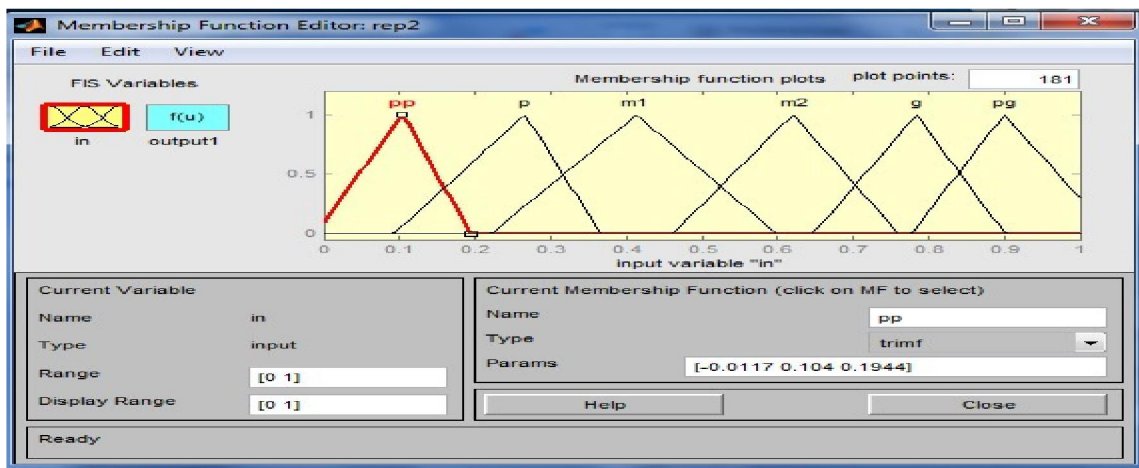


Figure IV.20 : Configuration des ensembles d'entrée

IV.9.5.3 Configuration des ensembles de sortie

Pour la sortie le type des fonctions d'appartenances est constant, on doit leurs donner puis changer les paramètres jusqu'à l'obtention des paramètres optimales.

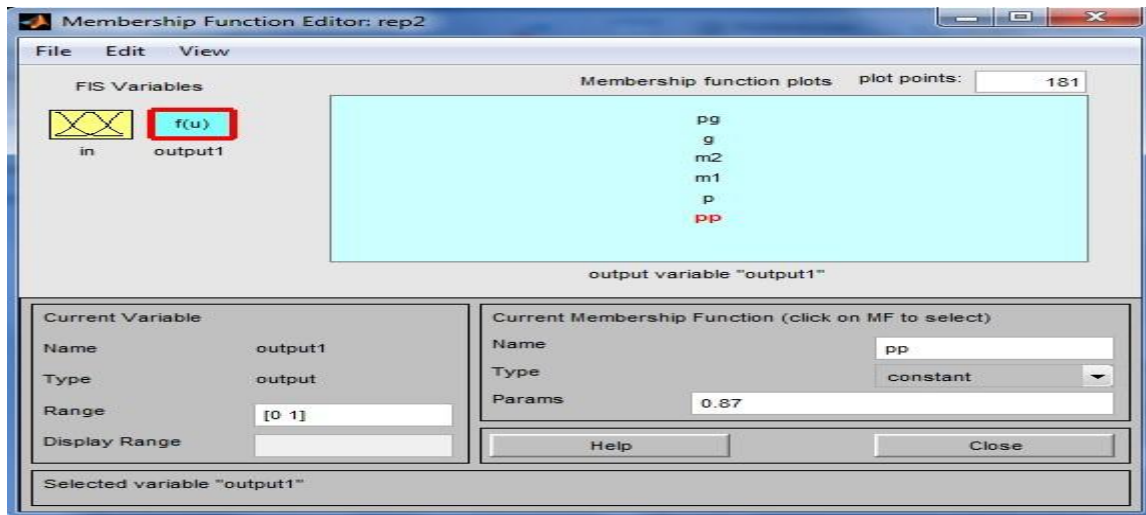


Figure IV.21 : Paramètres des fonctions d'appartenances de la sortie

IV.9.5.4 Configuration des règles floues

En cette étape on définit les règles floues avec lesquelles va contribuer le correcteur pour atteindre la consigne.

