

4.629.1.249

4.629.1.249.1

République Algérienne Démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université Saad Dahleb de Blida
Institut d'Aéronautique et des études spatiales



Mémoire pour l'obtention du diplôme de master en Aéronautique

Option : CNS/ATM

Présenté par

ATTALLAH Hocine et BOUFENGHOUR Abderrahim

Thème

Approche par logique floue de la commande d'un aéromoteur de turbine à gaz Sonalgaz : cas d'étude commande de l'VIGV

Dirigé par:

Encadreur et promoteur: D^r. SELLALI Brahim

Maitre de stage: M^r. OUAZAR Yahia

Promotion 2017

Dédicace

À ma très chère mère, à laquelle je dois tout.... Aucune dédicace ne saurait

Exprimer à sa juste valeur le profond amour que je vous porte.....

À mon cher père, parti un peu tôt.....

A mes chers frères et à mes très chères sœurs

A tous mes Amis sans exception.

A ma future femme

ATTALLAH HOCINE

Dédicace

*Je dédie ce travail à tous ceux qui m'ont
soutenu de près et de loin, A ma mère, et*

mon père,

A ma sœur et mes frères

A tous les membres de ma grande famille

A mes proches

A tous mes amis

B.ABDERRAHIM

Remerciements

Louange au Dieu le tout puissant qui nous accordé la foi, le courage et la patience pour mener ce travail.

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé au sein de l'institut d'Aéronautique et des Etudes Spatiales à l'Université de Blida 1 et la Compagnie de l'Engineering de l'Electricité et du Gaz

Nous tenons d'abord à exprimer nos profondes reconnaissances et remerciements à Docteur **SELLELI Brahim**, Docteur à l'université de Blida 1 et Monsieur **OUAZAR Yahia**, Ingénieur au niveau de la Compagnie de l'Engineering de l'Electricité et du Gaz, pour leurs confiance qu'ils nous ont accordé, pour avoir encadré ce travail de mémoire, leurs critiques fructueuses, leurs encouragements permanents, pour leurs grandes disponibilités durant la réalisation de ce travail.

Nous remercions les membres du jury de nous avoir accordé l'honneur d'examiner et de valoriser notre travail.

Nous remercions vivement Monsieur **BENOUARED Abdelhalim** et Monsieur **MAKKI Hamza** Docteur à l'université de Blida 1 pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptants d'aider nous pour réaliser ce travail.

Nous tenons également à adresser nos remerciements à tous le personnel de la Compagnie de l'Engineering de l'Electricité et du Gaz et surtout Monsieur **ARKAB Mohamed** Président Directeur Général, Monsieur **DILMI Zouheir** chef de département, Mademoiselle **HACHICHI Imane**.

Nous tenons également à adresser nos remerciements à tous les enseignants de l'institut d'Aéronautique et des Etudes Spatiales et surtout Monsieur. **BOUDANI** et Docteur **BENACHANHOU Kamal**.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours encouragés au cours de la réalisation de ce mémoire. Merci à tous et à toutes.

Tableau de matière

Introduction générale	1
Chapitre 01 : description fonctionnel de la turbine à gaz MS9001FA	
1.1. Introduction :	4
1.2. Les caractéristiques de la turbine MS9001AF :	4
1.3. Le cycle de la turbine à gaz :	5
1.4. Compresseur	6
1.4.1. Général	6
1.4.2. Rotor	7
1.4.3. Stator	7
1.4.4. Corps d'entrée (Carter d'admission)	8
1.4.5. Corps du compresseur (Carter du compresseur)	9
1.4.6. Corps d'échappement du compresseur (Carter de décharge du	9
1.4.7. Les aubes (les pales)	10
1.5. DLN-2,6+ Système de combustion	10
1.5.1. Général	10
1.5.2. Chambres de combustion externes et enveloppes intermédiaires des chambres de combustion	14
1.5.3. Tubes d'interconnexion	14
1.5.4. Couvercles d'extrémité d'injecteurs de combustible	15
1.5.5. Ensembles chapeau et tube de flammes	15
1.5.6. Bougie	17
1.5.7. Détecteurs de flamme aux ultraviolets	18
1.6. Turbine	19
1.6.1. Général	19
1.6.2. Rotor de turbine	20
1.6.2. A. Structure	20
1.6.3. Arbres de roues	20
1.6.4. Refroidissement	20
1.6.5. Aubes	21
1.6.6. Directrices	21
1.6.7. Cadre d'échappement	22
1.7. Principe de fonctionnement (la veine gazeuse)	22

Tableau de matière

Chapitre 02 : Système de contrôle & commande Mark VIe

2.1.. Aspect matériel	24
2.1.1. Introduction.....	24
2.1.2. Contrôleur	24
2.1.2.1. Avantage du Contrôleur UCSx.....	25
2.1.3. Commutateurs IONet.....	25
2.1.4. Modules d'E/S distribués	25
2.1.4.1. Module d'E/S.....	26
2.1.5. Options de redondance.....	27
2.1.5.1 Redondance du contrôleur.....	27
2.1.5.2 Redondance E/S.....	28
2.1.6. Traitement des entrées	28
2.1.7. Traitement de la sortie	33
2.1.7.1 Vote.....	34
2.1.9. Module analogique central (PCAA)	35
2.1.9.1. Signaux.....	36
2.1.9.2. Conception du module.....	37
2.1.9.3. Plaque à bornes TCAS.....	38
2.1.9.4. Entrées en 4-20 mA.....	38
2.1.9.5. Sorties 4-20 mA.....	38
2.1.9.6. Transformateur différentiel à variation linéaire.....	39
2.1.9.7. Sorties de servocommande.....	39
2.2. Aspect logiciel	39
2.2.1 Suite logicielle ControlST.....	39
2.2.2 Interface Homme-Machine (IHM).....	40
2.2.3. IHM pour système de contrôle-commande de turbine guide de l'opérateur « SPEEDTRONIC » :	40
2.2.3.1 Présentation générale de l'IHM.....	40
2.2.3.2 Fonctionnalités du IHM.....	41
Chapitre 03 : Aubes directrices variables d'entrée compresseur (VIGV)	
3.1. Introduction.....	43
3.2. Commande Des Aubes Directrices	43
3.3. Système de déclenchement :	44
3.4. Contrôle De Protection Anti-Pompage	45

Tableau de matière

3.5. Contrôle De La Température D'échappements.....	46
3.6. Opération.....	46
3.7. Protection Anti-Erreur	48
3.8. Contrôle des aubes mobiles entrées compresseur à vitesse partielle	49
3.9. Contrôle / protection des limites IGV	50
3.9.1. IGV minimum pour survitesse	50
3.9.2. IGV ne suivant pas la référence	55
3.10. Détection des défauts des aubes mobiles entrée compresseur	51
3.11. Configuration du régulateur IGV	52
3.12. L'actionneur d'aube mobile entrée compresseur	52
3.13 Fonctionnement de l'actionneur d'aube mobile entrée compresseur	53
3.14. Les composants de base de l'actionnaire d' IGV.....	54
3.14.1. Ensemble servovanne électrohydraulique à triple bobine.....	54
3.14.2. Ensemble vanne à relais de déclenchement	55
3.14.3. Ensemble filtre hydraulique	55
3.14.4. Capteurs à retour de position LVDT (Transformateur différentiel à variation linéaire).....	55
3.14.4.1. Principe de fonctionnement du capteur LVDT.....	56
3.14.4.2. Avantages du LVDT :.....	60
3.14.4.3. Inconvénient du LVDT.....	60
3.14.4.4. Cas pratique :.....	60
3.14.5 Emplacement des LVDT dans l'actionneur :.....	61
Chapitre 04 : Modélisation et Régulation	
4.1. Introduction.....	62
4.2. Principe de régulation	62
4.2.1. La chaîne de traitement de l'information	62
4.2.2. Les éléments de la chaîne.....	63
4.2.2.1. Le capteur	63
4.2.2.2. L'acquisition de la mesure.....	63
4.2.2.3. Le traitement de la mesure.....	63
4.2.2.4. Le traitement de l'algorithme de régulation	63
4.2.2.5. La commande	63
4.2.2.6. L'actionneur.....	64
4.3. La régulation PID (Proportionnel, Intégrateur et Dérivateur)	64

Tableau de matière

4.3.1. Les actions P, I et D	64
4.3.1.1. Action Proportionnelle	64
4.3.1.2. Action Intégrale	65
4.3.1.3. Action Dérivée.....	66
4.4. Modélisation d'une servovanne à rétraction électrique:	67
4.4.1. Dynamique des distributeurs à deux étages	67
4.4.2. Étage de commande (premier étage).....	68
4.5. Etude de cas (la servovanne 90TV) :	70
4.5.1. Calcul de gain K_p avec la méthode de la réponse indicielle	71
4.5.2. Système d'asservissement de la vanne de position	73
4.6. Commande FLOUE	75
4.6.1. Définitions.....	75
4.6.1.1. Les sous-ensembles flous	75
4.6.1.2. Fonction caractéristique.....	75
4.6.1.3. Caractéristique de la fonction d'appartenance :	76
4.6.2. Les variables linguistiques	77
4.6.3. Structure d'un régulateur flou	78
4.6.3.1. Interface de fuzzification	78
4.6.3.2. Base de connaissances	80
4.6.3.3. Moteur d'inférence floue	80
4.6.3.4. Défuzzification	81
4.6.4. Principe du régulateur flou	82
4.6.5. Conception d'un régulateur floue de position de la servovanne 90TV/VIGV.....	82
Chapitre 05 : Simulation et discussion	
5.1. Introduction.....	87
5.2. Simulation avec le régulateur P	87
5.2.1. Résultat de simulation	89
5.2.2. Interprétation des résultats :	90
5.3. Simulation avec le régulateur flou :	90
5.3.1. Résultat de simulation :	92
5.3.2. Interprétation des résultats :	94
5.4. Comparaison entre régulateur flou et proportionnel:.....	95
5.4.1. Résultats de simulation.....	96
5.4.2. Interprétation du résultat :	97

Tableau de matière

5.5. Simulation avec perturbation	97
5.5.1. Résultat de la simulation :	99
5.5.2. Interprétation du résultat	100
5.6. Conclusion :	100
Conclusion générale.....	101

Bibliographie

Annexe

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Chapitre 01:

Tableau 1.1: Caractéristique du compresseur.....	6
Tableau 1.2: Caractéristique de la chambre de combustion.....	11
Tableau 1.3: Caractéristique de la turbine.....	19

Chapitre 02:

Tableau 2.1 : Topologies du contrôleur Mark Vie.....	29
--	----

Chapitre 03:

Tableau 3.1 : Les composants du système IGV.....	44
Tableau 3.2 : caractéristique des signaux de contrôle de VIGV.....	50
Tableau 3.3 : caractéristique des signaux d'alarme.....	51
Tableau 3.4 : caractéristique des signaux de défaut.....	51
Tableau 3.5 : Configuration de l'IGV.....	52

Chapitre 04 :

Tableau 4.1 : Paramètre PID obtenus à partir d'une réponse indicielle.....	72
Tableau 4.2 : la matrice d'inférence.....	85

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre 01 :

Figure 1.1 : Cycle de Brayton idéal.....	5
Figure 1.2 : Ensemble du rotor du compresseur.....	7
Figure 1.3 : corps de la section compresseur.....	8
Figure 1.4 : Corps d'admission et palier n° 1 du compresseur.....	9
Figure 1.5 : les pales.....	10
Figure 1.6 : Disposition du système de combustion MS9001FA.....	11
Figure 1.7 : Configuration de combustion MS9001FA-2.6+.....	13
Figure 1.8 : Manchon d'écoulement.....	14
Figure 1.9 : Tube d'interconnexion.....	15
Figure 1.10 : DLN-2.6+ section transversale de l'injecteur de carburant extérieur	15
Figure 1.11 : Disposition de l'injecteur de carburant.....	16
Figure 1.12 : Tube de flamme de combustion.....	16
Figure 1.13 : Ensemble du chapeau –vue en aval.....	17
Figure 1.14 : Bougie d'allumage.....	18
Figure 1.15 : Détecteur de flammes.....	19
Figure 1.16 : Montage de rotor turbine.....	20
Figure 1.17 : Passages de refroidissement des aubes premier étage de la MS9001FA.....	21
Figure 1.18 : Ensemble du chapeau.....	22

Chapitre 02 :

Figure 2.1 : Image réelle d'un contrôleur	24
Figure 2.2 : Image réelle d'un commutateur IONet.....	25
Figure 2.3.a: Module d'E/S TMR.....	26
Figure 2.3.b: Module E/S Simplex.....	26
Figure 2.4 : Exemple d'un module d'E/S :.....	27
Figure 2.5 : Contrôleurs Marck VIe (TMR).....	28
Figure 2.6.a : Simplex - Un module d'E/S Avec un IONet.....	30
Figure 2.6.b : Double - Un module d'E/S avec deux réseaux IONets.....	30
Figure 2.6.c : Double – Deux modules d'E/S avec un IONet.....	30
Figure 2.6.d : Double – Trois modules d'E/S avec 1, 1, 2 IONets.....	30
Figure 2.6.e : TMR ventilée – Trois module d'E/S avec un IONet par module d'E/S.....	30

Liste des figures

Figure 2.6.f : TMR dédiée – Trois module d'E/S avec un IONet par module d'E/S.....	30
Figure 2.7.a : Entrée unique vers les trois contrôleurs, non sélectionnée.....	31
Figure 2.7.b : Un capteur avec entrée ventilée et sélection logicielle.....	31
Figure 2.7.c : Trois capteurs indépendants avec entrée commune non Sélectionnée.....	32
Figure 2.7.d : Trois capteurs, chacun ventilé et sélectionné, pour les applications à fiabilité moyenne à élevée.....	32
Figure 2.7.e : Trois capteurs avec entrées dédiées, sélectionnées par logiciel pour les applications à fiabilité élevée.....	32
Figure 2.8 : Circuit TMR pour combiner trois courants analogiques dans une sortie unique..	33
Figure 2.9 : Circuits TMR pour les sorties sélectionnées de 0-20 mA.....	34
Figure 2.10 : Exemples de sélection de valeur médiane avec entrées normales et Incorrectes.....	35
Figure 2.11 : Module analogique centrale (PCAA).....	36
Figure 2.12.a : Schéma de connexion PCAA-TCAT - Unidirectionnel (capot du PCAA retiré pour dévoiler les relations de la carte).....	36
Figure 2.12.b : Schéma de connexion PCAA-TCAT - TMR (capot du PCAA retiré pour dévoiler les relations de lacarte).....	37
Figure 2.13 : Schéma des relations entre les différentes cartes du PCAA.....	37
Figure 2.14.a : Ecran de permissif de démarrage.....	40
Figure 2.14.b : Ecran de contrôle IGV.....	41
Figure 2.14.c : Ecran de permissif de démarrage.....	42
 Chapitre 03 :	
Figure 3.1 : Schéma fonctionnel de VIGV	
Figure 3.2.a : Comparaison de l'Angle IGV avec la Vitesse Corrigée et la Charge.....	45
Figure 3.2.b : Image real des aubes directrices d'entrée.....	46
Figure 3.3.a : Aubes directrices d'entrée (IGV) Position fermer.....	46
Figure 3.3.b : Indicateur d'angle d'IGV.....	48
Figure 3.4 : Image réelle d'Actionneur d'aube mobile entrée compresseur 9F.....	53
Figure 3.5 : Photo 3D Point de montage de l'actionneur.....	54
Figure 3.6 : Schéma de principe électrique et schéma de câblage de la servovanne.....	54
Figure 3.7 : Transformateur différentiel comme capteur de position.....	56
Figure 3.8 : Transformateur différentiel : modèle mathématique.....	57
Figure 3.9.a : Signal d'excitation.....	58

Liste des figures

Figure 3.9.b : Signal secondaire (1).....	59
Figure 3.9.c : Signal secondaire (2).....	59
Figure 3.9.d : Différence entre les deux secondaires.....	59
Figure 3.10 : Principe électrique du transformateur différentiel à variation linéaire et schéma de câblage (LVDT).....	60
Figure 3.11 : Actionneur d'aube mobile entrée compresseur 9F, déclenchement à haute pression avec clapet anti-retour interne (vue du côté droit).....	61

Chapitre 04 :

Figure 4.1 : la chaine de traitement de l'information.....	62
Figure 4.2 : Schéma fonctionnel d'un processus réglé par un PID classique.....	64
Figure 4.3 : l'effet de l'action P.....	65
Figure 4.4 : l'effet de l'action I.....	66
Figure 4.5 : l'effet de l'action D.....	66
Figure 4.6 : représentation d'une servovanne à deux étages.....	67
Figure 4.7 : Schéma-bloc fonctionnel du premier étage de la servovalve.....	69
Figure 4.8 : schéma-bloc en Simulink de la servovanne.....	70
Figure 4.9 : Schéma fonctionnel de l'actionneur d'aube mobile entrée compresseur.....	71
Figure 4.10 : la réponse indicielle du processus.....	71
Figure 4.11 : la réponse indicielle de la servovanne.....	73
Figure 4.12 : Système d'asservissement de la vanne de position	
Figure 4.13 : fonctions d'appartenances triangulaire et trapézoïdale.....	75
Figure 4.14 : Représentation d'un sous-ensemble flou.....	76
Figure 4.15 : Propriétés d'un ensemble flou.....	76
Figure 4.16 : Variable linguistique « distance ».....	77
Figure 4.17 : Structure de base d'un régulateur flou (référence).....	78
Figure 4.18 : Méthode de fuzzification pour une mesure exacte.....	79
Figure 4.19 : Méthode de fuzzification pour une mesure incertaine.....	80
Figure 4.20.a : la fonction d'appartenance et les variables linguistiques d'erreur.....	84
Figure 4.20.b : la fonction d'appartenance et les variables linguistiques variation d'erreur...84	
Figure 4.20.c : la fonction d'appartenance et les variables linguistiques de couple.....	85

Liste des figures

Chapitre 05 :

Figure 5.1 : schéma bloc de simulation sur Simulink.....	88
Figure 5.2.a : Réponse de système pour une consigne de 0 (0%).....	89
Figure 5.2.b : Réponse de système pour une consigne de 0.5 (50%).....	89
Figure 5.2.c : Réponse de système pour une consigne de 1 (100%).....	90
Figure 5.3 : schéma bloc de simulation sur Simulink.....	91
Figure 5.4.a : Réponse de système pour une consigne de 0 (0%).....	92
Figure 5.4.b : Réponse de système pour une consigne de 0.5 (50%).....	92
Figure 5.4.c : représentation de courant de commande pour la consigne 50%.....	93
Figure 5.4.d : Réponse de système pour une consigne de 1 (100%).....	93
Figure 5.4.e : représentation de courant de commande pour la consigne 100%.....	94
Figure 5.5 : schéma de simulation du régulateur floue et régulateur P.....	95
Figure 5.6.a: comparaison du régulateur floue avec le régulateur P (Pour consigne de 0%).....	96
Figure 5.6.b : comparaison du régulateur floue avec le régulateur P Pour consigne de 0.5 (50%).....	96
Figure 5.6.c : comparaison du régulateur floue avec le régulateur P Pour consigne de 1 (100%).....	97
Figure 5.7 : schéma de simulation avec perturbation.....	98
Figure 5.8.a: Comportement de la servovanne en présence de perturbation Pour consigne de 0 (0%).....	99
Figure 5.8.b : Comportement de la servovanne en présence de perturbation Pour consigne de 0.5 (50 %).....	99
Figure 5.8.c : Comportement de la servovanne en présence de perturbation Pour consigne de 1 (100%).....	100

Liste des abréviations et des unités

Liste des abréviations

GE: General Electric

ISO: International Organization for Standardization (Organisation Internationale de Normalisation)

IGV: Inlet Guide Vane (les aubes directrice d'entrée compresseur)

VIGV: Variable Inlet Guide Vane (les aubes directrice variable d'entrée compresseur)

DLN: Dry Low NOx

NOx: Oxydes d'azote

AC: Alternative Current

LVDT: Linear Variable Differential Transformer (Transformateur Différentiel à Variation Linéaire)

BOP: Équipements auxiliaires de la centrale

E/S: Entrée/Sortie

UCSx: Série du contrôleur

LM: Link Master

IONet: Input Output Network

IHM: Interface Home Machine

FSR: Fuel Stroke Reference

RTD: Resistance Temperature Device

TTXM: Température d'échappement réelle

CSKGVSSR: Température d'échappement du cycle VIGV simple

CSRGV: signal de référence

CSKGVMAX: Position aube mobile entrée CPR ouverte de valeur (88°)

L86GVT: Signal d'erreur IGV primaire

CGSV: Différence entre la rétroaction de position VIGV

TNH: Vitesse du rotor du compresseur de la turbine

CTIM: Température d'admission du compresseur

LK86GVA1: Signal d'alarme aube mobile entrée compresseur non conforme à la référence de valeur (7.5°)

LK86GVA2: Signal délai alarme aube mobile entrée compresseur non conforme à la référence de valeur (7.5°)

LK86GVT1: Signal de déclenchement aube mobile entrée compresseur de valeur (5000 mSEC)

Liste des abréviations et des unités

L4GVTX: Logique de disjonction

LK4IGVTX: Valeur minimale autorisée à pleine vitesse

CSRGVPS: Retour de la position des IGV(CSGV) dépasse la référence de vitesse partielle

CPR: Signal de rapport de pression du compresseur

TMR: Contrôleurs à triple redondance modulaire

ESWx: Interrupteur GE

SPDN: Module d'E/S à module simple et réseau double

SPSN: Modules d'E/S à deux modules simples et réseau simple

DPDN: Module d'E/S à module double et réseau double

TPDN: Module d'E/S à module triple et réseau double

SIFT: Tolérance aux défauts mise en œuvre par logiciel

PPRO: Système de protection

PCAA: Module analogique central

TCAT: Plaque à bornes analogique centrale

JGPA: Carte de masse et d'alimentation

BPPx: Carte processeur

BCAA: Cartes d'application analogique

BCAB: Carte d'acquisition

PTUR: Déclenchement primaire spécifique à la turbine

R_p : Résistance ohmique de l'enroulement primaire

L_p : Inductance de l'enroulement primaire

$L_{ps1}(X)$: Inductance mutuelle entre primaire et secondaire 1

$L_{ps2}(X)$: Inductance mutuelle entre primaire et secondaire 2

L_s : Inductance propre d'un enroulement secondaire lorsque le noyau ferromagnétique couvre complètement la bobine

Gr : Gain du régulateur

G_s : Gain du procédé.

ΔC : Variation de consigne

k_f : Raideur de l'assemblage du tube flexible, induit mobile et gicleur (Nm/m)

x_f : Position du gicleur (m)

T : Couple (Nm)

θ : Angle (rad)

kl : Constante de couple du moteur-couple (Nm/A)

Liste des abréviations et des unités

bf: Coefficient d'amortissement (Nms/m)

mf: Masse en rotation (Nms²/m) des composants du premier étage.

k₂: Gain de l'amplificateur hydraulique (m²/s)

A_{sp}: Aire du tiroir de distribution (m²).

Ac: Zone de travail du cylindre hydraulique extension

Ksv: Gain de débit servovanne (po³/s)

KL: Gain LVDT (Vrms/pouce).

ξ: Rapport d'amortissement de la servovanne

ωn: Fréquence naturelle de la servovanne (rad/s)

τL: Constante(s) de temps du LVDT

Liste des unités

Hz: Hertz

Kg/s: Kilogram par second

tr/min: Tourne par minute

GPM: Gallon par minute

PSI: Livre par pouce carré

°F: Fahrenheit

°C: Degré celciuce

mSEC: Micro second

Mm: Mili mètre

V: Volts

V_{eff} ou V_{rms}: Volt efficace

MW: Méga watt

kJ/kWh: Kilo joule par kilo watt horaire

kg/h: Kilo gramme par heure

m²: Mètre carré

po²: Pouce carré

m³: Mètre cube

po³: Pouce cube

m³/s: Mètre cube par seconde

po³/s: Pouce cube par seconde

m³/h: Mètre cube par heure

Liste des abréviations et des unités

KPa: Kilo pascale

mm² : Millimètre carré

mm³ : Millimètre cube

Vrms/m : Volt efficace par mètre

µm : Micromètre

PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur

kN: Kilo newton

N: Newton

Résumé

Résumé :

Les aubes directrices d'entrée du compresseur variables VIGV (Variable Inlet Guide Vane) sont installées sur la turbine pour contrôler et diriger le flux d'air vers le compresseur.

Le mécanisme de commande des aubes directrices d'entrée variables est un ensemble commandé de manière hydraulique, qui a une boucle de contrôle rétroactif fermé pour contrôler l'angle des aubes directrices. Les aubes sont positionnées automatiquement dans leur gamme de fonctionnement pendant les séquences de démarrage, d'arrêt et aussi pendant le fonctionnement dans des conditions de charge partielle.

Dans ce travail, nous avons présenté une étude approfondie sur la commande du VIGV, la logique floue et l'application de cette dernière sur VIGV. Tous d'abord nous avons élaboré le modèle mathématique qui décrit le fonctionnement du processus industriel de la servovanne, puis nous avons déterminé les régulateurs appropriés. Dans cette étude, nous avons proposé une nouvelle stratégie de régulation basée sur la logique floue.

Mot clés : les aubes directrices d'entrée variable, servovanne, régulateur proportionnel (P), régulateur floue

Summary:

The Variable Inlet Guide Vane (VIGV) is installed on the turbine to control and direct the air flow to the compressor.

The control mechanism of the variable inlet guide vane is a hydraulically controlled assembly which has a closed feedback control loop to control the angle of the steering vanes. The blades are positioned automatically in their operating range during the start, stop and also during operation under partial load conditions.

In this work, we presented an in-depth study on VIGV control, fuzzy logic and the application of VIGV. First we have developed the mathematical model that describes the operation of the industrial process of the servo valve, and then we have determined the appropriate regulators. In this study, we proposed a new regulation strategy based on fuzzy logic.

Key words: variable inlet guide vane, servo valve, proportional regulator (P), fuzzy regulator

Résumé

ملخص :

الدورات التوجيهية المتغيرة للضاغط المركبة على التربين للتحكم في تدفق الهواء وتوجيهه الى الضاغط. تتحكم في الدورات التوجيهية مجموعة من الاليات الهيدروليكية التي لديها حلقة مغلقة رجعية للتحكم في زاوية الدورات , حيث يتم وضع الشفرات تلقائيا في نطاق عملها أثناء بداية التشغيل و التوقيف وأيضا خلال عمل التربين تحت ظروف التحميل الجزئي.

في هذا العمل، قدمنا بدراسة شاملة حول الدورات التوجيهية المتغيرة، المنطق الضبابي وتطبيقاته على الدورات التوجيهية المتغيرة. أولا قمنا بتطوير نموذج رياضي يصف عمل صمام المؤازرة وكذلك قمنا بتصميم المنظم الحالي لصمام المؤازرة، واقترحنا استراتيجية تنظيمية جديدة تقوم على المنطق الضبابي.

الكلمات الرئيسية: الدورات التوجيهية المتغيرة لضاغط، صمام المؤازرة، المنظم النسبي و المنظم الضبابي.

Introduction générale

Introduction générale

La turbine à gaz a connu ces dernières années un développement considérable dans des nombreuses applications dans l'industrie des hydrocarbures et en particulier dans le domaine de transport du gaz et de production d'électricité.

La turbine à gaz à arbre unique modelé MS-9001FA de General Electric est conçue pour fonctionner dans une installation configurée en unité à cycle simple ou cycle combiné à la vapeur et au gaz [1].

La turbine MS-9001FA est munie de plusieurs systèmes de commande et de protection prévus pour assurer la fiabilité et la sécurité du fonctionnement de la machine. Dans les systèmes de commande de la turbine, plusieurs technologies ont été établies pour assurer un bon réglage. Ces technologies sont élaborées afin de rendre le système insensible aux perturbations extérieures.

La commande classique de type PI ou PID couvrent une large gamme dans les applications industrielles. C'est une commande linéaire et présentent l'intérêt de la simplicité de mise en œuvre et la facilité de la synthèse. Néanmoins cette commande dans certains domaines d'application peut présenter certains inconvénients que nous allons conclure vers la fin de ce mémoire à travers les simulations.

L'application de cette commande exige la connaissance des différents paramètres du modèle de la machine. Cela peut influencer sur le fonctionnement du processus et peut entraîner une robustesse médiocre face à la variation de ces paramètres et des dépassements importants lors des régimes transitoires. Il y a dès lors plusieurs raisons qui poussent à développer des méthodes d'optimisation intelligente pour le réglage de contrôleurs PID. On peut citer les réseaux de neurones, l'algorithme génétique l'optimisation par l'essaim particulaire (PSO) et la logique floue [2].

Les prémisses de la logique floue sont apparues en 1940 lorsque des chercheurs américains ont commencé à se pencher sur le concept d'incertitude. En 1965, Lofti Zadeh introduit la théorie des ensembles flous, (fuzzy set theory).

La logique floue permet de travailler sur des notions imprécises (intermédiaires entre le VRAI et le FAUX), représenter et traiter des informations subjectives comme le langage naturel, des connaissances approximatives ou incertaines. En comparaison avec la logique

Introduction générale

classique, elle ajoute la possibilité de calculer un paramètre, en disant simplement dans quelle mesure il doit se trouver dans telle ou telle zone de valeur.

L'industrie japonaise a développé des produits grand public à base de logique floue :

- Systèmes automobiles embarqués (ABS, suspension, climatisation,...etc.)
- Systèmes autonomes mobiles
- Systèmes de transport (train, métro, ascenseur,...)
- Systèmes de conditionnement d'ambiance
- Systèmes de décision, diagnostic, reconnaissance.

Les travaux de recherche présentés dans cette mémoire s'inscrivent dans le cadre général des méthodes de commande par la logique floue et traitent particulièrement le problème de la commande d'un sous-système sur la turbine à gaz MS9001FA qui est le VIGV. Nous proposons une commande par la logique floue. Ensuite, nous envisageons la synthèse de lois de commande floue. Enfin avec le logiciel Matlab on fait une simulation par Simulink et on comparée les résultats avec l'anciens régulateur P (Proportionnelle) et on compare et on discute les résultats de la simulation.

Le contenu de ce travail est structuré comme suit :

Le premier chapitre, est consacré au principe de fonctionnement générale d'une turbine à gaz et à une description de différent organes de la turbine de General Electric MS9001FA tel que l'entrée d'air, compresseur, chambre de combustion et la turbine.

Le deuxième chapitre est dédié au système Mark VIe de la commande de la turbine à gaz MS9001FA ce chapitre est divisé en deux parties essentielles, la première partie cite les composants matériels utilisée pour le système Mark VIe (les contrôleurs, les commutateurs et les modules d'E/S) et la deuxième partie parle sur le côté logiciel du système Mark VIe et sur l'interface homme machine (IHM) utilisée pour la surveillance et le contrôle de différents paramètres venus de la turbine en temps réel.

Le troisième chapitre quant à lui est réservé au premier lieu à la description fonctionnelle des aubes directrices variables d'entrée compresseur, deuxièmement à l'explication de l'importance et à différentes taches réalisées par les VIGV, troisièmement au système de régulation de VIGV (l'actionneur de VIGV) et ses composants (servovanne, vérin, les capteurs LVDT...)

Introduction générale

Le quatrième chapitre présente la modélisation de la servovanne et la commande par les deux types, la commande classique PID et la commande par logique floue de la servovanne 90TV, aussi la synthèse du régulateur floue est établie.

Le cinquième chapitre traite la partie simulation du régulateur Proportionnel et le régulateur floue ainsi la discussion des résultats de la simulation.

Parcours de stage

Notre stage a été effectué au niveau de la direction des moyennes de production KDM, département étude électrique de La Compagnie de l'Engineering de l'Electricité et du Gaz CEEG-Spa est une filiale du groupe SONELGAZ chargée de la maîtrise d'œuvre (études, conduite, contrôle des travaux, réception et mise en service) des projets de réalisation d'infrastructures énergétiques (moyens de production électricité et gaz, réseaux transport gaz et haute tension), et ce, aux meilleures conditions techniques, de coût, de qualité et de délais de réalisation.

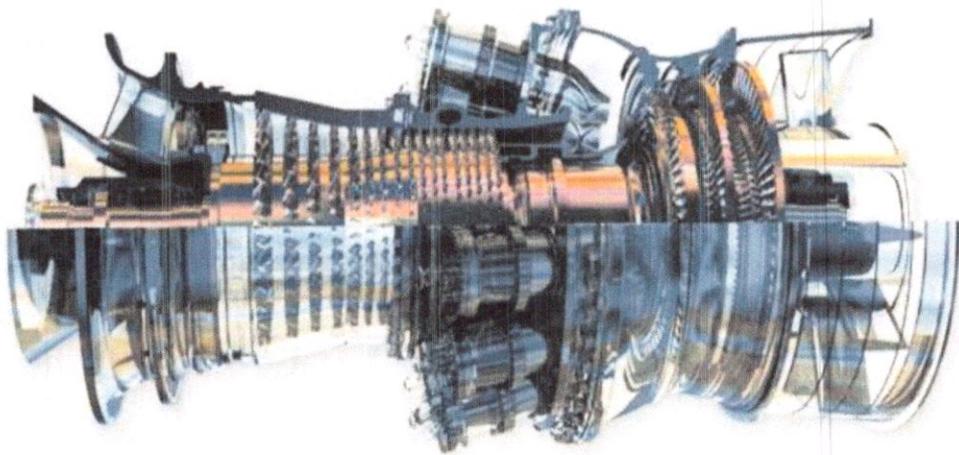
Pendant 3 mois

- nous étions assistés et dirigés par des ingénieurs d'étude qualifiés dans le domaine
- durant cette période nous avons fait un déplacement sur site pour visiter une centrale de production d'électricité de Sonalgaz pour relier le travail théorique et le travail pratique avec plus de détails sur la turbine à gaz et particulièrement l'IGV

Chapitre 01

Description fonctionnel de la turbine à gaz

MS9001FA



1.1. Introduction

Avec des millions d'heures d'exploitation, la turbine à gaz de classe F fabriquée par GE est le leader de l'industrie pour les heures de travail grâce à sa technologie avancées. La turbine à gaz de GE est hautement efficace, conçues pour une fiabilité et une efficacité maximales grâce à des coûts minimaux du cycle de vie, les turbines de classe F sont favorisées par des générateurs d'énergie et des cogénérateurs industriels nécessitant de gros blocs de puissance fiables.

Elle a été Introduite en 1987, cette classe est le résultat d'un programme de développement pluriannuel utilisant la technologie avancée par GE Aircraft Engines et le centre de recherche global de GE. Elle développe continuellement cette technologie en améliorant progressivement le produit de la classe F pour atteindre des gains toujours plus élevés.

Les turbines à gaz de classe F, y compris les 7F (60 Hz), les 9F (50 Hz) et les 6F (50 ou 60 Hz), offrent une flexibilité dans la configuration du cycle, la sélection du carburant et l'adaptation du site [4].

Le MS9001F qui est notre cas d'étude a été introduit en 1989 et était conçu à l'aide de la mise à l'échelle aérodynamique de la MS7001F. Ces composants ont fait l'objet d'une enquête et des analyses approfondies utilisées dans les précédentes conceptions et les ajustements nécessaires ont été fabriqué. Initialement, il y avait deux unités MS9001F construites pratiquement simultanément. Une unité avec un minimum d'instrumentation a été exploitée sans charge dans l'usine de Greenville et une unité avec instrumentation complété a été assemblée dans l'usine de Belfort. L'unité instrumentée ensuite a été complètement chargée dans une opération à cycle simple le test de Greenville a confirmé la prédiction performance du compresseur [1].

1.2. Les caractéristiques de la turbine MS9001AF

Les différents paramètres et les caractéristiques de la turbine à gaz MS9001AF. Sachant que le nombre du tour, fabricant, la taille, le rendement, les dimensions.....etc. (voir Annexe 01).

1.3. Le cycle de la turbine à gaz

Le cycle de la turbine à gaz est un cycle de flux constant avec une addition constante d'énergie thermique. C'est communément appelé le cycle de Brayton d'après George Brayton. La figure « 1.1 » illustre ce cycle comme il est tracé sur des coordonnées d'entropie de température.

Les lignes de pression constantes divergent avec augmentation de la température et de l'entropie. Cette divergence des lignes de pression constantes font que la turbine à gaz à cycle simple est possible. Pour toutes les turbines à gaz utilisées aujourd'hui, la pression inférieure représente la pression atmosphérique et la pression supérieure représente la pression après compression de l'air. L'air est comprimé de l'état 1 à l'état 2 par un compresseur à écoulement axial, tandis que la chaleur est augmentée entre les états 2 et 3 dans une chambre de combustion. Le travail est alors dérivé de la détente des gaz de combustion chauds, de l'état 3 à 4. Depuis la détente des états 3 à 4 demande plus de travail que celui requis pour comprimer l'air de l'état 1 à 2, le travail utile est produit pour entrainer une charge telle qu'un générateur.

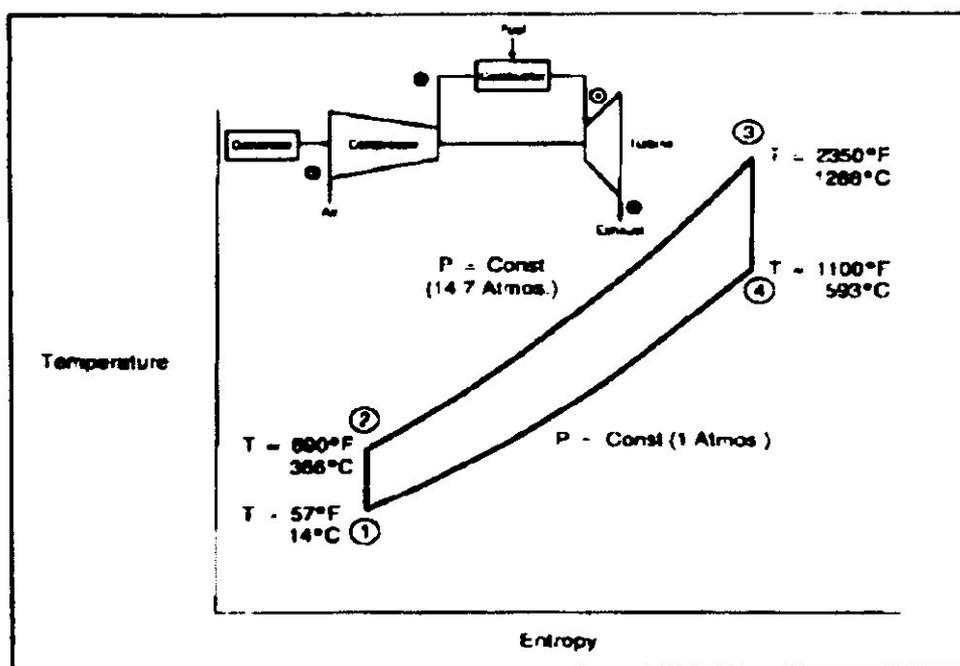


Figure 1.1 : Cycle de Brayton idéal

La figure 1 illustre le cycle ouvert commun de turbine à gaz qui est presque universelle pour la génération, l'entraînement mécanique et les applications aériennes. D'autres cycles tels que les cycles de réchauffement et les cycles de stockage pompé représentent des variations sur ce qui est illustré par la figure (1.1) [5].

1.4. Compresseur

1.4.1. Général

La section du compresseur à débit axial se compose du rotor et du corps du compresseur. A l'intérieur du corps du compresseur se trouvent les aubes directrices à ouvertures variables (VIGV), les différents étages d'aubes du rotor et du stator et les aubes directrices (IGV) en sortie.

Dans le compresseur, l'air est confiné dans l'espace entre le rotor et le stator où il est comprimé par étape par une série de pales aérodynamiques alternées en rotation (rotor) et fixes (stator). Les pales du rotor donnent la force nécessaire à la compression de l'air à chaque étage et les pales du stator guident l'air pour qu'il arrive sur l'étage suivant avec le bon angle. L'air comprimé sort du compresseur par le corps d'échappement vers les chambres de combustion. L'air est aussi extrait du compresseur pour le refroidissement de la turbine et le contrôle des pulsations au démarrage [1].

Description	Unité	Données technique
Type		Axial
Taux de compression Charge de base-Charge maximale		De l'ordre de 16,6 en ISO
Nombre des étages		18
Puissance spécifique (conditions nominales du site • 15 °C • Température minimale -0,6 °C • Température maximale 40 °C • Température ambiante moyenne en hiver 11 °C • Température ambiante moyenne en été 40 °C	Kg/s Kg/s Kg/s Kg/s Kg/s	647,82 680,97 553,38 653,67 553,38
Vannes rotatives au niveau de l'admission (oui/non)		Oui
Nombre de vannes rotatives au niveau de la sortie		Non
Nombre et position des soupapes de sûreté		2 au 9 ^e étage 2 au 13 ^e étage
Sens de rotation (vue de la turbine/de l'alternateur)		Antihoraire
Fourniture d'un dispositif anti-pompage (oui/non)		Oui

Tableau : 1.1. Caractéristique du compresseur

1.4.2. Rotor

La partie rotor du compresseur de la turbine est un assemblage de roues, d'un anneau de vitesse, de tirants d'assemblage, des pales du compresseur et d'un faux arbre avant (voir figure 1.2).

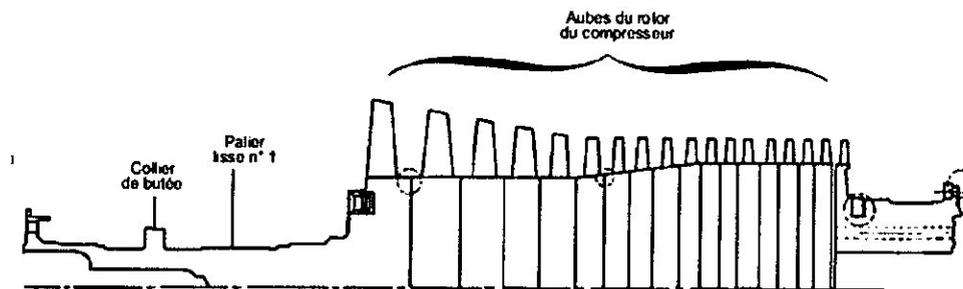


Figure 1.2 : Ensemble du rotor du compresseur

Chaque roue a des fentes brochées sur sa périphérie. Les pales de rotor et les entretoises sont insérées dans ces fentes et elles sont maintenues en position axiale en faisant pénétrer et en déformant chaque extrémité de la fente. Les roues sont assemblées l'une à l'autre avec des feuillures pour le contrôle de concentricité et sont fixées ensemble par des tirants d'assemblage.

Le faux arbre avant est usiné pour fournir le collier de butée qui porte les charges axiales avant et arrière. Ce tronçon d'arbre agit également comme surface de lissage du palier n° 1, surface d'étanchéité des joints d'huile du palier n° 1 et joint d'étanchéité à l'air basse pression du compresseur.

La roue de l'étage 17 supporte les pales du rotor et fournit aussi la surface d'étanchéité pour le joint de l'air haute pression et la bride de liaison entre le compresseur et la turbine [1].