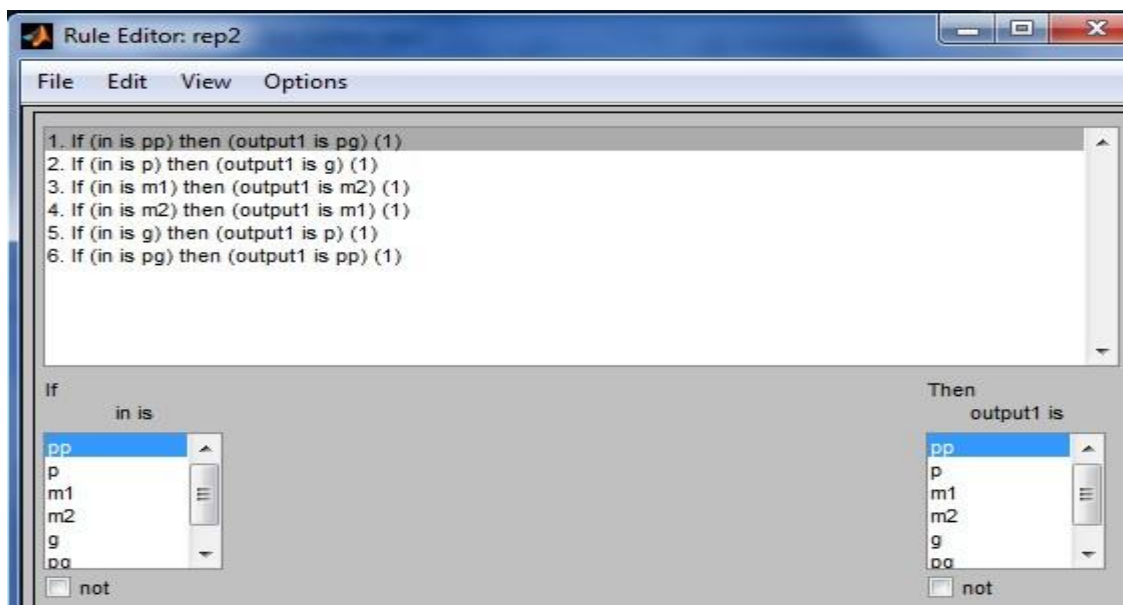


Figure IV.22 : Configuration des règles

IV.9.5.5 Schémas bloc du système avec correcteur

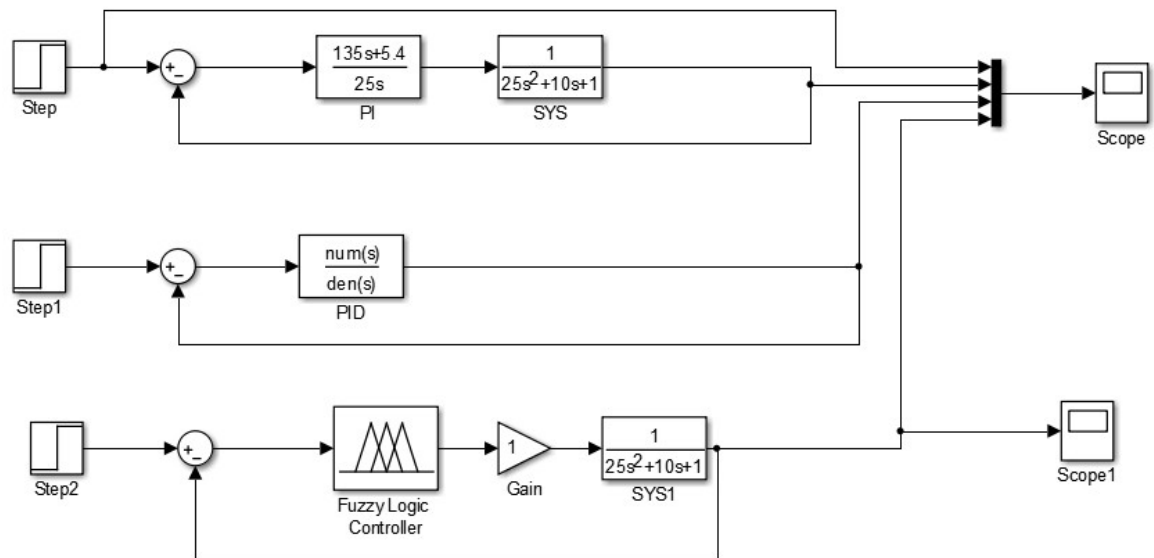


Figure IV.23 : Bloc de simulation

IV.9.6 Simulation

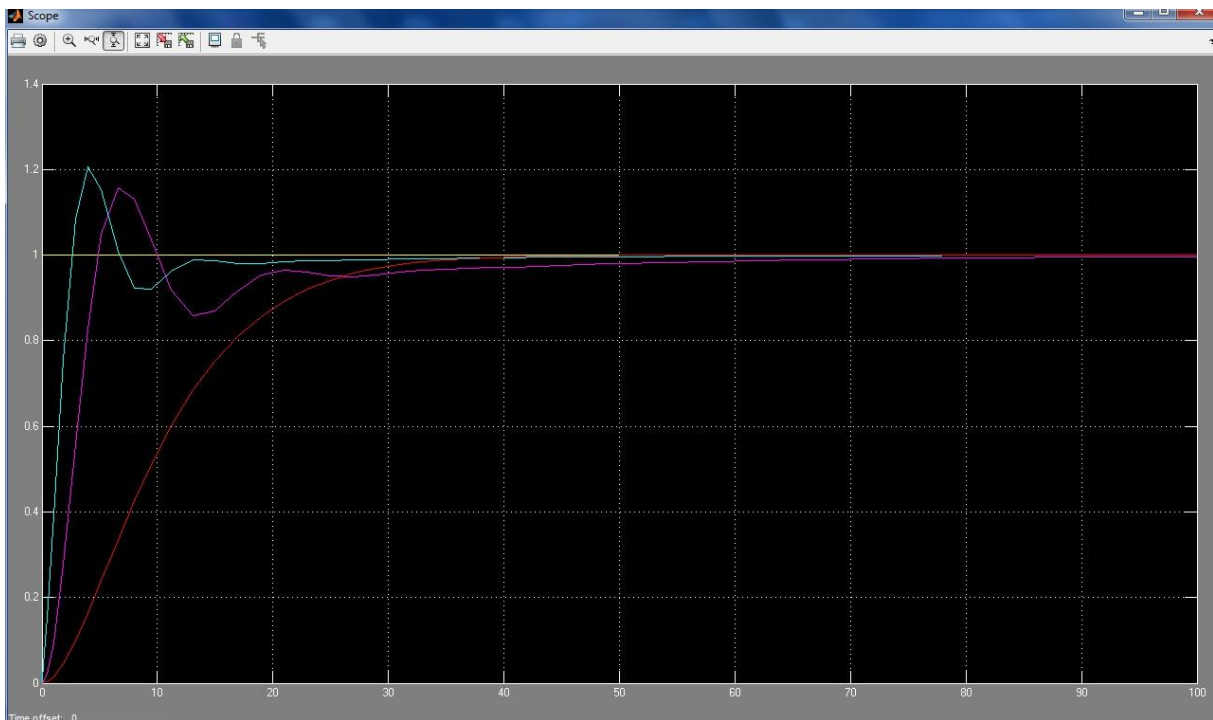


Figure IV.24 : Simulation du système avec les trois correcteurs

IV.8 Interprétation des résultats

En comparant les réponses des trois correcteurs selon le dépassement et l'erreur statique de position, nous pouvons dire que le correcteur basé sur la logique floue a atteint la consigne sans dépassement et avec une erreur de position nulle.

D'autre part nous citons l'intérêt de la régulation basée sur la logique floue et sa simplicité. A noter que pour cette régulation il est nécessaire de bien comprendre le fonctionnement du système ainsi que son évolution.

Contrairement à la logique classique (PI, PID), il est nécessaire de connaître le modèle mathématique précis du système (fonction de transfert, modèle d'état ...etc.) ainsi la détermination correcte des paramètres du correcteur (T_i , T_d et K)

IV.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les concepts de la logique floue, ainsi qu'une description générale des constituants d'un système flou.

La logique floue ne nécessite pas de connaître le modèle du système à commander, il suffit uniquement d'avoir une vue externe du comportement de ce système.

Une analyse de ce comportement permet d'élaborer les règles de commande implantées dans le contrôleur flou.

Dans la suite des travaux, nous allons passer à la conception d'un contrôleur flou de la température de combustion, qui va nous assurer la même acquisition que le système implémenté auparavant.

V.1 Introduction

La plupart des systèmes dynamiques rencontrés dans la pratique sont de nature non linéaires. Les techniques de commande linéaire classiques telle que la commande PID peut parfois être appliquées aux systèmes non linéaires pour un domaine de fonctionnement bien limité, à travers la méthode de linéarisation.

Cependant, le niveau de performance désirée ou les problèmes de poursuite sur un large domaine de fonctionnement nécessitent l'inclusion des non linéarités dans la conception de la commande.

Dans notre cas la température de combustion au niveau des chambres de la turbine MS-5002C est une fonction non linéaire dont les ingénieurs ont linéarisée à d'autres fonctions à fin de suivre son évolution.

Dans ce chapitre nous s'intéressons à développer un approximateur de cette température de combustion, en se basant sur la logique flou.

V.2 Approximateur flou

Les systèmes flous sont des systèmes à la fois intuitifs et numériques qui mappent des entrées nettes à une sortie nette.