1.4.3. Stator

Le secteur du corps de la section compresseur se compose de trois sections principales ci-dessous :

- Corps d'entrée (carter d'admission)
- Corps du compresseur (carter du compresseur)
- Corps d'échappement du compresseur (Carter de décharge du compresseur)

Ces corps, en conjonction avec le corps de la turbine, forment la structure primaire de la turbine à gaz. Ils soutiennent le rotor au niveau des points d'appui et constituent la paroi extérieure de l'espace annulaire de la veine gazeuse. Tous ces corps sont divisés horizontalement pour faciliter la maintenance [1].

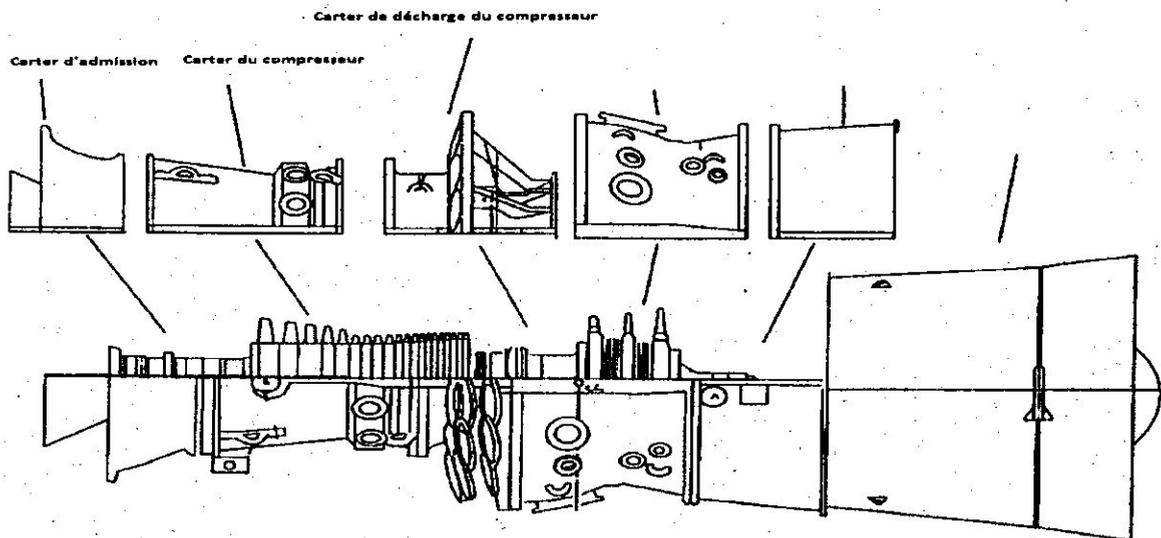


Figure1.3 : corps de la section compresseur

1.4.4. Corps d'entrée (Carter d'admission)

Le corps d'entrée (voir Figure 1.4) est situé à l'extrémité avant de la turbine à gaz. Sa fonction première est de diriger uniformément l'air dans le compresseur. Le corps d'entrée soutient également l'ensemble du palier n° 1. La partie inférieure du palier n° 1 est intégralement coulée avec l'évasement interne. La partie supérieure du palier est un moulage séparé, bridé et boulonné sur la moitié inférieure. L'évasement intérieur est positionné sur l'évasement extérieur par neuf montants aérodynamiques radiaux. Les montants sont moulés avec les parois de l'évasement. Ils transfèrent également les charges structurelles du carter adjacent vers le support avant qui est boulonné et chevillé à ce carter d'entrée.

Les aubes directrices à ouvertures variables (VIGV) sont placées à l'extrémité arrière du corps d'entrée et sont positionnées mécaniquement par un anneau de contrôle et un engrenage à pignons relié à un actionneur hydraulique et un bras de tringlerie. **La position de ces aubes influe sur le volume du flux d'air d'admission du compresseur [1].**

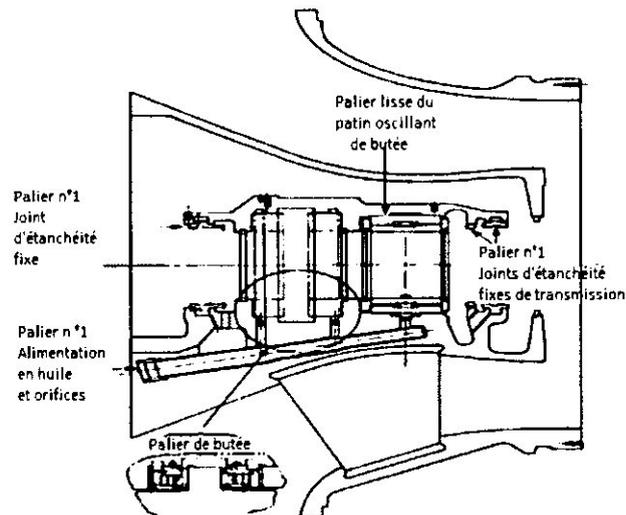


Figure 1.4 : Corps d'admission et palier n° 1 du compresseur

1.4.5. Corps du compresseur (Carter du compresseur)

Le corps avant du compresseur contient les étages 0 à 4 du stator. La moitié inférieure du carter du compresseur est équipée de deux grands tourillons intégralement coulés qui sont utilisés pour lever la turbine à gaz lorsqu'elle est séparée de sa base.

La partie arrière du corps du compresseur contient les étages 5 à 12 du stator. Les ouvertures d'extraction dans la partie arrière permettent de retirer l'air au 13ème étage du compresseur. Cet air est utilisé pour le refroidissement et aussi pour le contrôle des pulsations pendant le démarrage et l'arrêt [1].

1.4.6. Corps d'échappement du compresseur (Carter de décharge du compresseur)

Le corps d'échappement du compresseur est la partie finale de cette section. C'est l'élément le plus long ; situé au milieu entre les supports avant et arrière il est en fait la clef de voûte de la structure de la turbine. Le corps d'échappement du compresseur contient les derniers étages du compresseur, forme les parois internes et externes du diffuseur et lie les corps du compresseur et de la turbine. Il fournit aussi un support pour les corps extérieurs de la combustion et le support intérieur pour la directrice du premier étage de la turbine.

Le corps d'échappement du compresseur se compose de deux cylindres, le premier étant une continuation du corps du compresseur et le second étant un cylindre interne qui entoure le rotor du compresseur. Les deux cylindres sont positionnés concentriquement par quatorze nervures radiales.

Un diffuseur est formé par un anneau conique entre les cylindres intérieur et extérieur du corps d'échappement. Le diffuseur convertit une certaine vitesse de sortie du compresseur en pression statique ajoutée pour l'alimentation en air de combustion [1].

1.4.7. Les aubes (les pales)

Les pales du rotor du compresseur et du stator ont une forme aérodynamique et sont conçues pour comprimer avec efficacité l'air. Les pales sont fixées aux roues du compresseur par des assemblages en queue d'aronde. La queue d'aronde est très précise en taille et position pour maintenir chaque pale dans la position voulue sur la roue.

Les pales du stator du compresseur sont aérodynamiques et montées par les mêmes queues d'aronde sur des segments de cercles pour les cinq premiers étages. Les segments annulaires sont insérés dans des rainures circonférentielles dans le corps et sont maintenus en place par des clavettes de verrouillage. Les pales du stator des autres étages ont une base carrée en queue d'aronde et sont insérées directement dans des gorges à la circonférence du corps. Des clavettes de verrouillage les maintiennent en place [1].

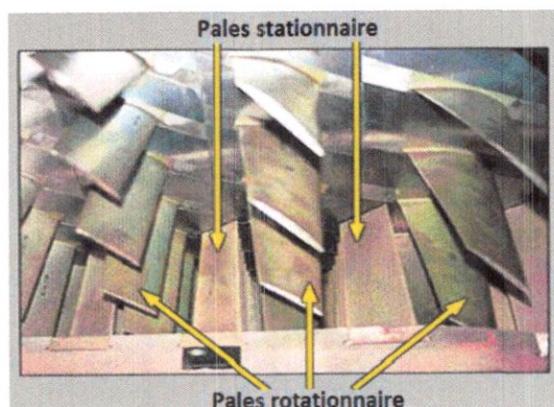


Figure 1.5 : les pales

1.5. DLN-2,6+ Système de combustion

1.5.1. Général

Le système de combustion est de type flux inversé avec 18 chambres de combustion installées autour de la périphérie du corps d'échappement compresseur. Les chambres de combustion sont numérotées dans le sens inverse des aiguilles d'une montre lorsqu'observées en aval et en partant de la partie supérieure gauche de la turbine. Ce système prévoit également des injecteurs de combustible, un système d'allumage par bougies, des détecteurs de flamme et des tubes d'interconnexion. Les gaz chauds, dégagés du combustible enflammé

au sein des chambres de combustion, circulent en direction de la turbine à travers les pièces de transition refroidies par contact [1].

Description	Données technique
Nombre de chambres de combustion	18
Nombre de tubes de flamme	18
Contrôle visuel de la flamme envisagé (oui/non)	Non
Matériaux du corps	Hastelloy X + HS 188-TBC Nimonic 263-TBC
Un fonctionnement prolongé est-il possible si la chambre de combustion est endommagée ?	Non
Nombre de brûleurs	18
Nombre d'injecteurs	6 injecteurs par brûleur

Tableau : 1.2. Caractéristique de la chambre de combustion

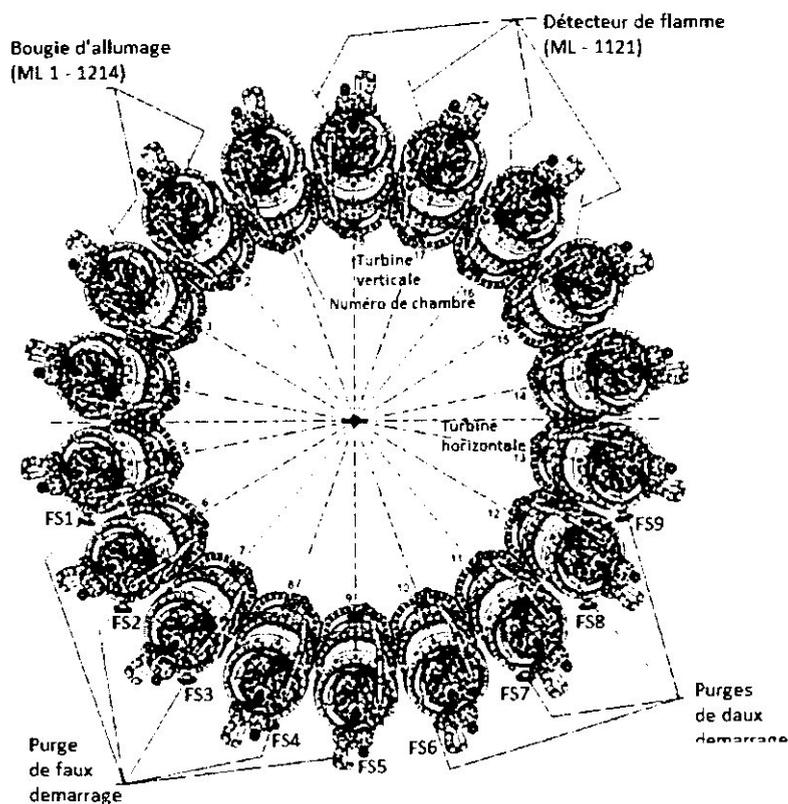


Figure 1.6 : Disposition du système de combustion MS9001FA

L'air à haute pression de l'échappement du compresseur est dirigé autour des pièces de transition. Une partie de cet air pénètre dans les orifices du canalisateur de refroidissement par contact afin de refroidir les pièces de transition, puis circule dans le canalisateur d'air.

Le reste entre dans l'espace annulaire entre le manchon d'écoulement et le tube de flamme de combustion par les trous dans l'extrémité en aval du manchon d'écoulement. (Figures 1.7 et 1.8). Cet air pénètre ensuite dans la zone de combustion à travers l'ensemble chapeau pour assurer une combustion efficace. Le combustible est acheminé dans chaque chambre de combustion en passant cinq injecteurs conçus pour disperser et mélanger le combustible avec le volume d'air de combustion approprié.

Le système de combustion DLN-2,6+ de la figure 1.6 forme un unique étage, chambre de combustion double capable de fonctionner au gaz et au combustible liquide. Avec du gaz, la chambre de combustion fonctionne en mode diffusion avec des charges faibles (charge < 50 %) et en mode prémélange avec des charges élevées (charge > 50 %). Bien que la chambre de combustion soit capable de fonctionner en mode diffusion sur l'intégralité de la plage de charge, l'injection de diluant reste nécessaire pour l'atténuation NOx. Le fonctionnement de l'huile sur cette chambre de combustion est en mode diffusion sur toute la plage de charge, avec une injection de diluant utilisée pour le NOx [5].

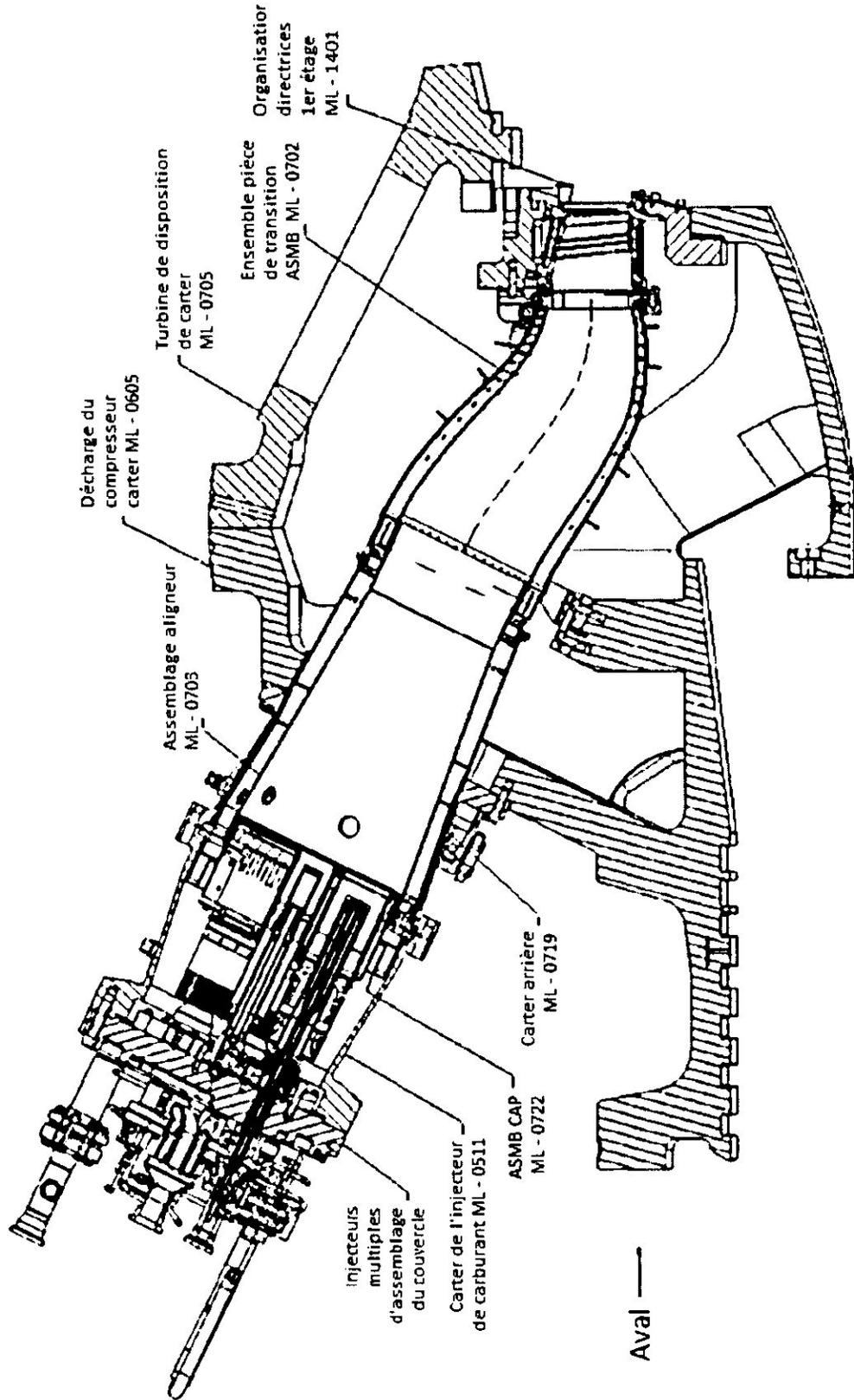


Figure 1.7 : Configuration de combustion MS9001FA-2.6+

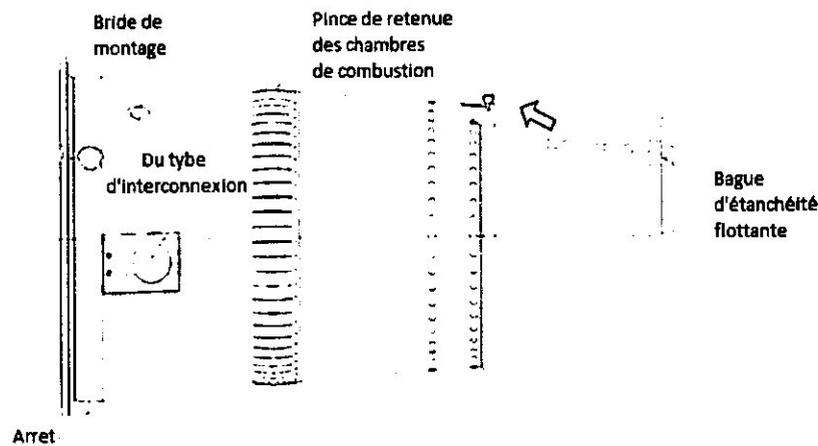


Figure 1.8 : Manchon d'écoulement

1.5.2. Chambres de combustion externes et enveloppes intermédiaires des chambres de combustion

Les chambres de combustion externes agissent comme des coques de pression pour les brûleurs. Elles servent aussi à la fixation des couvercles d'injecteurs, des tubes d'interconnexion, des bougies d'allumage, des détecteurs de flamme et des purges de faux départ. Les enveloppes intermédiaires Figure 1.8 forment un espace annulaire autour du chapeau et des ensembles de tube de flammes qui dirige la combustion et l'air de refroidissement dans la zone de réaction [1].

1.5.3. Tubes d'interconnexion

Toutes les chambres de combustion sont interconnectées à l'aide des tubes d'interconnexion. Les chambres externes sont connectées à l'aide d'un tube d'interconnexion externe et les zones principales du tube de flamme de combustion sont connectées à l'aide de tubes d'interconnexion internes [1].

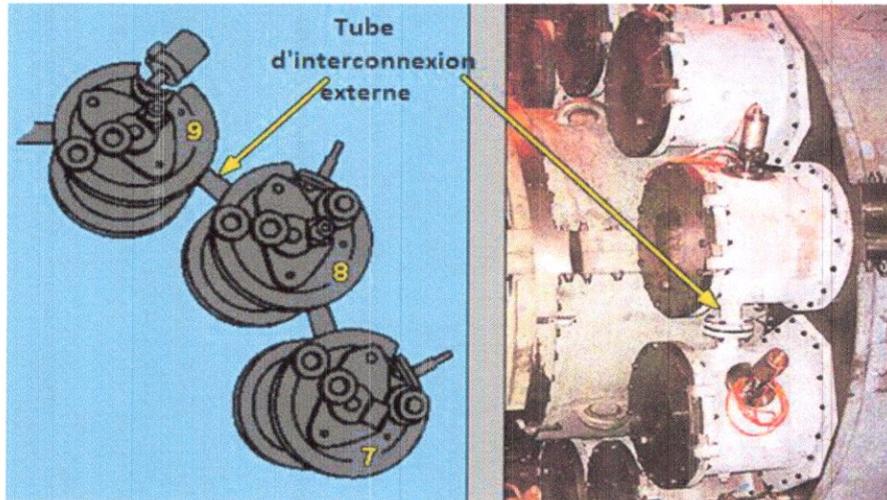


Figure 1.9 : Tube d'interconnexion

1.5.4. Couvercles d'extrémité d'injecteurs de combustible

Cinq ensembles d'injecteurs de carburant extérieurs « voir Figure 1.10 » entourent un ensemble d'injecteur de carburant central. Dans chaque chambre de combustion. Les injecteurs de carburant extérieurs sont équipés de passages pour le gaz de diffusion et le gaz prémélange alors que l'injecteur de carburant central n'utilise que le gaz prémélange. Pour le fonctionnement avec du carburant liquide, une cartouche offre des passages supplémentaires pour l'huile, l'air d'atomisation et l'eau pour les injecteurs de carburant extérieurs. Lorsque les injecteurs de carburant sont montés sur le couvercle d'extrémité « Figure 1.11 », les passages de diffusion des injecteurs de carburant extérieurs sont alimentés à partir d'un collecteur commun. Le gaz prémélange pour ces injecteurs extérieurs provient de deux circuits indépendants et est conduit vers les injecteurs de carburant via un collecteur interne. Le gaz prémélange pour les injecteurs centraux provient d'un autre circuit indépendant [1].