Chaque FLC est associé à un ensemble de règles avec des interprétations linguistiques significatives, telles que :

R^k : Si x_1 est F_1^{j1} et x_2 est F_2^{j2} et x_n est F_n^{jn} alors $Y = \theta_{FTK}$.

Ou F_i^{ji} sous - ensemble U_{ji} , $i = 1, 2, \dots, n$, $j = 1, 2, \dots, m$, $k = 1, 2, \dots, N$, sont les fonctions antécédentes, et θ_{FTK} est la conséquente fonction d'appartenance. En utilisant le fuzzifier singleton, le moteur d'inférence de produit et le défuzzificateur centre des moyennes, la sortie finale du système flou est donnée comme suit :

$$Y_{FT1}(x) = \frac{\sum_{k=1}^N \mu_k(x) \theta_{FTK}}{\sum_{k=1}^N \mu_k(x)} \quad (V.1)$$

Ou

$$\mu_k(x) = \prod_{i=1}^n \mu_{F_i^k}(x_i) \quad (V.2)$$

La sortie finale du système flou peut être réécrite comme

$$\theta_{FT1}(x) = \omega(x) * \theta_{FT1} \quad (V.3)$$

Conception de l'Approximateur flou

Ou $\theta_{FT1}^T = [\theta_{FT11} \dots \theta_{FT1k}]$ est le vecteur de tous les paramètres conséquents,
Et $\omega(x) = [\omega_1(x) \dots \omega_k(x)]$ est un ensemble de fonctions de base floues définies comme :

$$\omega_k(x) = \frac{\mu_k(x)}{\sum_{k=1}^N \mu_k(x)} \quad (V.4)$$

Le système flou est supposé être bien défini pour que $\sum_{k=1}^N \mu_k(x) \neq 0$ pour tout $x \in U$

V.3 L'Apprentissage du réseau flou

Dans cette section, l'algorithme d'apprentissage adaptatif basé sur le gradient adapté, ce dernier garantit la convergence et accélère l'apprentissage du réseau.

A la première étape, la valeur de la fonction de coût suivante est calculée :

$$j = \frac{1}{2} e^2 = \frac{1}{2} (Y - Y_{FT1})^2 \quad (V.5)$$

OU Y et Y_{FT1} sont la sortie du système et la sortie du réseau flou respectivement.

Les paramètres θ_{FT1} du réseau flou sont ajustés en utilisant les formules

Suivantes :

$$\theta_{FT1}(t+1) = \theta_{FT1}(t) - \gamma \frac{\partial J}{\partial \theta_{FT1}} \quad (V.6)$$

$$\frac{\partial J}{\partial \theta_{FT1}} = \frac{\partial J}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial \theta_{FT1}} = -e \omega_k(x) \quad (V.7)$$

Donc la loi d'adaptation des paramètres θ_{FT1} peut s'écrire sous la formule

Suivante :

$$\theta_{FT1}(t+1) = \theta_{FT1}(t) + \gamma e \omega_k(x) \quad (V.8)$$

V.4 Application pour l'approximateur de la température de combustion

V.4.1 approximation de l'approximateur flou par le système réel

En premier lieu on va approximer le fonctionnement du l'estimateur flou avec celui du système réel, représenté par une fonction linéaire prise du forum du constructeur **GE**,

Conception de l'Approximateur flou

Qui est :

$$tf = \left((TTXm + 458.5890) * \left(\frac{pcd}{7.5} \right) * e^{\left(\frac{k-1}{k} \right)} \right) - 458.5890 \quad (V.9)$$

Cette approximation, est réalisée en se basant sur les adaptations que l'estimateur calcule à chaque période d'échantillonnage. Notre but est d'éliminer l'erreur entre les deux systèmes.

V.4.2 Programme script de l'approximateur flou

V.4.2.1 Fuzzification

Elle sert à transformer les données numériques en variable linguistique.

❖ Paramétrage des fonctions d'appartenance

Dans cette étape, nous aurons à définir les centres et les écarts-types des fonctions d'appartenance pour le PCD et TTXM.

```
1 function [IF,tetapF] = Fuzzy_approximator(PCD, TTxm, tetapF,e)
2 %les ecarts type et centre des fonction d'appartenance |
3 %*****
4 cF11=0.375;
5 sigmaF11=0.4;
6 %*****
7 cF12=1.075;
8 sigmaF12=0.4;
9 %*****
10 cF13=1.725;
11 sigmaF13=0.4;
12 %*****
13 %*****
14 cF14=2.5;
15 sigmaF14=0.4;
16 %*****
17 %*****
18 cF15=3.125;
19 sigmaF15=0.4;
20 %*****
21 %*****
22 cF16=3.625;
23 sigmaF16=0.4;
24 %*****
25 %*****
26 cF17=4.625;
27 sigmaF17=0.4;
28 %*****
29 %*****
30 %*****
31 cF18=5.625;
32 sigmaF18=0.4;
```

Figure V.1 : Ecarts-types et centres des fonctions d'appartenance pour le PCD

Cette figure V.1 représente le partage de l'univers de discours de la variable (PCD), dont nous avons définie les écarts-types et les centres des fonctions d'appartenances de la plage de variation du PCD [0 ; 7.5] bar.

Conception de l'Approximateur flou

```
40      %membership function d'appartenance pour le cpd |
41      %*****
42      muFup11=exp(-(pcd-cF11)/sigmaF11)^2);
43      muFup12=exp(-(pcd-cF12)/sigmaF12)^2);
44      muFup13=exp(-(pcd-cF13)/sigmaF13)^2);
45      muFup14=exp(-(pcd-cF14)/sigmaF14)^2);
46      muFup15=exp(-(pcd-cF15)/sigmaF15)^2);
47      muFup16=exp(-(pcd-cF16)/sigmaF16)^2);
48      muFup17=exp(-(pcd-cF17)/sigmaF17)^2);
49      muFup18=exp(-(pcd-cF18)/sigmaF18)^2);
50      muFup19=exp(-(pcd-cF19)/sigmaF19)^2);
51      muFup10=exp(-(pcd-cF10)/sigmaF10)^2);
52      %*****
53      mutFup1=[muFup11;muFup12;muFup13;muFup14;muFup15;muFup16;muFup17;muFup18;muFup19;muFup10]';
54      muFup1=[muFup1 mutFup1]
55      %*****
```

Figure V.2 : Fonctions d'appartenance du PCD

Dans cette partie, nous allons calculer le degré d'appartenance de l'entrée (PCD) avec l'utilisation des centres et les écarts-types que nous avons définie auparavant, avec la fonction suivante :

$$f = e^{\left(\frac{pcd-cf1n}{sigma1n}\right)^2} \quad (v.10)$$

```
57      %Les ecarts type et les centre des fonctions d'appartenance pour l'entre
58      %TTXM
59      %*****
60      cF21=60;
61      sigmaF21=78;
62      %*****
63      cF22=120;
64      sigmaF22=78;
65      %*****
66      cF23=180;
67      sigmaF23=78;
68      %*****
69      %*****
70      cF24=240;
71      sigmaF24=78;
72      %*****
73      %*****
74      cF25=300;
75      sigmaF25=78;
76      %*****
77      %*****
78      cF26=360;
79      sigmaF26=78;
80      %*****
81      %*****
82      cF27=420;
83      sigmaF27=78;
84      %*****
85      %*****
86      cF28=480;
87      sigmaF28=78;
```