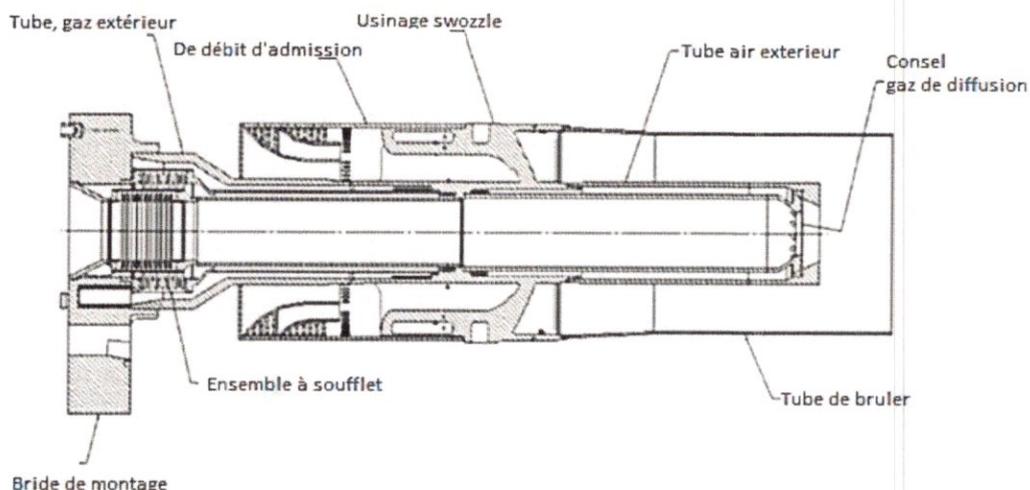


Figure 1.10 : DLN-2.6+ section transversale de l'injecteur de carburant extérieur

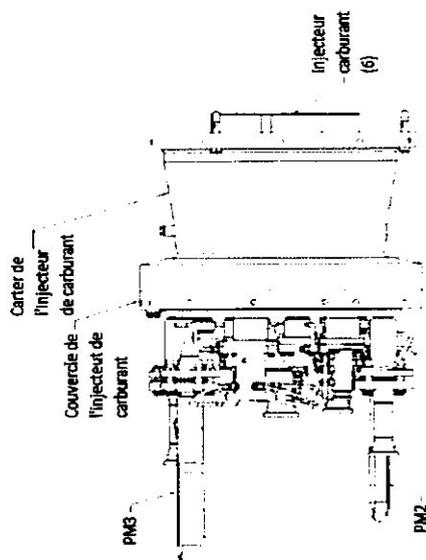


Figure 1.11 : Disposition de l'injecteur de carburant

1.5.5. Ensembles chapeau et tube de flammes

Les tubes de flamme de combustion « Figure 1.12 » utilisent des crêtes externes et des encoches de refroidissement classiques pour le refroidissement. Les surfaces intérieures du chapeau ont un revêtement de protection thermique pour réduire les températures du métal .Le couvercle « Figures 1.13 » comporte six tubes de prémélange s'insérant dans chacun des six injecteurs de combustible [1].

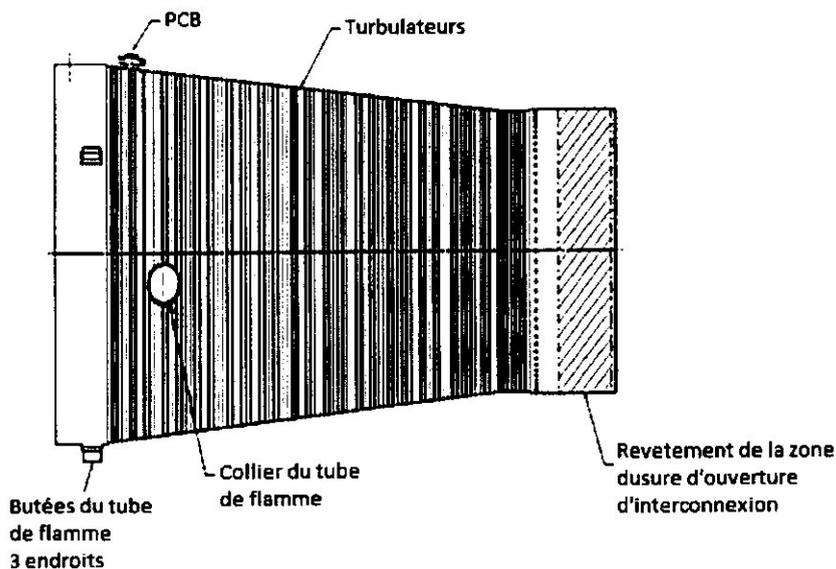


Figure 1.12 : Tube de flamme de combustion

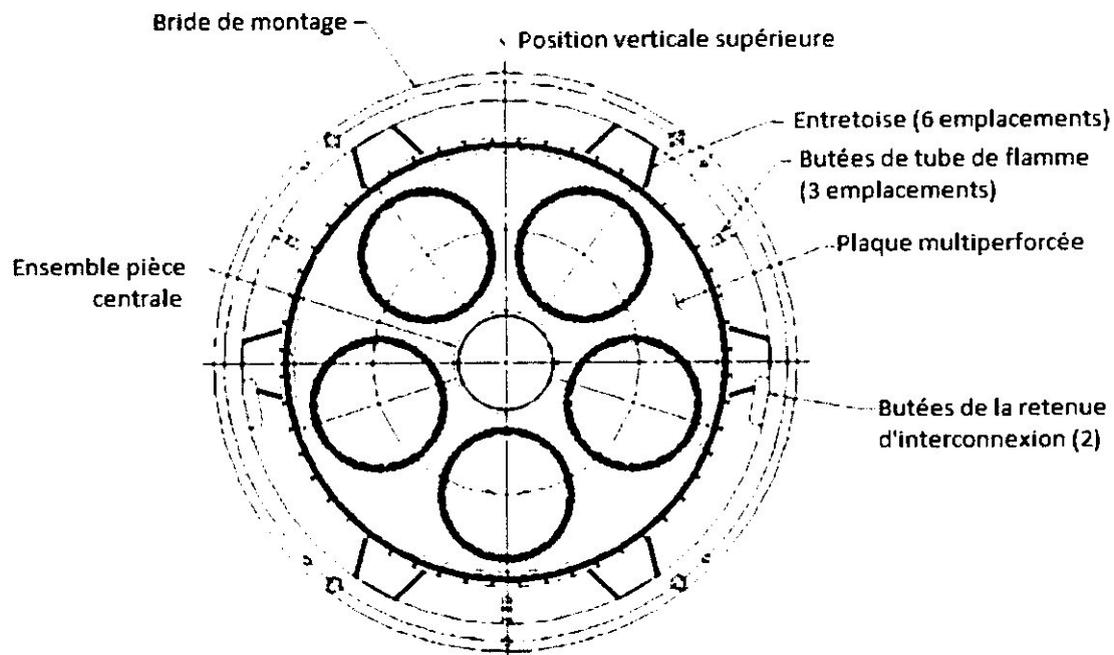


Figure 1.13 : Ensemble du chapeau –vue en aval

1.5.6. Bougie

La combustion est déclenchée par l'arc de bougies d'allumage, qui sont vissées sur les brides des chemises de combustion et centrées entre le tube de flamme et l'enveloppe intermédiaire des chambres de combustion adjacentes. La Figure 1.14 illustre un agencement type de bougies d'allumage. L'alimentation des bougies est assurée par des systèmes d'alimentation à décharge de condensateur haute puissance. Au moment de l'allumage, l'étincelle d'une ou de plusieurs de ces bougies allume les gaz dans une chambre ; les autres chambres sont allumées par les tubes qui relient leur zone de réaction [1].

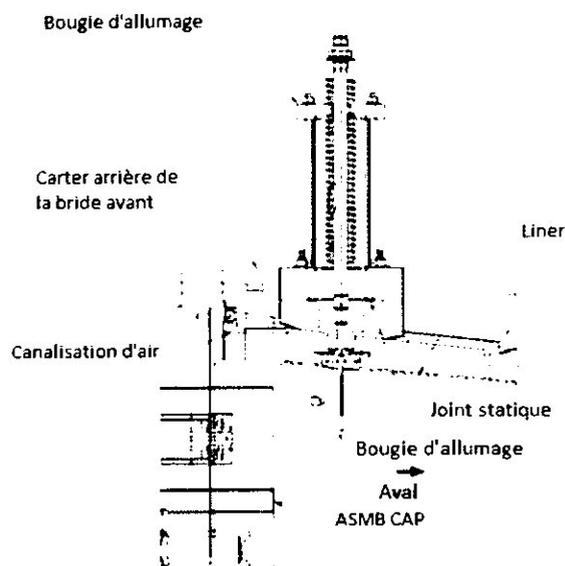


Figure 1.14 : Bougie d'allumage

1.5.7. Détecteurs de flamme aux ultraviolets

Pendant la séquence de démarrage, il est essentiel qu'une indication de la présence ou de l'absence de flamme soit transmise au système de commande. Pour cette raison, un système de surveillance de la flamme est utilisé et consiste en détecteurs placés (Figure 1.15) comme indiqué sur la figure 1.6.

Le détecteur de flamme aux ultraviolets contient un détecteur rempli de gaz. Le gaz de ce détecteur est sensible à la présence de radiations ultraviolettes émises par une flamme d'hydrocarbure. Une tension continue, fournie par un amplificateur, traverse les bornes du détecteur. Si une flamme est présente, l'ionisation du gaz dans le détecteur permet la conduction dans le circuit, ce qui active l'électronique et donne un signal indiquant une flamme. De même, l'absence de flamme va générer un signal indiquant qu'il n'y a pas de flamme.

Les signaux venant des quatre détecteurs de flamme sont envoyés au système de contrôle, qui utilise une logique interne pour déterminer si la condition de flamme ou d'absence de flamme existe [1].

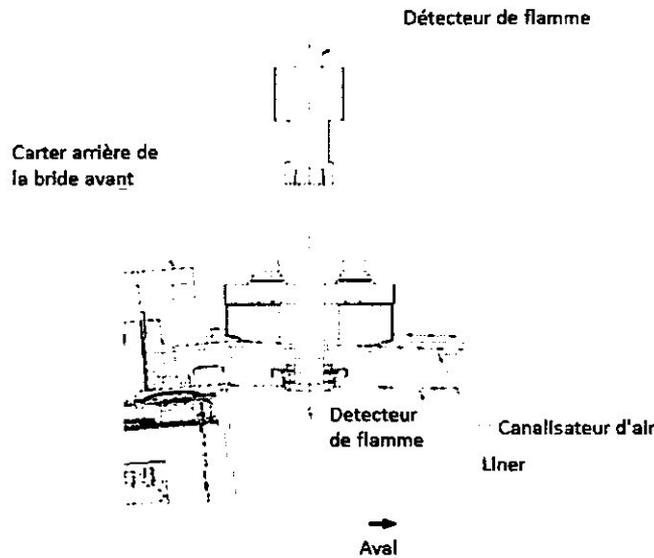


Figure 1.15 : Détecteur de flammes

1.6. Turbine

1.6.1. Général

La section de turbine à trois étages est le secteur dans lequel l'énergie contenue dans le gaz pressurisé à haute température, produit par les sections compresseur et combustion est convertie en énergie mécanique. La turbine à gaz MS9001FA comprend le rotor de turbine, le corps, le caisson d'échappement, le diffuseur d'échappement, les injecteurs et des bandages. Caractéristique [1].

Description	Données technique
Type	Axial
Nombre d'étages	3
Vitesse nominale	3000 (tr/min)
Nombre de profils des différentes extrémités de directrice	Chaque étage a son propre profil
Nombre de niveaux avec aubes mobiles ayant le même profil	Aucun
Nombre de rangées de refroidissement	
• Mobiles	2
• Fixes	3

Figure : 1.3. Caractéristique de la turbine

1.6.2. Rotor de turbine

1.6.2. 1. Structure

L'ensemble de rotor de turbine, présenté en Figure 1.16, comprend les arbres avant et arrière des roues de la turbine, les ensembles des trois premiers étages avec les entretoises et les aubes. Le contrôle de concentricité est obtenu avec des feuillures qui correspondent sur les pièces d'écartement, les roues de turbine, les arbres des roues et les entretoises. Les roues sont assemblées par des boulons vissés sur des brides boulonnables sur les arbres et les entretoises de roues [1].

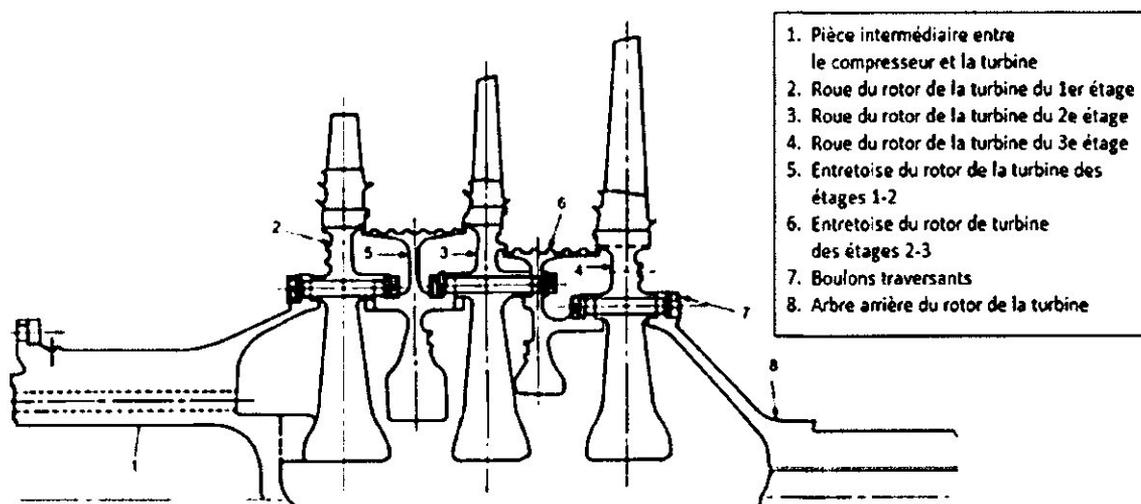


Figure1.16 : Montage de rotor turbine

1.6.3. Arbres de roues

La pièce d'écartement du rotor de turbine va de la roue de turbine première étage jusqu'à la bride arrière de l'ensemble rotor du compresseur.

L'arbre arrière du rotor de la turbine inclut le palier lisse n° 2 [1].

1.6.4. Refroidissement

Le rotor de turbine est refroidi pour maintenir des températures de fonctionnement raisonnables et donc pour assurer une longue durée de vie à la turbine. Le refroidissement est effectué par un flux positif d'air froid prélevé sur le compresseur et déchargé radialement vers l'extérieur par un espace entre la roue de la turbine et le stator, dans le flux principal de gaz. Cette zone est appelée espace inter-roues [1].

1.6.5. Aubes

L'air est introduit dans chaque aube premier étage par un caisson à la base de la queue d'aronde de l'aube. Il passe dans des trous de refroidissement en forme de serpentin sur toute la longueur de l'aube et sort par le bord de fuite et l'extrémité de l'aube. Les trous sont espacés et dimensionnés pour obtenir un refroidissement optimal de la surface aérodynamique avec une extraction minimale d'air du compresseur. La figure 1.17 représente la conception des aubes premier étage de la MS9001FA

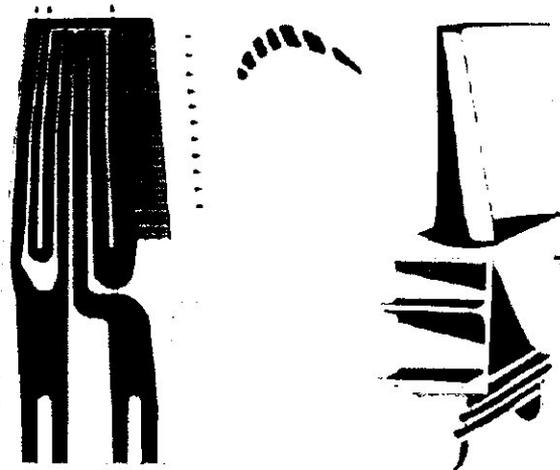


Figure 1.17 : Passages de refroidissement des aubes premier étage de la MS9001FA

A la différence des aubes premières étage, celles du second étage sont refroidies par des passages d'air parallèles sur toute la longueur du profil aérodynamique. L'air est introduit comme au premier étage par un caisson à la base de la queue d'aronde de l'aube. De nouveau le refroidissement du profil aérodynamique est accompli avec une pénalisation minimale du cycle thermodynamique.

L'intérieur des aubes du troisième étage n'est pas refroidi à l'air. Les extrémités de ces aubes, comme pour les aubes du deuxième étage, sont entourées d'un segment de protection intégré au joint d'extrémité. Ces bandages sont solidaires d'aube en aube pour amortir les vibrations [1].

1.6.6. Directrices

La section turbine comprend trois étages de directrices fixes (Figure 1.18) qui dirigent le flux à grande vitesse des gaz de combustion en expansion vers les aubes de la turbine et amènent la rotation du rotor [1].

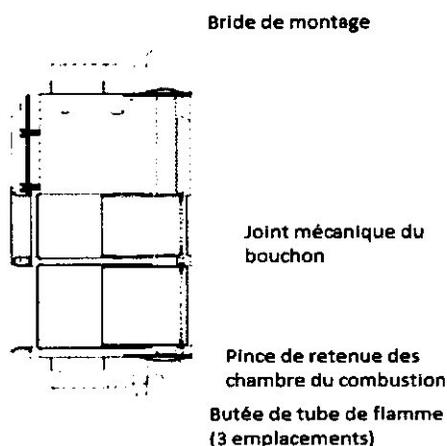


Figure 1.18 : Ensemble du chapeau

1.6.7. Cadre d'échappement

Le cadre d'échappement est boulonné sur la bride arrière du corps de turbine. Structuellement, le cadre se compose d'un cylindre extérieur et d'un cylindre intérieur interconnectés par des nervures radiales.

Le diffuseur d'échappement situé à l'extrémité arrière de la turbine est boulonné au cadre. Les gaz qui sortent du troisième étage de la turbine pénètrent dans le diffuseur où la vitesse est réduite par diffusion et où la pression est récupérée. A la sortie du diffuseur, les gaz sont dirigés vers le caisson d'échappement [1].

1.7. Principe de fonctionnement (la veine gazeuse)

La veine gazeuse est le chemin suivi par le flux de gaz depuis l'entrée d'air à travers le compresseur, la chambre de combustion et la turbine jusqu'à l'échappement de la turbine.

Lorsque le système de démarrage de la turbine est actionné et que l'embrayage est engagé, l'air ambiant est tiré de la gaine d'admission d'air, filtré et comprimé dans le compresseur à débit axial et à phases multiples. Les robinets de purge du compresseur sont ouverts au démarrage pour éviter des pulsations et les Aubes directrices à ouvertures variables sont en position fermée. Lorsque le relais de grande vitesse s'active, les robinets de purge commencent à fonctionner automatiquement et l'actionneur des aubes est alimenté pour positionner les aubes directrices pour un fonctionnement normal de la turbine. L'air comprimé par le compresseur passe par l'espace annulaire qui entoure les chambres de combustion, puis dans les espaces entre les corps externes et les tubes de flamme, et entre dans la zone de combustion par les trous calibrés de chaque tube de flamme.

Le combustible venant d'une source extérieure arrive par des conduites qui se terminent par des injecteurs primaires et secondaires dans le couvercle d'extrémité des chambres de combustion séparées. Dans le cas des turbines à combustible liquide, le combustible fait l'objet d'un contrôle avant d'être acheminé dans les injecteurs, afin d'assurer un débit uniforme pour chaque vanne de distribution de combustible liquide installée sur chaque couvercle d'extrémité et chaque conduite de combustible liquide sur chaque ensemble d'injecteurs secondaires. Sur les machines à combustible gazeux, les injecteurs de carburant sont les orifices de mesure d'instrument qui fournissent le débit approprié dans les zones de combustion des chambres. Les injecteurs introduisent le carburant dans la zone de combustion de chaque chambre où il est mélangé avec l'air de combustion et allumé par une ou plusieurs bougies. A l'instant où le carburant explose dans une chambre de combustion, la flamme est propagée, par des tubes d'interconnexion, à toutes les autres chambres où elle est détectée par quatre détecteurs de flamme, montés chacun sur un support aménagé sur le corps de la chambre de combustion.

Les gaz chauds venant des chambres de combustion passent dans des pièces de transition séparées fixées à l'arrière des tubes de flammes des chambres et de là dans la section de turbine à trois étages.

Chaque étage consiste en un distributeur annulaire et une rangée d'aubes de turbine. Dans chaque distributeur annulaire, l'énergie cinétique du jet est augmentée avec une chute de pression associée qui est absorbée par le travail des aubes du rotor de la turbine et amène une rotation de l'arbre utilisée pour entraîner l'alternateur et produire de l'électricité.

Après le passage dans les aubes troisième étage, les gaz sont dirigés dans le diffuseur d'échappement.

Les gaz passent ensuite dans la gaine d'échappement et sont introduits dans l'atmosphère à travers la cheminée d'échappement [1].

Chapitre 02

Systeme de controle et commande Mark

VIe

2.1. Aspect matériel

2.1.1. Introduction

La commande Mark VIe a été conçue pour répondre à un nombre important d'applications de commande et de protection, des turbines à vapeur et à gaz à l'équipement de la partie classique de la centrale (BOP). Le système de contrôle consiste principalement en trois composants matériels : les contrôleurs, les commutateurs IONet et les modules d'E/S. La commande offre plus d'options pour la redondance, elle améliore les possibilités d'entretien et permet de positionner les E/S plus près de l'équipement contrôlé. Cette système représente une source unique de données de qualité et synchronisées au niveau du contrôleur et au niveau de la centrale, permettant de gérer efficacement les équipements. [1]

2.1.2. Contrôleur

Le contrôleur Mark VIe peut prendre la forme d'un module autonome UCSx qui s'installe directement à l'intérieur d'une armoire ou d'un ordinateur à une seule carte qui se monte dans un rack (voir figure 2.1). Le contrôleur intègre un logiciel spécifique à son application, qui inclut, notamment, les produits vapeur, gaz ou équipement classique de la centrale (BOP). Il peut exécuter des diagrammes en échelle de relais ou des blocs. L'horloge des modules d'E/S et les contrôleurs est synchronisé avec une précision de ± 100 microsecondes. Les données sont transférées vers et à partir de la base de données du système de contrôle dans le contrôleur via les réseaux E/S. Les données IONet comprennent des entrées / sorties vers les packs d'E/S. [1]

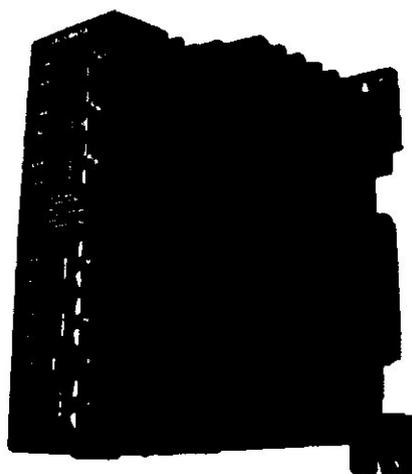


Figure 2.1 : image réelle d'un contrôleur

2.1.2.1. Avantage du contrôleur UCSx

L'UCSx offre les avantages suivants [1]:

- module monobloc
- alimentation intégrée
- aucun positionnement de cavalier requis
- aucune batterie
- Aucun ventilateur (UCSAH1A and UCSBH1A / UCSBH4A)
- Ventilateurs contrôlés à double redondance avec le modèle IS420UCSBH3A
- Encombrement d'armoire réduit

2.1.3. Commutateurs IONet

Les commutateurs Ethernet 10/100 industriels de GE (ESWx) présentent les performances et caractéristiques dont ont besoin les systèmes de commande industriels en temps réel d'aujourd'hui (voir figure 2.2). Utilisez uniquement des commutateurs Ethernet ESWx dans tous les réseaux E/S des systèmes de commande afin de maintenir la fiabilité requise pour la réception intégrale des modules d'E/S des sorties de contrôleur [1].

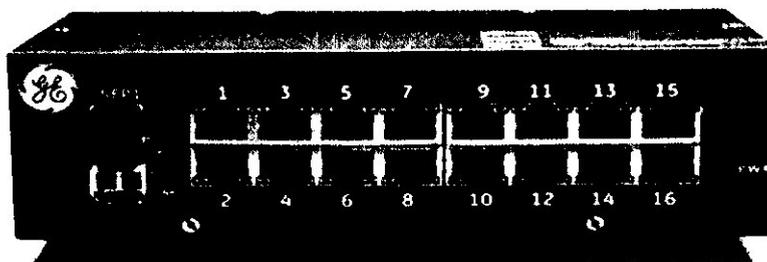


Figure 2.2 : image réelle d'un commutateur IONet

2.1.4. Modules d'E/S distribués

Les modules d'E/S comprennent trois composants de base : une plaque à bornes, un bornier et un module d'E/S. La plaque à bornes se monte sur l'armoire. Le module d'E/S se fixe sur le connecteur des ports J de la plaque à bornes (voir figure 2.3) [1].

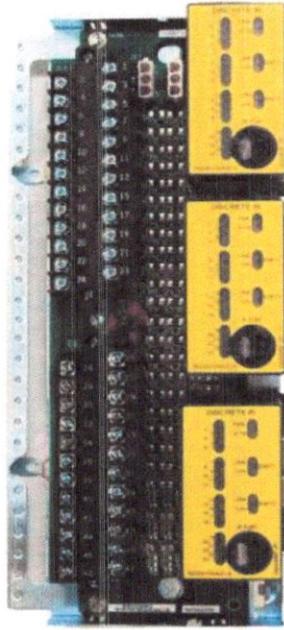


Figure 2.3.a Module d'E/S TMR

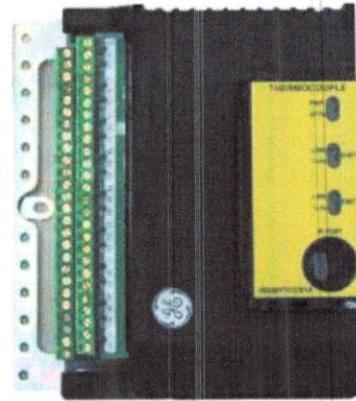


Figure 2.3.b Module E/S Simplex

2.1.4.1. Module d'E/S

Les modules E/S du système de contrôle MarkVIe disposent d'une carte processeur générique et d'une carte d'acquisition de données propre au type de dispositif connecté (voir figure 2.4). Les modules E/S sur chacune des plaques à bornes numérisent le signal, exécutent des algorithmes et communiquent avec le contrôleur Mark VIe.

Le pack d'E/S transmet les entrées et reçoit les sorties sur les deux interfaces réseau si elles sont connectées. Chaque pack d'E/S envoie également un message d'identification (paquet d'ID) au contrôleur principal, lorsque cela est demandé. Les packs d'E/S ont un capteur de température qui a une précision de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ (36°F). Chaque température de pack d'E/S est disponible dans la base de données et peut être utilisée pour générer une alarme. La circulation du signal commence par un capteur connecté à un bornier sur une carte

Dans notre cas nous intéressons au module PCAA qui assure la régulation de la servovanne 90TV de système VIGV. [1]



Figure 2.4 : exemple d'un module d'E/S

2.1.5. Options de redondance

La commande Mark VIe prévoit des niveaux de redondance modulables. Le système de base est un contrôleur simple (simplex) avec des E/S simplex et un réseau. Le système double a deux contrôleurs, des E/S TMR ventilées ou isolées et des réseaux doubles qui apportent une fiabilité accrue et des options de réparation en ligne. Le système TMR a trois contrôleurs, E/S TMR singuliers ou ventilés, trois réseaux et un vote d'état entre les contrôleurs qui apporte une détection de défaut et une disponibilité maximales. [1]

2.1.5.1 Redondance du contrôleur

La redondance du contrôleur consiste en les éléments suivants [1]:

- Contrôleur simplex
- Contrôleurs doubles
- Contrôleurs à triple redondance modulaire TMR (voir figure 2.5).

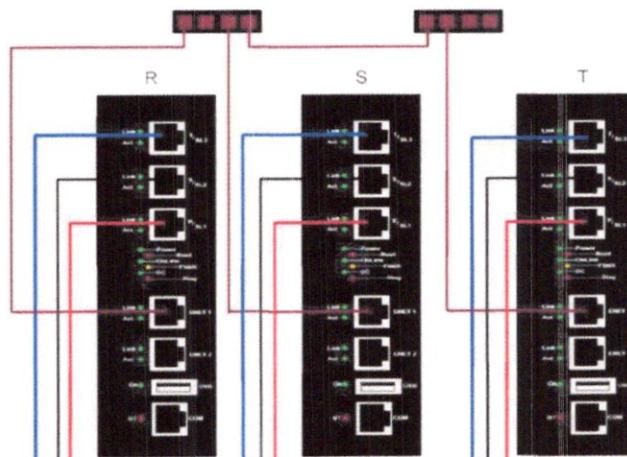


Figure 2.5 : Contrôleurs Marck VIe (TMR)

2.1.5.2 Redondance E/S

Plusieurs options sont disponibles pour les modules simples et multiples et les réseaux doubles en ce qui concerne la redondance d'E/S. Voici les options pour les modules d'E/S TMR [1] :

- Module d'E/S à module simple et réseau double (SPDN)
- Modules d'E/S à deux modules simples et réseau simple (2SPSN)
- Module d'E/S à module double et réseau double (DPDN)
- Module d'E/S à module triple et réseau double (TPDN).

2.1.6. Traitement des entrées

Toutes les entrées sont disponibles vers les trois contrôleurs mais il y a plusieurs manières de gérer les données en entrée. Pour les signaux en entrée qui existent dans un seul module d'E/S, la valeur est utilisée par les trois contrôleurs en tant qu'entrée commune sans vote comme on le voit dans le tableau ci-dessous. Les signaux qui apparaissent dans les canaux d'E/S peuvent faire l'objet d'un vote pour créer une seule valeur en entrée. Les entrées triples peuvent venir de trois capteurs indépendants. Elles peuvent également être créées à partir d'un seul capteur par ventilation matérielle sur les plaques à bornes

Redondance du contrôleur Mark Vie	Topologies disponible
Simplex	Un module d'E/S avec un réseau IONet
Double	-Un module d'E/S avec deux réseaux IONet -Deux modules d'E/S avec un réseau IONet par module -Trois modules d'E/S avec <R> un réseau IONet vers le contrôleur <R>, <S> un réseau IONet vers le contrôleur <S>, et <T> deux réseaux IONet dont un vers le contrôleur <R> et l'autre vers le contrôleur <S>
TMR	Desserte multiple – trois modules, un réseau

	IONet/module avec un bornier Dédicé – trois modules, un réseau IONet / module avec trois borniers séparés
Le nombre de réseaux IONet d'un système doit être égal au nombre de contrôleurs.	

Tableau : 2.1. Topologies du contrôleur Mark VIe

Pour toutes les configurations d'entrée ci-dessus, des entrées multiples peuvent être utilisées pour donner de la redondance à l'application. Par exemple, trois entrées Simplex peuvent être utilisées et sélectionnées dans le code d'application pour fournir une redondance de capteur (voir figure 2.6). La commande Mark VIe offre la capacité de configuration pour la sélection d'entrées et de votes en utilisant un algorithme de détection de défaut/vote/sélection efficace simple et très fiable pour réduire les efforts de configuration.

Si chaque IONet est associé à un contrôleur spécifique capable de transmettre des sorties, tous les contrôleurs voient tous les IONets. Le résultat est que pour une entrée simplex, les données seront non seulement vues par le propriétaire de la sortie de l'IONet, mais elles sont vues en parallèle par d'autres contrôleurs. L'avantage est que la perte d'un contrôleur associé à une entrée simplex ne se traduit pas par la perte de ces données.

Les données simplex continuent à arriver vers les autres contrôleurs du système.

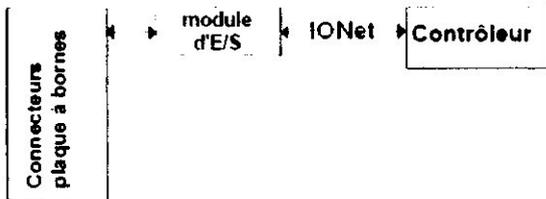


Figure 2.6.a : Simplex - Un module d'E/S d'E/S

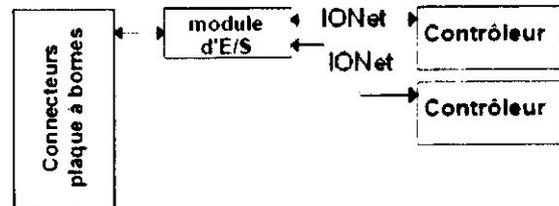


Figure 2.6.b : Double - Un module d'E/S

Avec un IONet

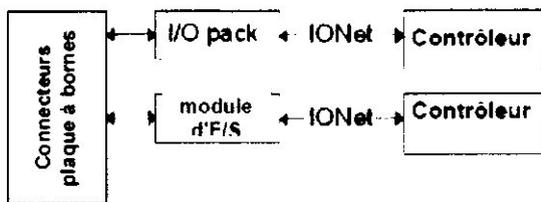


Figure 2.6.c : Double – Deux modules d'E/S d'E/S

avec deux réseaux IONets

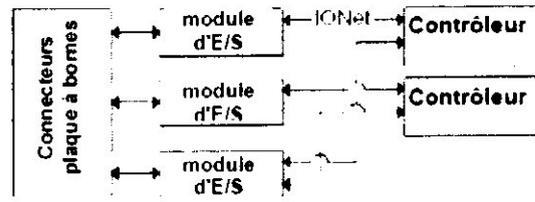


Figure 2.6.d : Double – Trois modules d'E/S

avec un IONet

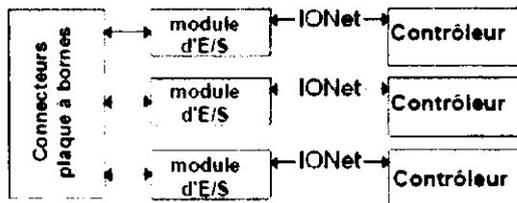


Figure 2.6.e : TMR ventilée – Trois modules d'E/S avec un IONet par module d'E/S

avec 1, 1, 2 IONets

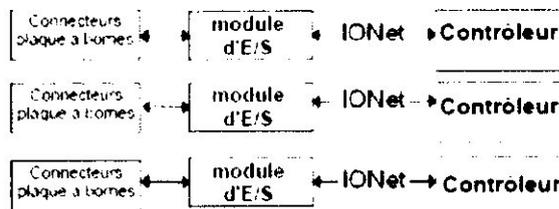


Figure 2.6.f : TMR dédiée – Trois modules d'E/S avec un IONet par module d'E/S

Une entrée unique peut être acheminée aux trois contrôleurs sans aucune sélection. Elle est utilisée pour une E/S générique non critique, comme la surveillance des entrées de 4-20 mA, des contacts, des thermocouples et des dispositifs résistance température (RTD) (voir figure 2.7.a).

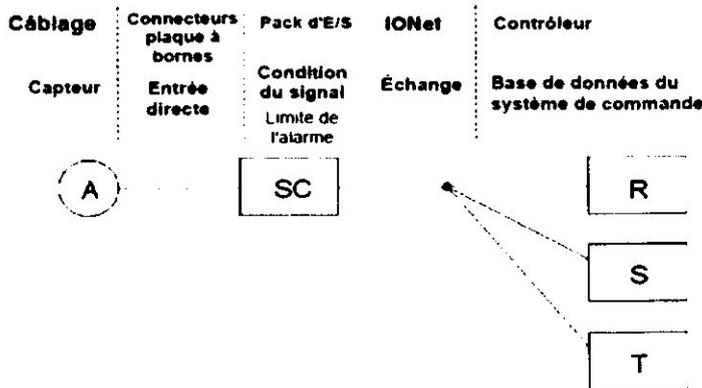


Figure 2.7.a : Entrée unique vers les trois contrôleurs, non sélectionnée

Un capteur peut être ventilé vers les trois cartes d'E/S comme ci-dessus pour les applications à intégrité moyenne. Il est utilisé pour les capteurs à fiabilité moyenne à élever. Les trois circuits sont nécessaires pour trois capteurs. Les entrées types sont des entrées de 4-20 mA, des contacts, des thermocouples et des RTD.

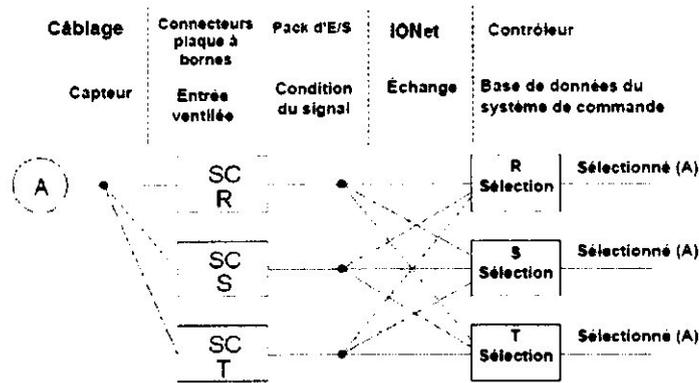


Figure 2.7.b : Un capteur avec entrée ventilée et sélection logicielle

Trois capteurs indépendants peuvent être amenés dans les contrôleurs sans sélection afin de fournir des valeurs de capteur individuel à l'application. Les valeurs médianes peuvent être sélectionnées dans le contrôleur si nécessaire. Cette configuration, affichée dans la figure suivante, est utilisée pour les applications spéciales uniquement.

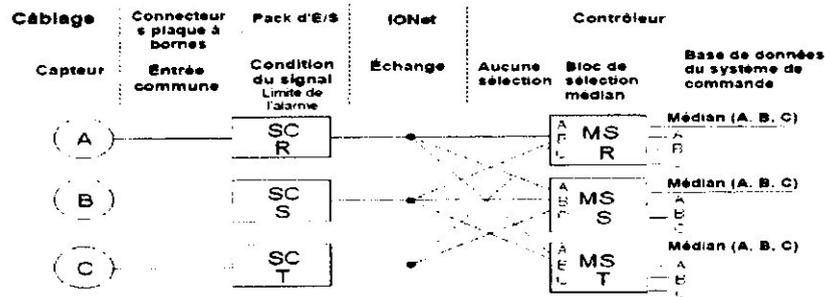


Figure 2.7.c : Trois capteurs indépendants avec entrée commune non sélectionnée

La figure suivante illustre les trois capteurs, chacun ventilé, puis la tolérance aux défauts mise en œuvre par logiciel (SIFT) sélectionnée. Ceci offre une fiabilité élevée pour les entrées de courant et de contact et les capteurs de température.

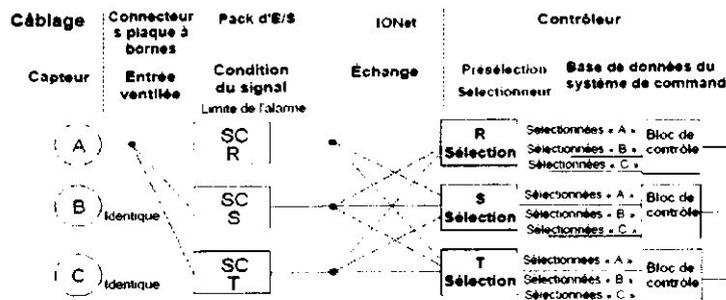


Figure 2.7.d: Trois capteurs, chacun ventilé et sélectionné, pour les applications à fiabilité moyenne à élevée

Les applications d'entrée de vitesse à fiabilité élevée sont amenées dans les entrées dédiées et la SIFT est sélectionnée. La figure suivante illustre cette configuration [1].

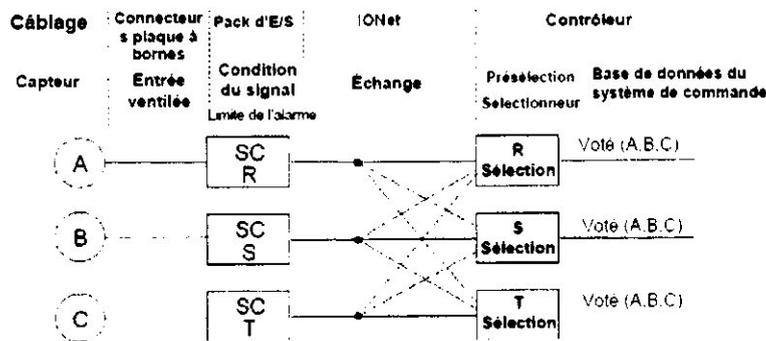


Figure 2.7.e : Trois capteurs avec entrées dédiées, sélectionnées par logiciel pour les applications à fiabilité élevée

2.1.7. Traitement de la sortie

Les sorties système sont la partie des données calculées qui doivent être transférées vers les interfaces de matériel externe puis vers les différents actionneurs contrôlant le processus. Les sorties venant du système TMR font l'objet d'un vote dans le matériel de sortie votant. Tout système peut sortir des signaux individuels dans un matériel simplex

Les trois contrôleurs votant calculent indépendamment les sorties du système TMR.

Chaque contrôleur envoie la sortie à son matériel E/S associé (par exemple, le contrôleur R envoie la sortie aux E/S R). Les trois sorties indépendantes sont ensuite combinées en une seule sortie par un mécanisme de votation. Les différents types de signaux exigent différentes méthodes pour établir la valeur votée.

Les sorties de signaux des trois contrôleurs sont réparties en trois groupes :

- Les sorties sont pilotées en tant que sorties non redondantes à une seule extrémité provenant de réseaux d'E/ individuels
- Les sorties existent sur les trois réseaux d'E/S et sont fusionnées en un seul signal par le matériel de sortie
- Les sorties existent sur les trois réseaux d'E/S et sont sorties séparément vers le processus contrôlé. Ce processus peut contenir du matériel votant externe.

Pour les sorties de servocommande, les trois signaux de courant indépendants entraînent un servomoteur à trois bobines, ce qui les ajoute par sommation de flux magnétique, comme illustré dans la figure suivante 2.8. La panne d'un servomoteur est

détectée et un contact de désactivation de relais est fermé pour court-circuiter la bobine de servo.

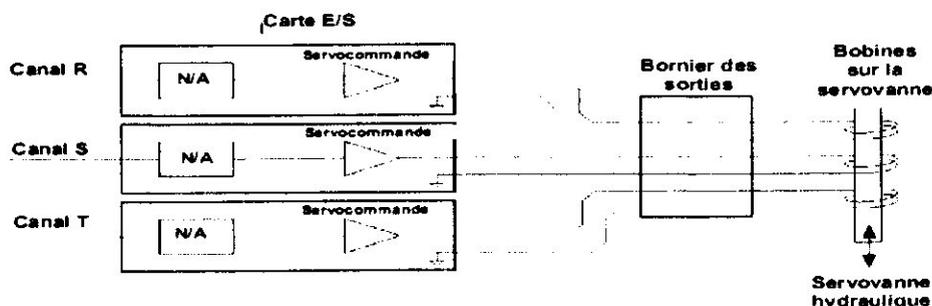


Figure 2.8 : Circuit TMR pour combiner trois courants analogiques dans une sortie unique

LA figure suivante illustre des signaux de 4-20 mA combinés dans un circuit de partage de courant 2/3 qui permet de sélectionner les trois signaux en même temps. La panne d'une sortie de 4-20 mA est détectée et un contact de désactivation de relais est ouvert [1].