Figure V.3 : Ecarts-types et centres des fonctions d'appartenance pour le TTXM

Conception de l'Approximateur flou

Cette figure V.3 représente le partage de l'univers de discours de la variable (TTXM), dont nous avons définie les écarts-types et les centres des fonctions d'appartenances de la plage de variation du TTXM [0 ; 660] °C.

```
95  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
96  $les fonction d'appartenance pour le TTXM
97  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
98  -   muFup21=exp(-(ttxm-cF21)/sigmaF21)^2);
99  -   muFup22=exp(-(ttxm-cF22)/sigmaF22)^2);
100 -   muFup23=exp(-(ttxm-cF23)/sigmaF23)^2);
101 -   muFup24=exp(-(ttxm-cF24)/sigmaF24)^2);
102 -   muFup25=exp(-(ttxm-cF25)/sigmaF25)^2);
103 -   muFup26=exp(-(ttxm-cF26)/sigmaF26)^2);
104 -   muFup27=exp(-(ttxm-cF27)/sigmaF27)^2);
105 -   muFup28=exp(-(ttxm-cF28)/sigmaF28)^2);
106 -   muFup29=exp(-(ttxm-cF29)/sigmaF29)^2);
107 -   muFup20=exp(-(ttxm-cF20)/sigmaF20)^2);
108  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
109 -   mutFup2=[muFup21;muFup22;muFup23;muFup24;muFup25;muFup26;muFup27;muFup28;muFup29;muFup20];
110 -   muFup2=[muFup2;mutFup2]
111  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

Figure V.4 : Fonctions d'appartenance du TTXM

Dans cette partie, nous allons calculer le degré d'appartenance de l'entrée (TTXM) avec l'utilisation de ces centres et les écarts-types que nous avons définie auparavant, avec la fonction suivante :

$$f = e^{\left(\frac{ttxm-cf2n}{sigma2n}\right)^2} \quad (v.11)$$

V.4.2.2 Inférences

Dans cette partie nous aurons à déterminé les réglés d'inférences a partir de ce programme script qui a pour données les degrés d'appartenance, dans le but de déterminer les règles d'inférences.

Le programme utilise est représenté par la figure V.5

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
$les inference
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
sFup=muFup2*muFup1
SFup = sum(sFup,'default');
sumFup1=SFup(1)+SFup(2)+SFup(3)+SFup(4)+SFup(5)+SFup(6)+SFup(7)+SFup(8)+SFup(9)+SFup(10);
BFup = reshape(sFup,[1,100]);
psiFup=BFup/sumFup1;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

Figure V.5 : Partie inférences du système

V.4.2.3 Diffuzzification

Cette étape consiste à transformer les variables linguistiques de sorties à des données numériques à fin de les employer et de donner la sortie de l'estimateur flou.

Le programme utilise est représenté par la figure V.6

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%la defuzzification %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
gammaTF=485;
gammaF=485.84;
tetaF=-gammaF*z*psiFup;
tF=psiFup*tetaF
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

Figure V.6 : Partie diffuzzification du système

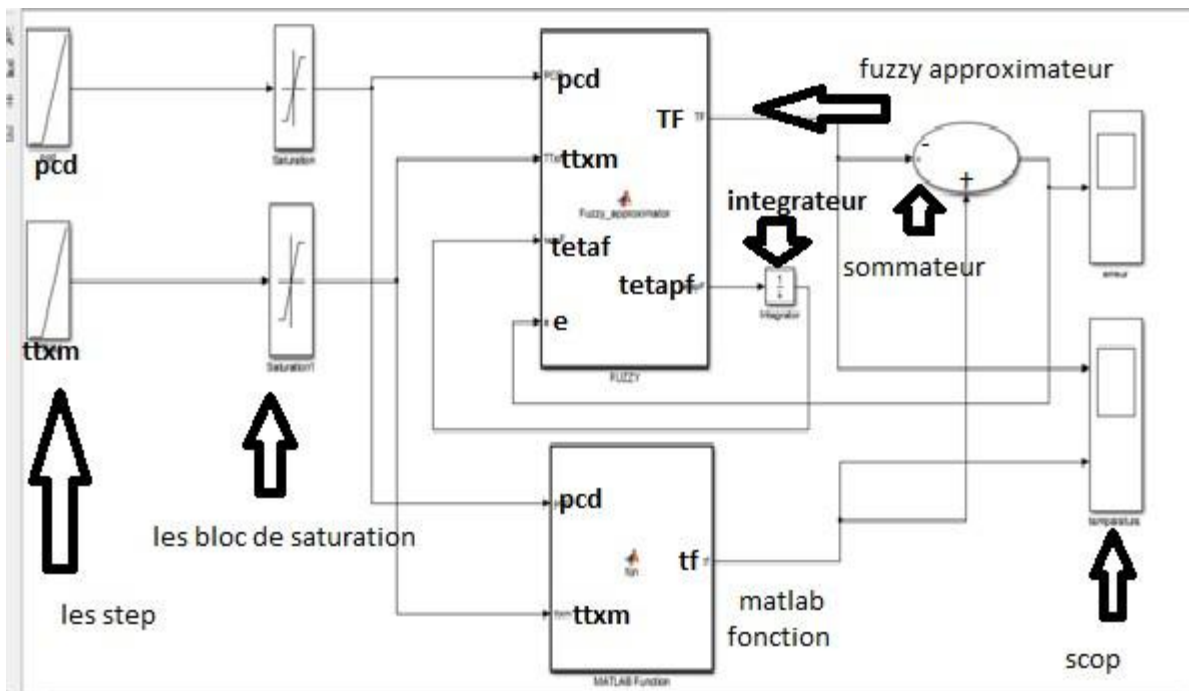


Figure V.7 : Schéma bloc des deux systèmes

V.4.3 Résultats de simulation

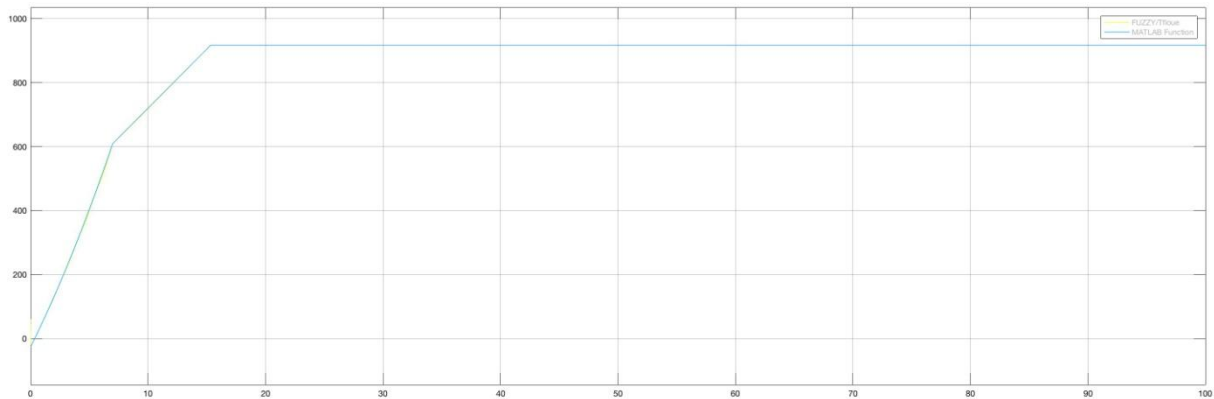


Figure V.8 : Sortie TF des deux systèmes

La figure V.7, nous montre les résultats après simulation dont les deux sorties sont confondues l'une sur l'autre, ce qui nous permet de déduire que l'estimateur a bien suivi le système réel ainsi que l'erreur est nulle.