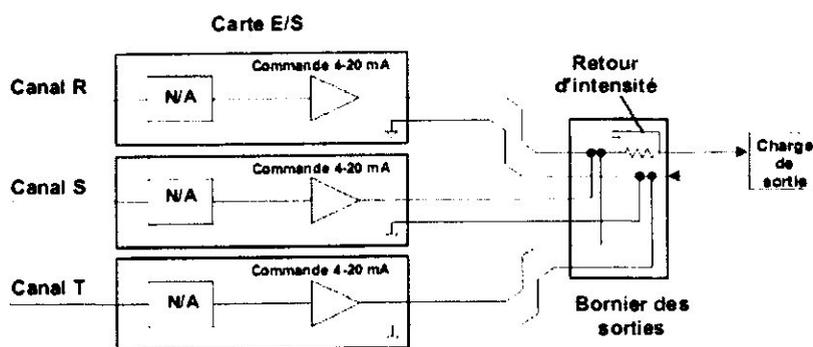


Figure 2.9 : Circuits TMR pour les sorties sélectionnées de 0-20 mA

2.1.7.1 Vote

La sélection dans le contrôleur Mark VIe est divisée en sélection analogique et en sélection logique. En outre, les mécanismes de détection de panne sélectionnent directement les entrées en propriété et les états désignés [1].

a) Sélection de valeur médiane analogique

Les signaux analogiques sont convertis dans un format de virgule flottante par le module d'E/S. L'opération de sélection se produit dans chacun des trois modules contrôleurs (R, S et T). Chaque contrôleur reçoit une copie des données des deux autres canaux. Pour chaque point de données sélectionnées, le contrôleur dispose de trois valeurs, y compris la sienne. Le sélectionneur de valeur médiane sélectionne la valeur du milieu des trois comme

sortie du sélectionneur. Parmi les trois valeurs, c'est la valeur la plus susceptible d'être la plus proche de la vraie valeur (voir figure 2.10) [1].

Sensor Inputs	Valeur d'entrée du capteur	Valeur sélectionnée e médiane	Valeur d'entrée du capteur	Valeur sélectionnée e médiane	Valeur d'entrée du capteur	Valeur sélectionnée e médiane
Capteur 1	981		910		1020	
Capteur 2	985	981	985	978	985	985
Capteur 3	978		978		978	
Déviaton TMR configurée = 30	Aucun diagnostic TMR		Diagnostic TMR sur entrée 1		Diagnostic TMR sur entrée 1	

Figure 2.10: Exemples de sélection de valeur médiane avec entrées normales et incorrectes

b) Sélectionneur de logique de deux sur trois

Chacun des contrôleurs a trois copies des données pour le sélectionneur logique. La sélection est un processus logique simple, entrant les trois valeurs et trouvant les deux valeurs qui conviennent. [1]

2.1.9. Module analogique central (PCAA)

Le module analogique central (PCAA) et le bornier analogique central (TCAT) en option fournissent une large portion des E/S du signal analogique requis pour faire fonctionner une turbine à gaz (voir figure 2.11). Le PCAA et la TCAT fournissent des entrées de thermocouple, des E/S de boucle de courant de 4-20 mA, une excitation et des entrées de transformateur différentiel à variation linéaire (LVDT), des entrées de fréquence d'impulsions et des sorties de bobine de servo. Le PCAA peut être utilisé dans des systèmes en mode unidirectionnel ou à triple redondance modulaire. Une seule plaque à bornes TCAT peut distribuer des entrées de signal sur un ou trois des modules PCAA connectés.

Le PCAA dispose d'une carte processeur, de deux cartes d'E/S d'application et d'une plaque à bornes. [1]

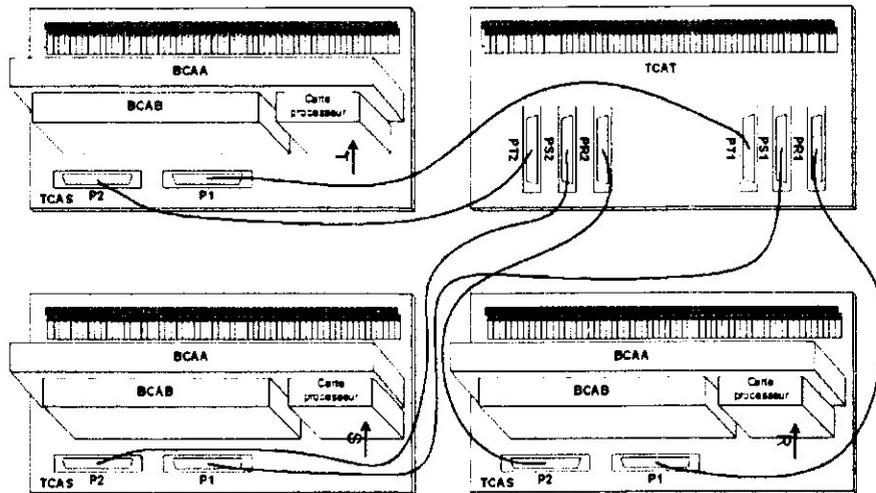


Figure 2.12.b : Schéma de connexion PCAA-TCAT - TMR (capot du PCAA retiré pour dévoiler les relations de la carte)

2.1.9.2. Conception du module

Le module PCAA est constitué de quatre cartes de circuit imprimé distinctes au sein d'un seul et même ensemble physique. Le module est considéré comme unité la moins remplaçable à cause de la difficulté à isoler les pannes sur une seule carte (voir figure 2.13). Ce module n'est pas conçu pour le remplacement de cartes individuelles [1].

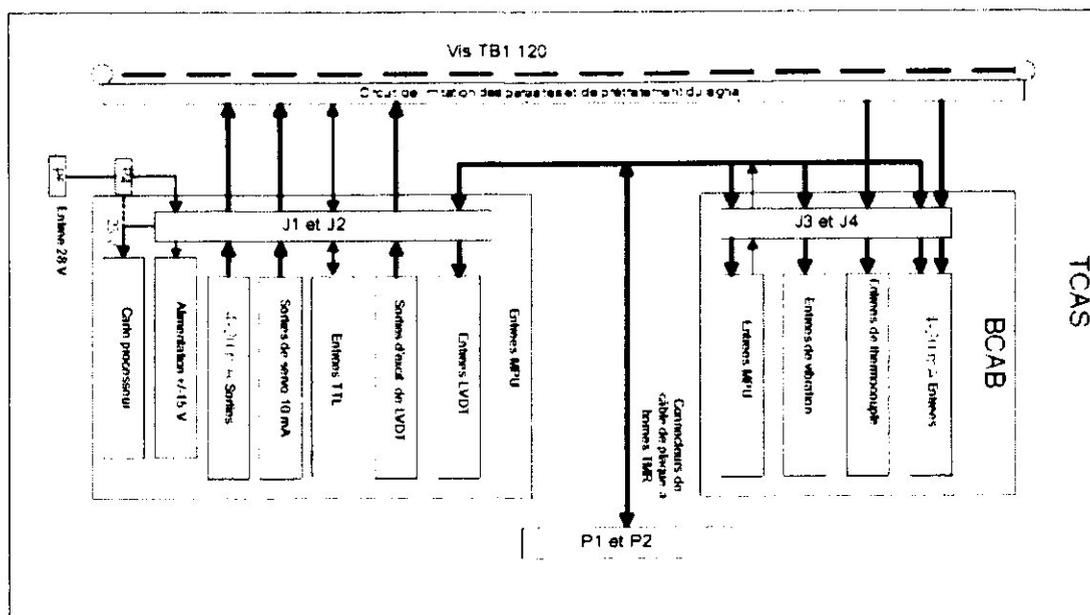


Figure 2.13 : Schéma des relations entre les différentes cartes du PCAA

2.1.9.3. Plaque à bornes TCAS

La plaque à bornes IS200TCAS procure les bornes pour le client et assure l'acheminement du signal dans les cartes BCAA et BCAB. La TCAS prend en charge par son connecteur P5 l'alimentation de contrôle 28 V du réseau électrique. Elle transmet ensuite l'alimentation vis le connecteur P4 à une carte JGPA au niveau de la terminaison de blindage du câble d'entrée. La carte TCAS présente les connecteurs 68 broches P1 et P2 pour le branchement des câbles de la plaque à bornes IS200TCAT. À l'intérieur du module, la plaque à bornes TCAS achemine les signaux vers les connecteurs des cartes de traitement analogique BCAA et BCAB [1].

2.1.9.4. Entrées en 4-20 mA

Le module PCAA respecte la spécification de $\pm 0,25\%$ et $\pm 0,5\%$ de la plage complète des températures de fonctionnement, respectivement pour les entrées en 4-20 mA et les entrées en tension. La précision moyenne type de l'entrée de courant mesurée à 25 °C est de $\pm 0,05\%$ avec un écart type de 0,016 %. La première source de dérivation de la température pour les entrées analogiques est une référence d'étalonnage de la précision évaluée à 0,0008 %/°C dans le cas le plus défavorable.

Toutes les entrées disposent d'un cavalier permettant de sélectionner entre mesure de courant de tension mise à la masse et courant de tension flottante. Lorsque le cavalier Open/GND est en position Open (Ouvert), l'entrée tolère un maximum de 7 volts en mode commun par rapport à la masse du PCAA. Il est possible d'indiquer en tant que groupe un niveau haut et bas d'intensité pour une entrée valide. Chacune des entrées peut alors être configurée individuellement pour produire une erreur de diagnostic lorsque le courant dépasse les limites spécifiées [1].

2.1.9.5. Sorties 4-20 mA

La précision moyenne type mesurée à 25 °C est de $\pm 0,1\%$ avec un écart type de 0,11 %. Les deux sorties du PCAA se comportent comme les sorties analogiques unidirectionnelles habituelles. Les trois sorties de la TCAT, lorsqu'elles sont commandées par un triple module PCAA, offrent une tolérance intégrale aux pannes. Une défaillance de sortie sur l'un des trois modules PCAA entraîne une très courte perturbation sur la sortie, avec récupération complète de la valeur issue de la commande. L'ensemble des cinq sorties analogiques présente une fonction de collationnement indépendant du courant de sortie et un relais de sortie. Si un dysfonctionnement est repéré sur la sortie, le relais est automatiquement

ouvert afin de protéger les appareils connectés d'une surcharge du courant de sortie. Toutes les sorties analogiques peuvent supporter plus de 18 V sur les sorties vers les appareils raccordés [1].

2.1.9.6. Transformateur différentiel à variation linéaire

Chacune des six sorties d'excitation produit un signal de $7 V_{\text{eff}}$. D'onde sinusoïdale à 3,2 kHz et peut prendre en charge un courant de 60 mA. L'échantillonnage des signaux d'entrée est effectué à 100 Hz. Au niveau des entrées du transformateur différentiel à variation linéaire, le module PCAA est conforme à une précision de $\pm 1\%$ de la plage complète des températures de fonctionnement et d'impédances de charge. La précision moyenne type mesurée à 25 °C est de $\pm 0,07\%$ avec un écart type de 0,05 % [1].

2.1.9.7. Sorties de servocommande

Les caractéristiques des sorties de servocommande du module PCAA sont les suivantes :

- Six circuits de sortie pouvant supporter une intensité de pleine échelle de 10 mA.
- Des régulateurs tournant à 100 Hz.
- Une précision de sorties de servocommande de $\pm 3,5\%$
- Deux des six sorties peuvent être liées à un signal de sortie d'une carte PPRO ou PTUR, qui désactive les circuits de sortie et polarise les sorties fermées en cas de déclenchement.

La plage d'intensité de sortie est fixée à 10 mA. Le module PCAA respecte une précision de sortie de servocommande de $\pm 3,5\%$ à pleine échelle de la plage complète des températures de fonctionnement et impédances de charge. La précision moyenne type mesurée à 25 °C est de $\pm 0,05\%$ avec un écart type de 0,07 % [1].

2.2. Aspect logiciel

2.2.1 Suite logicielle ControlST

La suite logicielle ControlST est utilisée sur une vaste gamme d'applications GE de centrales électriques, y compris les centrales thermiques, éoliennes, hydrauliques, nucléaire, de gazéification et autres [1].

2.2.2 Interface Homme-Machine (IHM)

L'IHM est une station opérateur fonctionnant sous Windows® et une station de travail d'ingénierie destinée aux systèmes des centrales, alternateurs et turbines GE Energy. La suite logicielle ControlST comprend différents outils hautes performances offrant aux opérateurs et au personnel de maintenance. Ces outils comprennent l'IHM WorkstationST* et le logiciel de gestion Historian, le logiciel de configuration et de diagnostic ToolboxST*, les outils graphiques CIMPLICITY* ainsi que d'autres progiciels de communication, de surveillance et de gestion du parc.

L'IHM peut être utilisée comme une station opérateur autonome, comme station de travail d'ingénierie ou les deux. D'un point de vue physique, elle est disponible comme ordinateur de type commercial ou industriel. Elle communique sur un réseau de contrôle Ethernet et sur un réseau de données Ethernet séparé pour le transfert de fichiers et les communications vers des systèmes de contrôle de centrale et de surveillance non-GE. [1]

2.2.3. IHM pour système de contrôle-commande de turbine guide de l'opérateur « SPEEDTRONIC »**2.2.3.1 Présentation générale de l'IHM**

L'Interface Homme-Machine (IHM) pour système de contrôle-commande de turbine SPEEDTRONIC C'est une interface opérateur permettant de contrôler en temps réel les équipements et processus des centrales électriques. Elle fonctionne sur une station de travail PC utilisant une architecture client/serveur. L'IHM comporte des écrans opérateur et permet de commander les contrôleurs de turbine Mark IV, Mark V, Mark V LM, Mark VI et Mark VIe.

L'IHM peut être configurée pour fonctionner avec de nombreux dispositifs système, et intégrer ainsi l'exploitation de la centrale à un niveau unique. Les opérateurs et les techniciens de la centrale peuvent visualiser et contrôler les équipements du central via une interface commune.

Le fonctionnement de l'IHM repose sur l'utilisation de progiciels divers et variés, parmi lesquels CIMPLICITY HMI, le principal outil utilisé pour l'interface opérateur.

Un opérateur peut utiliser l'IHM pour les fonctions de contrôle-commande de turbine suivantes :

- Surveiller une ou plusieurs turbines via des écrans graphiques (par exemple : alarmes, températures d'espace inter-roues et niveaux de vibration).

- Émettre des commandes vers la turbine ou le dispositif entraîné sélectionné. [1]

2.2.3.2 Fonctionnalités du IHM

IHM contient plusieurs fonctionnalités importantes pour le contrôle de la centrale [1] :

- Graphiques dynamiques
- Écrans d’alarmes
- Analyse des tendances des variables procédés
- Sécurité d’accès à l’IHM.

Ci-dessous quelques prises d’écran du SPEEDTRONIC:

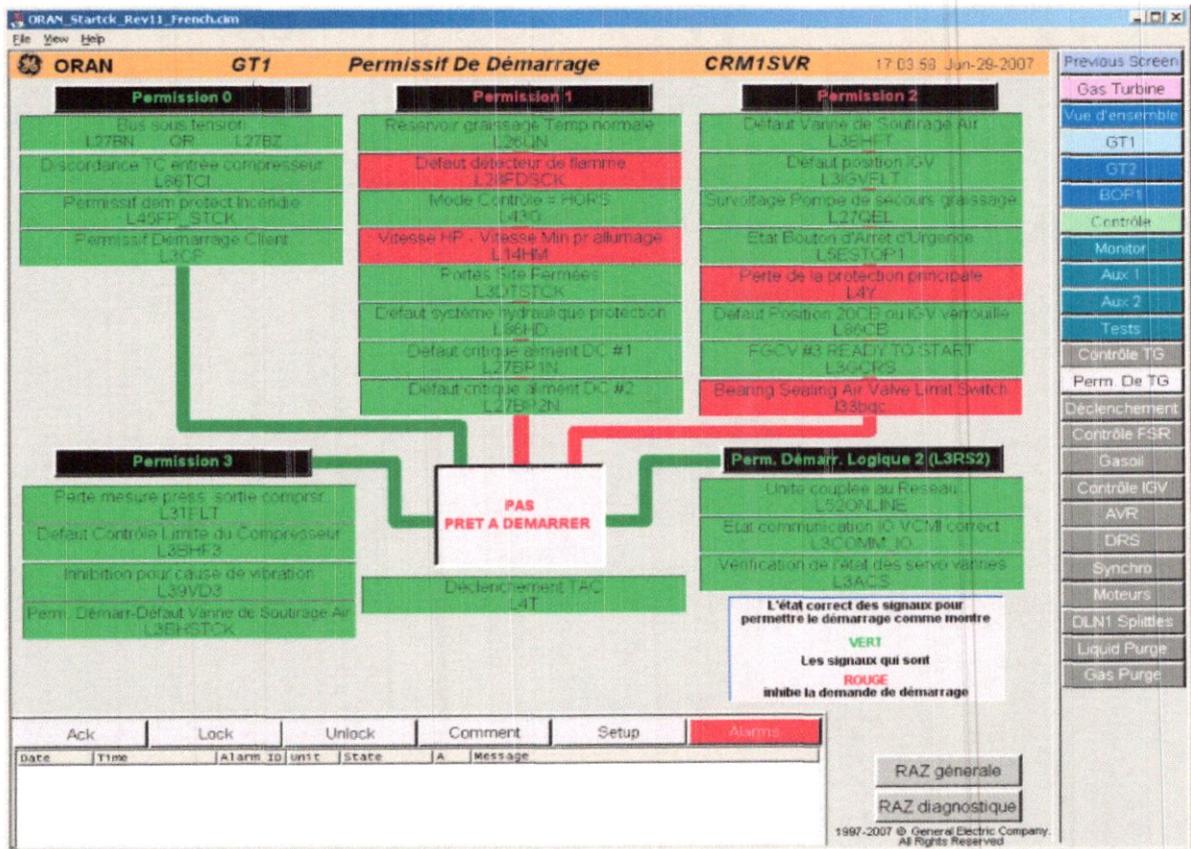


Figure 2.14.a : écran de permissif de démarrage

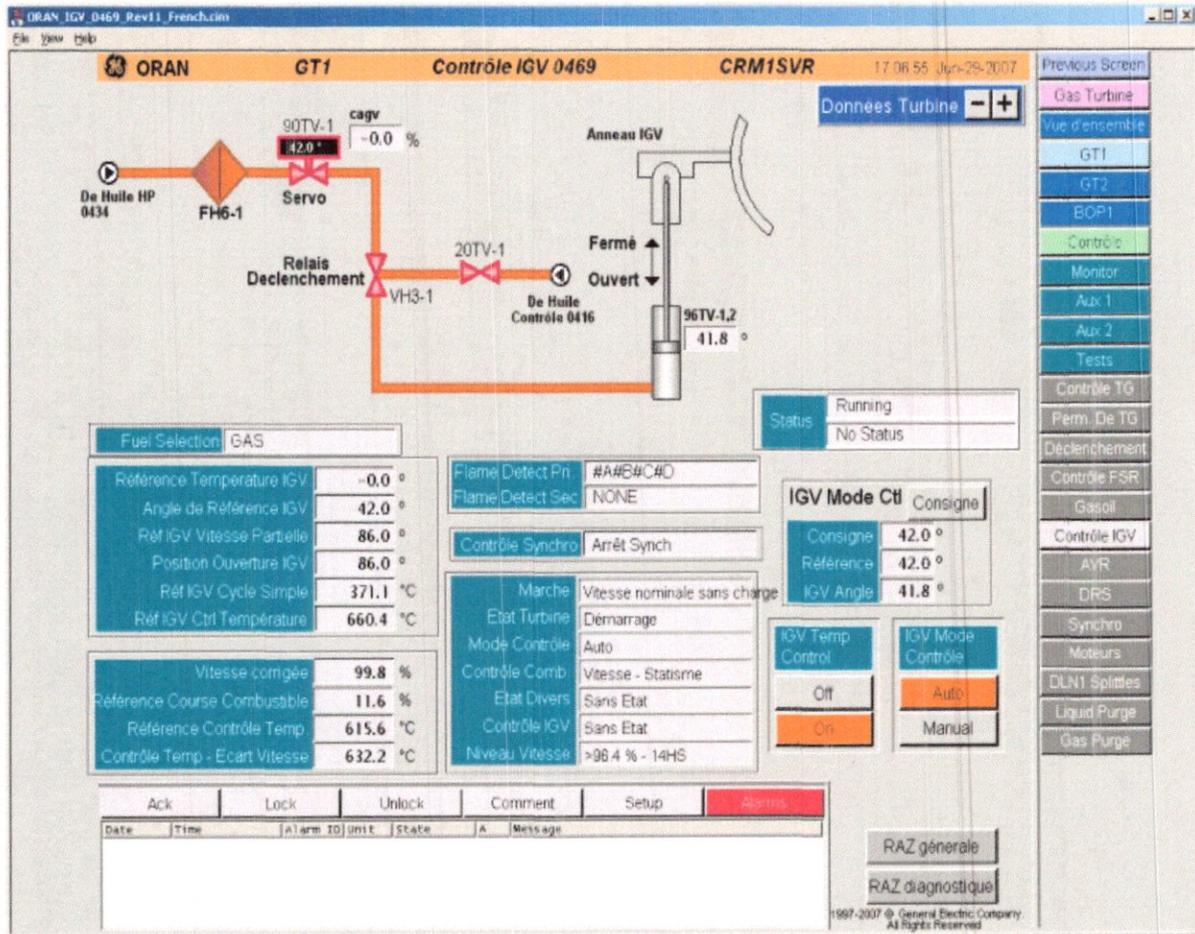


Figure 2.14.b : écran de contrôle IGV

ORAN_Trips_Rev10_French.kim

File View Help

ORAN GT1 Diagram De Déclenchement CRM1SVR 17.04.17 Jun-29-2007

Protection 1	Protection 2	Protection 3	Déclenchement après allumage
Pression Haute Tube de graissage L834TK	Vitesse importante L39VT	Fuite mesure vitesse (RST) L12H	Perte Batterie L39FD
Déclenchement Protection incendie L35FP TRP	Décl. combust. écoulement de démarrage L35FT	Defaut signal vitesse (PS) L12HD_P	Dépression avant Temp. échappement L35PT
Déclench. protection alternateur L89GT	Fuite mesure vitesse (PS) L12H_FLT	Defaut signal vitesse (RST) L12HD_V	Température échappement trop haute L851T
Déclenchement Bouton Arrêt d'urgence L4620TT_P82	Déclenchement d'arrêt L4CT	Non poursuite de la référence OCV L865CVT	Defaut Traitement du échappement L87TD
Def. Press. Haute Caisson d'admission L832HH	Déclenchement Protection Haute P2 L35FPQHT	Defaut Purge Combustible L54PGT	Defaut position vanne DDC-E L36COT
Def. Defaut Poursuite Vanne DRV L36P9RFLT	Déclenchement Protection Basse P2 L35FPQLT	Suritesse (CEA) <P> L12H_B	Temp Haute de Graissage L36GT
Signal Defaut Pompe AL L406TRP		Accélération excessive L12H_ACC	Déclenchement Compresseur L12H
		Etat Surveillance detection Gaz L45HD_TRP	Signal Auxiliaire Vers L14HS L14P88
			Defaut Limites S1 Compresseur L36R8R
Protection 4	Déclenchement Avant Allumage	Protection principale	
Defaut système de contrôle L35FLT	Def. pression P2 haute avant allumage L35FP22H	Etat Protection L49ST	Defaut Pression Sortie Compresseur L37FT
Déclenchement VPRO L54MST_TRP	Biche Arrêt Test Tube Gaz L549LTD	Déclenchement avant allumage L49RET	Système Piv Low Max L40LNT
Signal Déclenchement manuel d'urgence L5E	Biche Démarrage Test Tube Gaz L549LTDV	Déclenchement après allumage L49ST	Defaut Traitement démarrage L47FL_T
Def. Fil Filtre séparateur Gaz L71CS4BT	Permissif Client L49	Déclenchement manuel de lancement L35SMT	
Temp basse gaz en marche L37VALZ	Gaz defects dans encense avant allumage L454D_P82T	Defaut du contrôle IGV L46GT	
Defaut contrôle comb liquide L33FLT	Tribo Service L36CS	Defaut Mesure Temp Haute Graissage L41TH_T	
Pression basse combustible liquide L83FL4T	Pompe DC huile de graissage - Fonction Faible G99	Fuite Combustible Lq dans Caud Field L71FF2T	
	Defaut Pompe à Huile de Services L596C	Fuite Combustible Lq dans Comp TG L71FF1T	

Déclenchement en ROUGE.
Certains signaux ne sont pas mémorisés. Utilisez la fonction Trip Logger pour déterminer la chaîne d'événements.