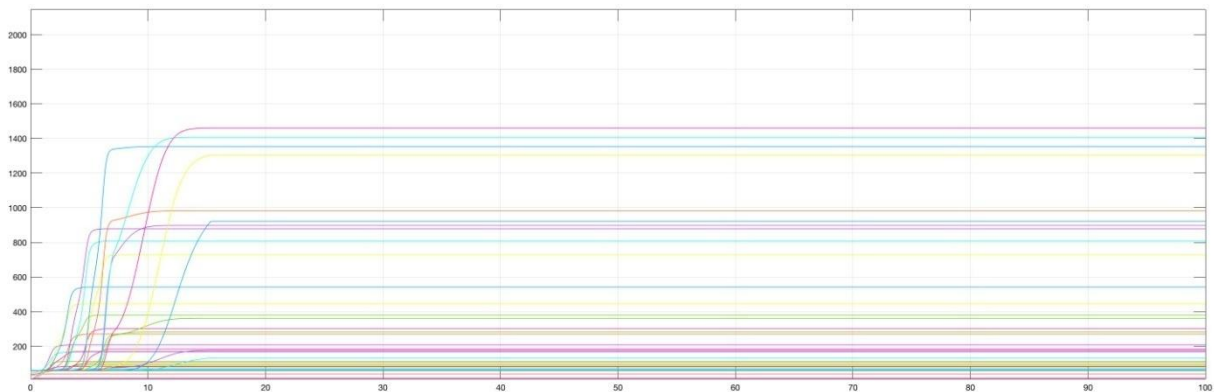


Figure V.9 : Adaptations du système flou

La figure V.9, nous montre les adaptations que l'estimateur flou réalise pour suivre le système réel.

V.4.4 Réadaptation des paramètres téta pour le fonctionnement en ligne

Dans cette phase, nous avons pris le dernier vecteur des adaptations qui nous assure la convergence de l'erreur entre les deux systèmes vers zéro, et aussi pour que le système flou soit indépendant du système réel.



Figure V.12 : Sortie des deux systèmes après la réadaptation

La figure V.12, nous montre les résultats de simulation que nous avons obtenue après la réadaptation du système. Ces résultats obtenus sont satisfaisant malgré le léger retard du régime transitoire.

V.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné les différentes étapes que nous avons suivi pour concevoir l'estimateur flou.

Le travail consiste à réaliser un système qui permet de reproduire un fonctionnement assez proche du système réel.

Afin d'y parvenir, nous procédons par différentes étapes de la logique flou afin de concevoir un estimateur flou, qui était notre but.

Les résultats obtenus après simulation nous permettent de juger que l'estimateur obtenu est proche de la réalité.

Conclusion générale

Dans ces dernières années les turbines à gaz industrielles jouent un rôle important dans les systèmes de production de puissance, telles que les centrales nucléaires de puissance et les centrales de production du gaz.

Le turbocompresseur fait partie de l'équipement des stations de Sonatrach, c'est une turbine bi-arbre accouplée à un compresseur à gaz, il est contrôlée par l'automate programmable MARK V.

La turbine à gaz MS-5002C de General Electric est une machine rotative bi-arbre dont la fonction moteur permet d'entraîner des pompes, compresseurs ou générateurs électriques dans l'industrie pétrolière. La turbine à gaz premièrement pressurise de l'air, puis le mélange à un combustible à fin de les brûlés dans des chambres de combustion. Les gaz ainsi produits sont d'étendus au niveau des aubes de la turbine.

La turbine à gaz MS-5002C est commandée par le système de contrôle SPEEDTRONIC, ce qui fournit une commande complètement automatique du système turbine-charge. Ce système de contrôle inclus des circuits intégrés et des microprocesseurs pour effectuer la commande. La fiabilité est assurée par la redondance pour les fonctions de commande principales, telles que le démarrage, la vitesse et la température. Le système de protection est pratiquement indépendant de l'équipement de commande et utilise un niveau important de redondance pour assurer une opération fiable et sûre de la machine.

Ce projet de fin d'études, c'est réalisé dans le service instrumentation de la société SONATRACH pendant une durée de 1 mois où nous avons exploité une partie du système de contrôle SPEEDTRONIC qui gère l'acquisition de la température de combustion (FSRT) afin de concevoir un autre système basé sur la logique floue qui va nous assuré le même résultat que le système original.