Ack	Lock	Unlock	Comment	Setup	ALARMS
Date	Time	Alarm ID	Unit	State	A Message

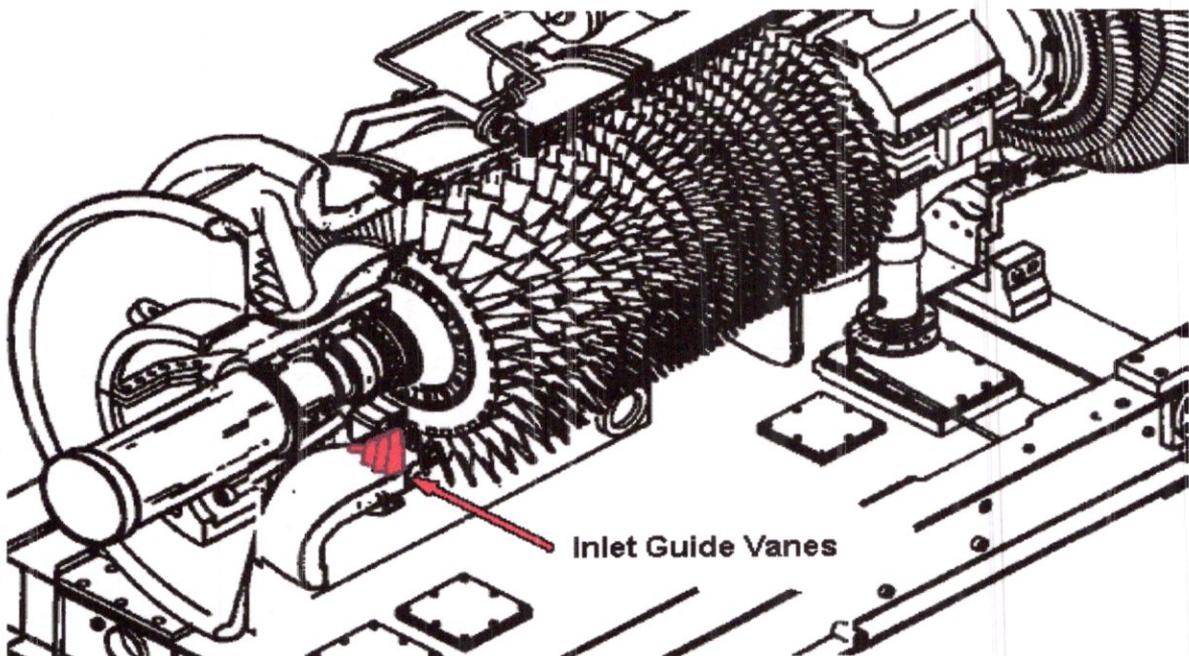
RAZ générale

RAZ diagnostique

1997-2007 © General Electric Company. All Rights Reserved

Figure 2.14.c : écran de permissif de démarrage

Chapitre 03
Aubes directrices variables d'entrée
compresseur
(VIGV)
Variable Inlet guide vanes



3.1. Introduction

Les aubes directrices d'entrée du compresseur variables (VIGV) (Variable Inlet Guide Vane) sont installées sur la turbine pour fournir une protection anti-pompage au compresseur pendant le démarrage et l'arrêt, mais elles sont également utilisées pendant le fonctionnement dans des conditions de charge partielle.

Le mécanisme de commande des aubes directrices d'entrée variables est un ensemble commandé de manière hydraulique, qui a une boucle de contrôle rétroactif fermé pour contrôler l'angle des aubes directrices. Les aubes sont positionnées automatiquement dans leur gamme de fonctionnement en réponse aux limites de température d'échappement du système de contrôle pour une charge de fonctionnement normale, ou aux limites de protection anti-pompage du système de contrôle pendant les séquences de démarrage et d'arrêt. Sur les unités DLN, l'angle IGV est modulé pour contrôler le flux d'air vers les chambres de combustion pour les modes de fonctionnement DLN.

3.2. Commande des aubes directrices

Le système de commande des aubes directrices d'entrée modulées comprennent les éléments suivants : la servovanne 90TV, les capteurs de position (LVDT) 96TV-1 et 96TV-2, et la vanne de décharge/ vidange hydraulique VH3. Ils sont montrés sur le diagramme schématique de l'huile de déclenchement et d'IGV (voir figure 3.1).

Quand la vanne solénoïde 20TV de décharge de l'aube directrice d'entrée est mise sous tension dans le circuit d'huile de déclenchement, ses prises de drainage sont bloquées, ce qui permet à l'huile de déclenchement de faire fonctionner la vanne de décharge/ vidange VH3. La fonction solénoïde de disjonction électrique sera utilisée en cas d'absence de système d'huile de déclenchement.

L'actionnement de la vanne de décharge permet au fluide hydraulique de couler à travers la servovanne 90TV. Le contrôle de 90TV va transporter le fluide hydraulique à travers la vanne de décharge pour activer le mécanisme de commande de l'aube directrice d'entrée variable.

Pendant un arrêt normal, la commande de l'aube directrice d'entrée est l'inverse de la séquence de démarrage. Les vannes de purge du compresseur vont s'ouvrir quand le disjoncteur du générateur est ouvert. Les aubes directrices d'entrée vont progressivement se fermer totalement en fonction de la température corrigée par la vitesse.

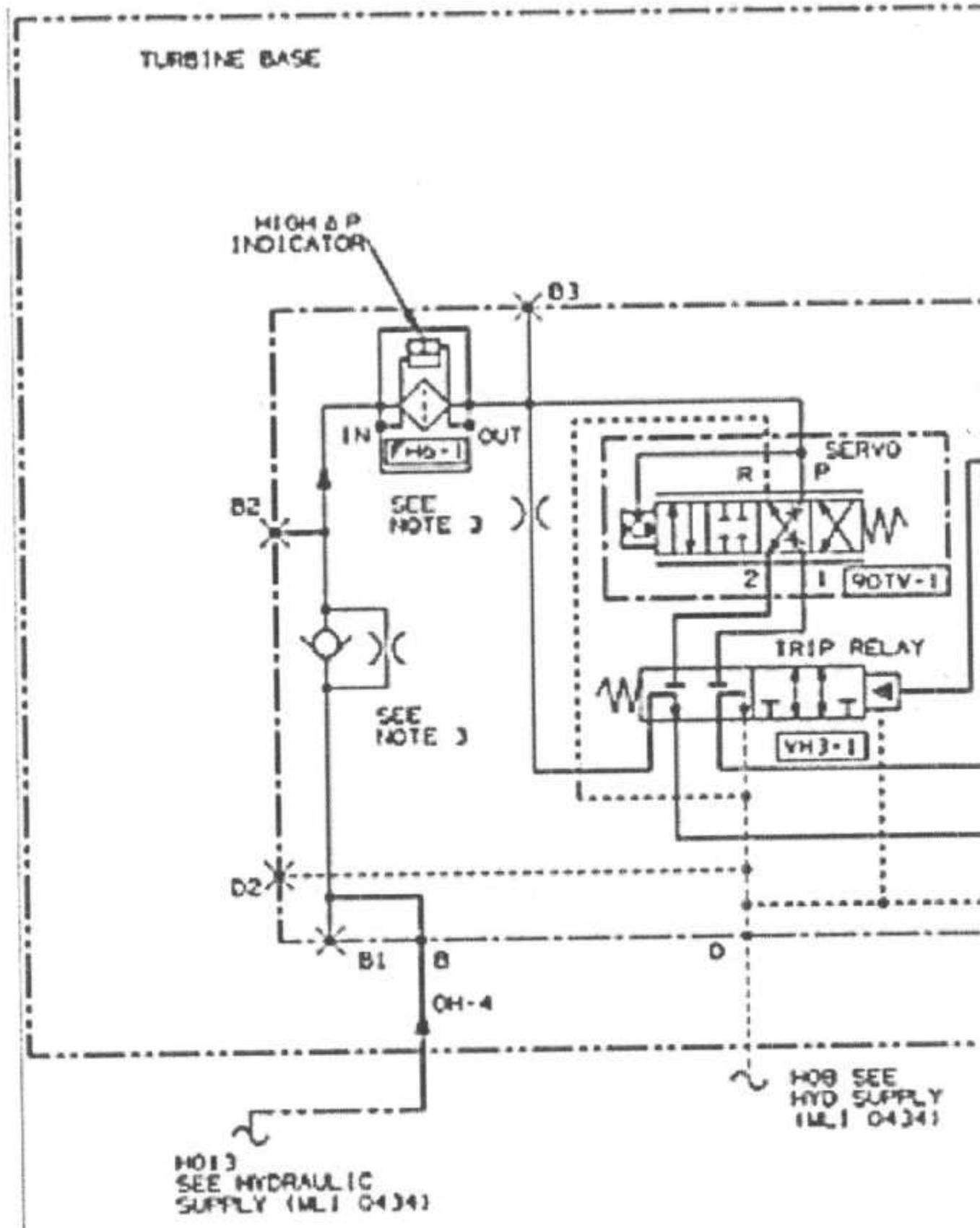
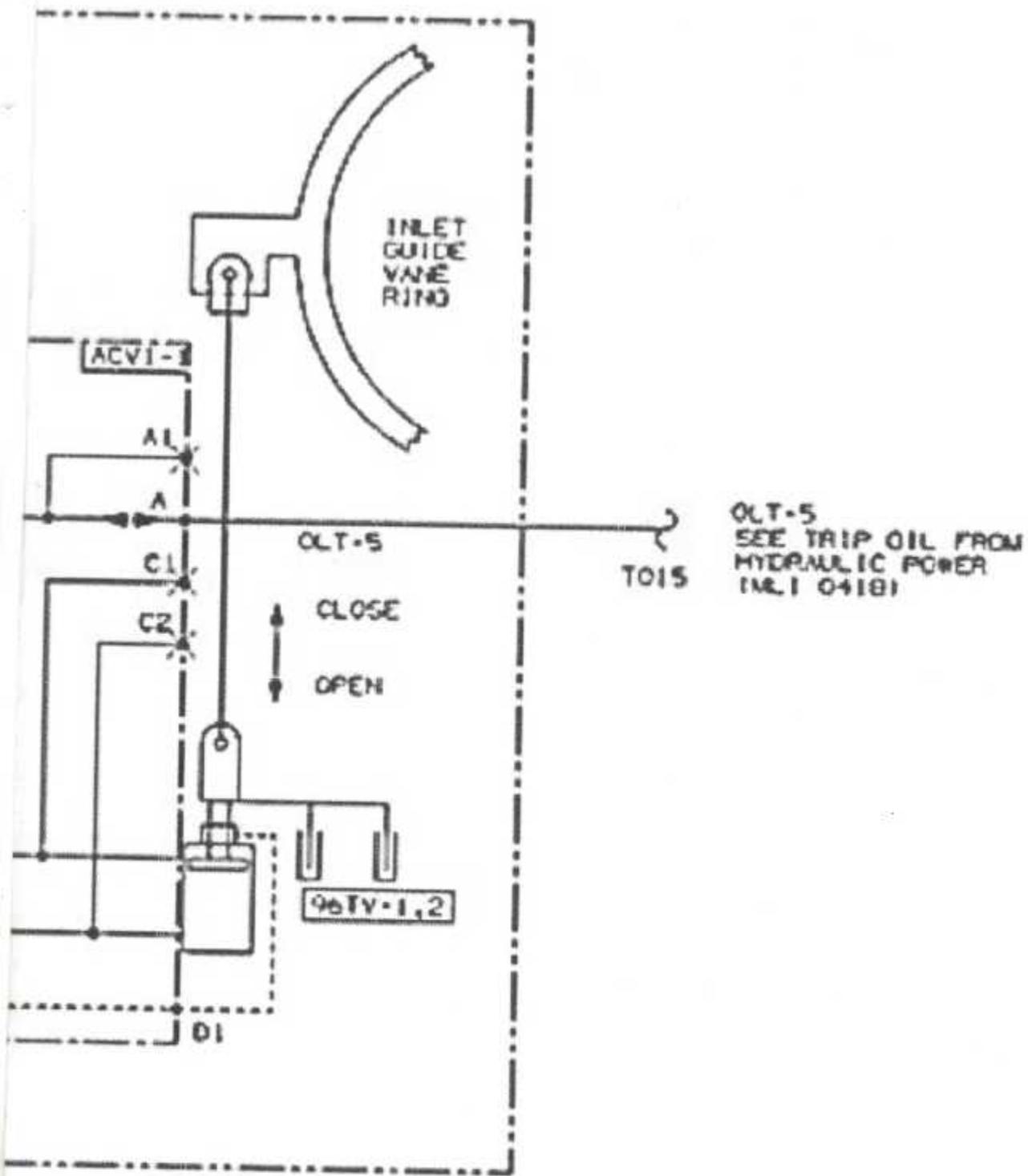


Figure 3.1 : diagramme schématique



de l'huile de déclenchement et d'IGV

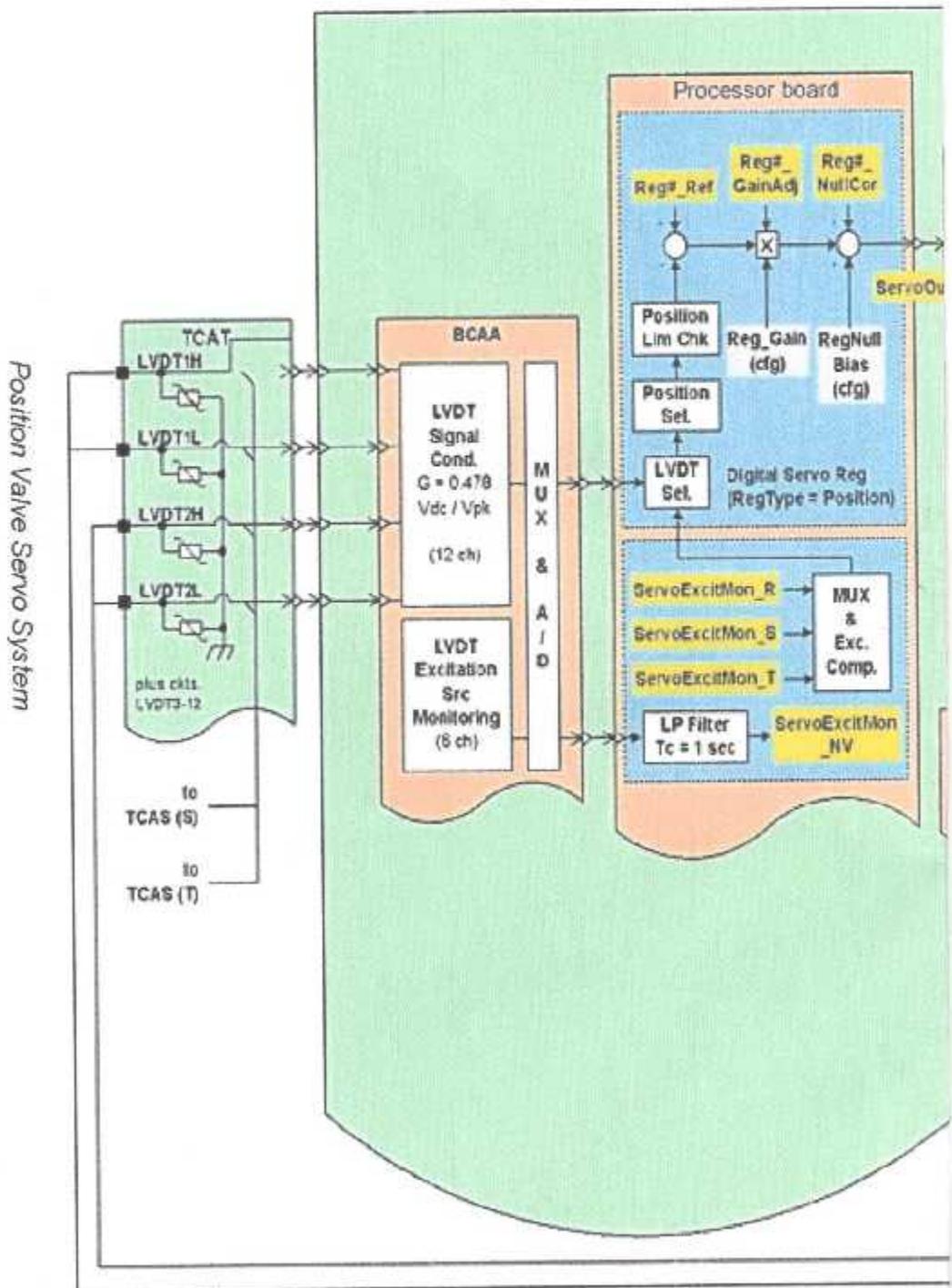


Figure 4.12 : Système d'asservi

numérique la tension RMS issue du circuit secondaire du LVDT en signal d'équivalent courant continu lu par le processeur.

Le micrologiciel PCAA peut faire fonctionner jusqu'à six régulateurs de servo numérique indépendants. Chaque boucle est réalisée à un taux d'échantillonnage de 100 Hz. La sortie du régulateur numérique, ServoCurrentRef, est écrite dans le convertisseur numérique-analogique. La sortie inversée du convertisseur N-A est la commande de courant du régulateur de courant analogique.

La carte d'acquisition BCAA dispose de six régulateurs de courant analogique, un par régulateur de servo numérique. L'ensemble des six régulateurs de courant analogique sont conçus pour une intensité nominale de 10 mA uniquement. Chaque sortie de courant offre un relais de protection à isolement interne commandé par le micrologiciel PCAA. Chacune des six sorties de la servocommande prend en charge les servocommandes à trois bobines ou à deux bobines et chacune présente un cavalier sur la plaque à bornes TCAS pour la configuration de la sortie.

Le cavalier est mis en position TMR pour les sorties de servocommande à trois bobines et dans la position opposée pour les sorties de servocommande à 2 bobines. Par exemple, pour une servocommande à 3-bobines utilisant la sortie de servocommande 1 :

- les sorties TCAS SVO1H_R/SVO1L_R sont connectées à la bobine 1, le cavalier R JP15 de la plaque à bornes TCAS est mis sur la position 1-2_TMR
- les sorties TCAS SVO1H_S/SVO1L_S sont connectées à la bobine 2, le cavalier TCAS-S JP15 est mis sur la position 1-2_TMR
- les sorties TCAS SVO1H_T/SVO1L_T sont connectées à la bobine 3, le cavalier TCAS-T JP15 est mis sur la position 1-2_TMR

Pour la connexion unidirectionnelle de servocommande à 2-bobines, les sorties TCAS SVO1H_R/SVO1L_R sont connectées à la bobine 1 et les sorties SVO1X_R/SVO1L_R sont connectées à la bobine 2. Le cavalier TCAS-R JP15 est mis sur la position 2-3_Simplex [1].