Pour conclure, ce stage pratique qualitatif et positif à tous les niveaux pendant 1 mois, nous a permis d'acquérir de très grandes connaissances dans l'industrie des hydrocarbures. Cela nous a aidés aussi à concevoir une nouvelle technique de commande de procédés industriels en complément de celui que l'on voit dans notre cursus universitaire qui est le STEP7.

Ainsi nous avons pu mettre en pratique la théorie en consolidant nos connaissances acquises pendant notre formation tout en nous impliquant dans l'amélioration d'un processus industriel.

Comme perspectives, nous souhaitons faire le même travail sur les FSR de vibration, accélération et démarrage pour avoir la totalité du programme et aussi pour être indépendant vis à vis le constructeur.

Bibliographie

Documentation de l'entreprise

- « Description de l'usine d'Ohanet » SH BHP FHC/2008
- « Costumer Technical Training » **Marco Saya**
- « Training Manuel d'instructions, de fonctionnement et d'entretien (MS5002C) » volume I **Nuovo Pignone**.
- « P&ID de TURBINE ». **Nuovo Pignone**. 2008.
- « SRV Control loop ». **Roberto Del Guasta**.2002.
- « MK V - Stop Ratio Valve (SRV) » **Roberto Del Guasta**.2002.
- « Two–Shaft gas turbine control & Operation » **GE Power Systems**
- « Speedtronic Mark V » **GE Oil & Gas**
- « Documentation SONATRACH MARK V »
- « Conduite et l'entretien ». **Nuovo Pignone** 2008.
- « SONATRACH MARK V Operation » ENG (622457).
- « Heavy Duty Gas Turbine Control Fundamentals » **GE Oil & Gas**.
- « SPEEDTRONIC Mark V LM Turbine Control » **GEH-6153**.
- « Gas Turbine Controls Fundamentals » **GE Power Systems**.

Cours

- IFP Cours, « Machines Tournantes, TURBINES À GAZ, technologie et fonctionnement »,2015.
- IAP cours, « système SPEEDTRONIC Mark VI »
- TOTALE, « Les turbines. Manuel de formation cours EXP–PR-EQ140 »

Livres

- C. ROSENTAL, « Histoire de la logique floue. Une approche sociologique des pratiques de démonstration », octobre-décembre 1998.

Bibliographie

- T. J. Procyk and E. H. Mamdani, «A linguistic self-organizing process controller, » *Automatical*, vol. 15, pp. 15-30, 1978.
- L.X. Wang, « *Adaptive Fuzzy Systems and Control: Design and Stability Analysis.* » Prentice-Hall, Englewood Clifs, NJ, 1994.
- J. M. Mendel, «Fuzzy systems for engineering: A tutorial, » *Proc. IEEE*, vol. 83, no. 3, pp. 347-377, Mar. 1995.

Mémoire

- Youssouf Bibi , «Etude de la sequence de démarrage de la turbine MS5002C (start-up) » projet de fin d'études.
- ZEGHEMAR NABIL, «Système de Contrôle MARK V SPEEDTRONIC TMR », projet de fin d'études.
- RAHMANI SOFIANE, « Régulation de vitesse de l'arbre BP d'une turbine à gaz de type MS 5002B avec le système de commande SPEEDTRONIC Mark V », projet de fin d'études.
- Djafour lounes , «Etude des boucle de temperature de la turbine a gaz MS5002C,» projet de fin d'études.
- Kaki.M Belahcene E.A , «Etude de vanes de gaz de la turbine à gaz MS5002C,» projet de fin d'études.
- Akmoum Chaouki, «Étude du système de commande de la Turbine à Gaz MS5002C par signal FSR, » projet de fin d'études.