4.6. Commande FLOUE

4.6.1. Définitions

4.6.1.1. Les sous-ensembles flous

La logique floue repose sur la théorie des sous-ensembles flous, qui sont une généralisation de la théorie des ensembles classiques. Par abus de langage, suivant les us de la littérature, nous utiliserons indifféremment les termes sous-ensembles flous et ensembles flous. Les ensembles classiques sont également appelés ensemble nets, par opposition à flou, et de même la logique classique est également appelée logique booléenne ou binaire [14].

4.6.1.2. Fonction caractéristique

Soit X un ensemble. Un sous-ensemble flou A de X est caractérisé par une fonction d'appartenance, dont la valeur varie entre 0 et 1.

$$f^a : X \rightarrow [0,1] \quad (4.17)$$

Note : cette fonction d'appartenance est l'équivalente à la fonction caractéristique d'un ensemble classique.

La forme de la fonction d'appartenance est choisie arbitrairement en suivant les conseils de l'expert ou en faisant des études statistique : forme sigmoïde, tangente, hyperbolique, exponentielle, gaussienne ou de toute autre nature sont utilisables voir la figure 4.13 qui représente un exemple de la forme de la fonction caractéristique [14 ;18 ; 19 ; 20].

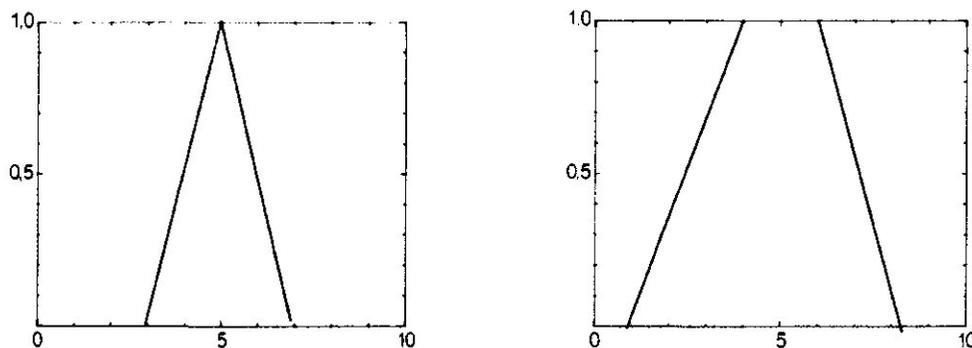


Figure 4.13 : fonctions d'appartenances triangulaire et trapézoïdale

Pourtant on choisit souvent des fonctions triangulaires ou trapézoïdales afin de simplifier les calculs.

4.6.1.3. Caractéristique de la fonction d'appartenance :

Soit X un ensemble, A un sous-ensemble flou de X et μ_A la fonction d'appartenance le caractérisant (voir figures 4.14 et 4.15)

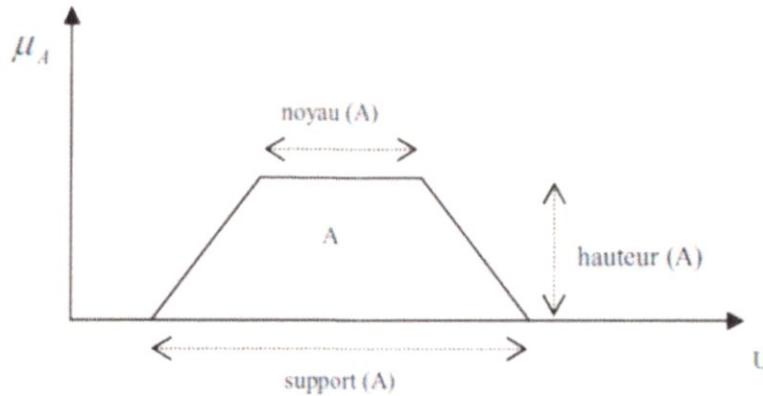


Figure 4.14 : Représentation d'un sous-ensemble flou

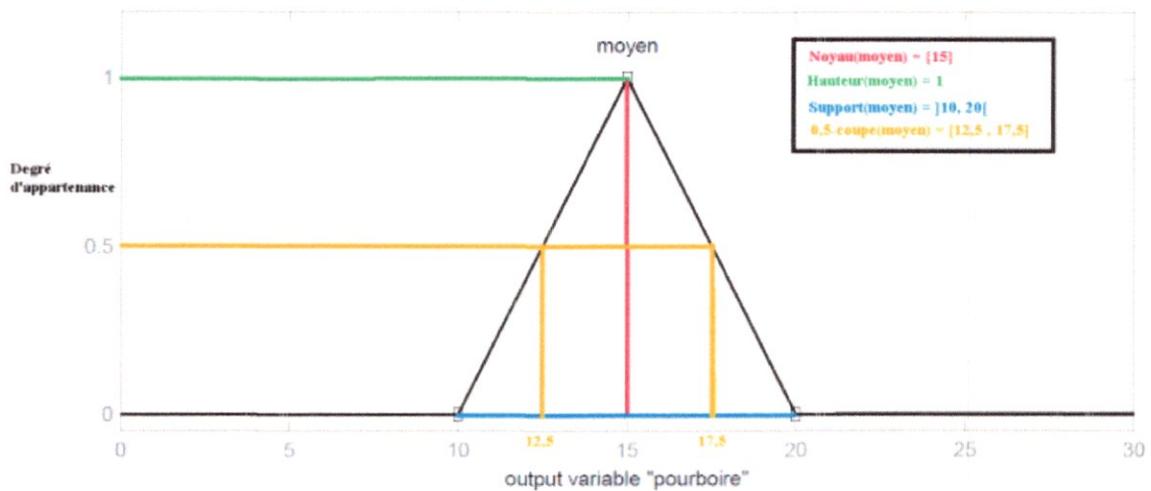


Figure 4.15 : Propriétés d'un ensemble flou

- **la hauteur :**

La hauteur de A, notée $h(A)$, correspond à la borne supérieure de l'ensemble d'arrivée de sa fonction d'appartenance [14]:

$$h(A) = \sup\{\mu_A(x) \mid x \in X\} \tag{4.18}$$

A est dit normaliser si et seulement si $h(A) = 1$

- **le support :**

Le support de A est l'ensemble des éléments de X appartenant au moins un peu à A. Autrement dit, c'est l'ensemble [14]:

$$supp(A) = \{x \in X \mid \mu_A(x) > 0\} \tag{4.19}$$

- le noyau :

Le noyau de A est l'ensemble des éléments de X appartenant totalement à A.

Autrement dit, c'est l'ensemble [14]:

$$noy(A) = \{x \in X \mid \mu_A(x) = 1\} \tag{4.20}$$

Par construction, $noy(A) \subseteq supp(A)$.

- α -coupe

Une α -coupe de A est le sous-ensemble classique des éléments ayant un degré d'appartenance supérieur ou égal à α [14]:

$$\alpha - coupe(A) = \{x \in X \mid \mu_A(x) \geq \alpha\} \tag{4.21}$$

4.6.2. Les variables linguistiques

Le concept de fonction d'appartenance vu précédemment nous permettra de définir des systèmes flous en langage naturel, la fonction d'appartenance faisant le lien entre logique floue et variable linguistique

Soit V une variable (qualité du service, distance, etc.), X la plage de valeurs de la variable ou l'univers de discours et TV un ensemble fini ou infini de sous-ensembles flous [14].

Un exemple sur la variable linguistique correspond au triplet (V, X, TV) est représenté sur la figure ci-dessous.

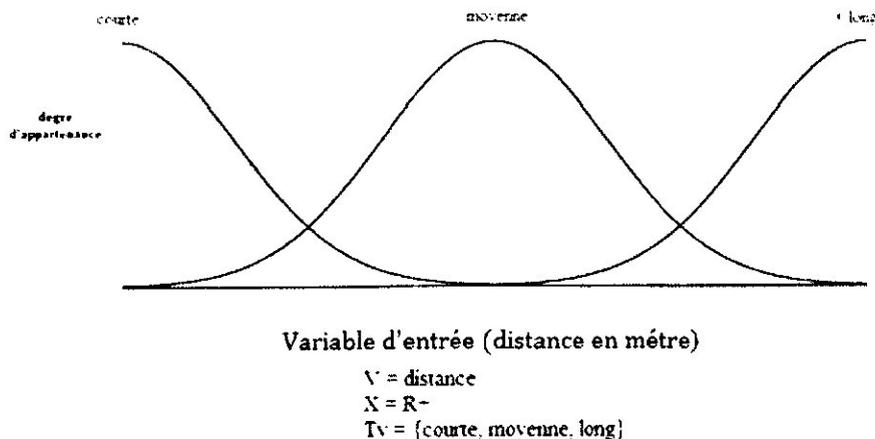


Figure 4.16 : Variable linguistique « distance »

4.6.3. Structure d'un régulateur flou

Un régulateur par logique floue est composé de quatre éléments de base suivants [13] :

- Interface de fuzzification,
- Base de connaissances,
- Moteur d'inférence floue,
- Interface de défuzzification.

Consulter la figure 4.16 qui représente la structure de base d'un régulateur flou

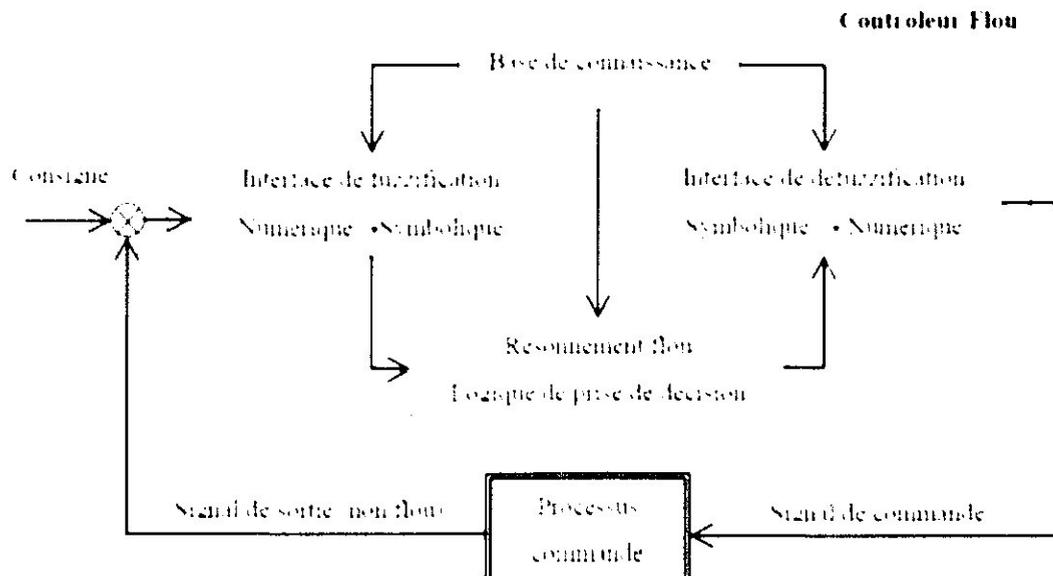


Figure 4.17 : Structure de base d'un régulateur flou (référence)

4.6.3.1. Interface de fuzzification

L'interface de fuzzification Transforme les entrées numériques (vecteurs précises) en ensembles flous. Durant cette phase, les informations issues du système sont tout d'abord normalisées. Ensuite, les données normalisées sont transformées en qualifications linguistiques.

Durant la phase de normalisation, chaque mesure issue du système est modifiée pour fournir une valeur y appartenant à un univers du discours relativement simple. On peut choisir comme univers du discours un intervalle centré sur zéro $[-c, +c]$. Si la mesure initiale x est comprise dans un autre intervalle $[a, b]$, la normalisation est souvent réalisée par l'équation 4.22 :

$$y = \frac{2c}{b-a} \left[x - \frac{a+b}{2} \right] \quad (4.22)$$

Ensuite l'univers du discours est ensuite représenté par une variable linguistique [15].

Il existe deux types de fuzzificateur généralement utilisés à savoir : La fuzzification singleton et la fuzzification non-singleton.

a) Fuzzification singleton

Ainsi si la mesure x_0 est exacte, le sous-ensemble flou A de x doit être représenté par un fait précis. Par conséquent, on utilise comme opérateur de fuzzification la transformation dite de singleton. La fonction d'appartenance du sous ensemble flou A de x est alors définie par :

$$\mu_A(x) \begin{cases} 1 & \text{Si } x = x_0 \\ 0 & \text{Si } x \neq x_0 \end{cases} \quad (4.23)$$

La figure 4.17 montre l'aspect de cette fonction d'appartenance.

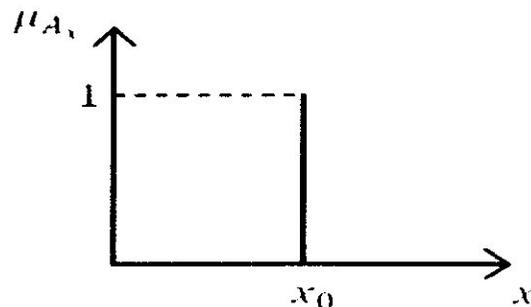


Figure 4.18 : Méthode de fuzzification pour une mesure exacte

b) Fuzzification non singleton

Si la mesure de la variable est incertaine, par exemple à cause du bruit, le sous-ensemble flou A de x doit être représenté par un fait imprécis. On utilise alors la méthode de fuzzification qui associé à la variable de mesure x_0 une fonction d'appartenance telle que, par exemple :

$$\mu_{Ax}(x) = \max \left\{ 0; 1 - \frac{|x - x_0|}{\varepsilon} \right\} \quad (4.24)$$

La représentation graphique de cette fonction est représentée par la figure 4.18. Ce sous-ensemble flou comprend donc la mesure x_0 avec une appartenance unité et les valeurs voisines de x_0 avec une appartenance inversement proportionnelle à l'écart avec x_0 .

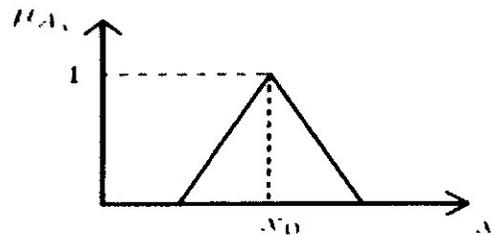


Figure 4.19 : Méthode de fuzzification pour une mesure incertaine

La base du triangle (ϵ) est fonction de l'importance relative des erreurs de mesures. En effet, plus elles sont importantes, plus la mesure de la variable x_0 devient imprécise, et donc, plus le triangle doit s'élargir.

4.6.3.2. Base de connaissances

La conception d'une base de connaissances représente la phase dans la conception des systèmes experts. Elle comprend la base de données et la base des règles floues

- **La base de données**

Contient la définition des ensembles flous, les facteurs d'échelle pour la normalisation des ensembles de référence et la partition de l'espace flou d'entrée et sortie.

- **La base des règles floues**

Elle rassemble l'ensemble des règles floues de type « Si-Alors » décrivant en termes linguistiques basés sur la connaissance d'un expert le comportement dynamique du système.

$$R1 : \text{si } X_1 \text{ est } A_1^1 \text{ et } \dots \dots \text{Et } X_n \text{ est } A_n^1$$

$$\text{Alors : } U_1 \text{ est } B_1$$

Avec :

$[X_1 \dots \dots X_n]$: les entrées du régulateur.

U_1 : la sortie du régulateur.

Chaque régulateur activé donne un sous-ensemble flou de sortie.

4.6.3.3. Moteur d'inférence floue

C'est un mécanisme de décision. Il permet à partir d'un fait observé de la base des règles floues une décision en exploitant le raisonnement approximatif. Dans les inférences de régulateur par logique floue interviennent les opérateurs ET et OU. L'opérateur ET

s'applique aux variables à l'intérieur d'une règle tandis que l'opérateur OU lie les différentes règles.

Il existe plusieurs méthodes pour réaliser ces opérateurs dans une inférence et qui s'appliquent aux fonctions d'appartenance à savoir :

- Méthode d'inférence max-min (Mamdani)

Dans cette méthode l'opérateur ET est réalisé par la fonction « min » :

$$\forall x \in X \quad \mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad 4.25$$

L'opérateur OU est réalisé par la fonction « max » :

$$\forall x \in X \quad \mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad 4.26$$

- Méthode d'inférence max-prod (Larsen)

Dans cette méthode l'opérateur ET est réalisé par la fonction arithmétique « produit » :

$$\forall x \in X \quad \mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x) \quad 4.27$$

L'opérateur OU est réalisé par la fonction « max » :

$$\forall x \in X \quad \mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad 4.28$$

- Méthode d'inférence somme-prod (Sugeno)

Dans cette méthode l'opérateur ET est réalisé par la fonction arithmétique « produit » :

$$\forall x \in X \quad \mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x) \quad 4.29$$

L'opérateur OU est réalisé par la fonction arithmétique « somme » :

$$\forall x \in X \quad \mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x) \quad 4.30$$

4.6.3.4. Défuzzification

Comme nous avons vu dans la section précédente, les méthodes d'inférence fournissent un résultat qui est une fonction d'appartenance. Or, la sortie du contrôleur est en général une grandeur continue, prenant sa valeur dans un intervalle. La défuzzification est l'outil qui permet de transformer la partie floue issue de l'inférence en une grandeur numérique (commande normalisée). Ensuite cette grandeur numérique est passée par l'étape de dénormalisation pour transformer les valeurs de la commande normalisées en valeurs appartenant à leur domaine physique respectif [16].

Plusieurs stratégies de défuzzification existent, les plus utilisées sont [3] :

- méthode du maximum ;
- méthode de la moyenne des maximas ;
- méthode du centre de gravité ;
- méthode de hauteurs pondérées.

4.6.4. Principe du régulateur flou

Un régulateur flou permet de déterminer la commande à appliquer à un processus à partir de la valeur s de la variable de sortie de ce contrôleur ; celle-ci est elle-même déterminée à partir des valeurs des variables d'entrée (e), $d(e)$ du régulateur par des relations floues, ou règles floues.

Théoriquement, le nombre d'entrée n'est pas limité. En pratique, cependant, il n'est pas rationnel d'utiliser plus de trois variables d'entrée puisque la détermination des règles devient trop complexe [13].

4.6.5. Conception d'un régulateur flou de position de la servovanne 90TV/VIGV

Nous allons maintenant illustrer les principes du contrôleur flou sur le système de régulation de la régulation de position de la servovanne. La phase de conception d'un contrôleur flou passe toujours par trois stades que nous allons détailler successivement [17].

a) 1^{ère} étape : choix des entrées sorties

Il s'agit de déterminer les caractéristiques fonctionnelles (1) et opérationnelles (2) du contrôleur.

(1)- Il faut d'abord choisir les variables d'entrée et de sortie. Leur choix dépend du contrôle que l'on veut réaliser. Que souhaite-t-on au juste commander ? A l'aide de quels Paramètres va-t-on obtenir la commande?

(2)- Il faudra ensuite se pencher sur le domaine des valeurs que pourront prendre ces variables). On partitionnera alors ces domaines en intervalles, auxquels on associera un label descriptif (variables linguistique). Cette étape revient à définir les univers des discours des variables d'entrée et de sortie et les diviser en sous-ensembles flous. Cette répartition est intuitive et basée sur l'expérience. On est d'ailleurs généralement amené à l'affiner en cours de conception. Une règle de bonne pratique est de fixer 5 à 9 intervalles par univers de discours. Il faut également prévoir un plus grand nombre de zones à proximité du point de fonctionnement optimal pour en faciliter l'approche régulier

Illustration sur le régulateur de position de la servovanne

Dans notre cas (la régulation de la position de la servovanne) on a besoin habituellement de l'erreur (e) et de la dérivée d'erreur (de) comme variables d'entrées :

La consigne est exprimée en pourcentage donc la valeur maximale que l'erreur peut prendre est 100%, c'est pour ça on a choisi un domaine de valeur de $[-1, 1]$ pour l'erreur.

$$de(k) = e(k) - e(k - 1) \quad (4.31)$$

Concernant le domaine de valeur que pourront prendre la variable d'entrée « variation d'erreur » on a choisi l'intervalle $[-1000, 1000]$.

La sortie de régulateur de la servovanne est la valeur du couple dans le schéma de la commande de la servovanne

$$T = F_{\text{uzzy}}(e, de) \quad (4.32)$$

L'univers de discours de la variable de sortie est $[-1300, 1300]$.

Concernant les variables linguistiques on va utiliser cinq variables linguistiques pour toutes les variables d'entrée de tel manière que :

PG : Positif Grand		NG : Négatif Grand
PP : Positif Petit	ZE : zéro	NP : Négatif Petit

Mais pour la variable de sortie on va utiliser sept variables linguistiques :

PG : Positif Grand		NG : Négatif Grand
PP : Positif Petit	ZE : zéro	NP : Négatif Petit
TNG : Très Négatif Grand		TPG : Très Positif Grand

b) 2^{ème} étape : définition des fonctions d'appartenance

La première étape de conception a permis de cerner au mieux les caractéristiques linguistiques des variables. Il faut maintenant définir complètement les sous-ensembles flous, c'est à dire expliciter leurs fonctions d'appartenance. Une fois encore, l'intuition et l'expérience auront leur rôle à jouer. Quelques principes ressortent de la pratique:

- choix de fonctions triangulaires ou trapézoïdales
- recouvrement d'une fonction de 10 à 50% de l'espace des sous-ensembles voisins

- somme des degrés d'une zone de recouvrement égale à 1 (degré maximal d'appartenance).

Illustration sur notre cas

On constate que les fonctions d'appartenance de l'erreur ont une forme asymétrique créant une concentration autour de zéro qui améliore la précision près du point de fonctionnement désiré.

Pour la même raison, les formes des fonctions d'appartenance de la variable de sortie sont également asymétriques.

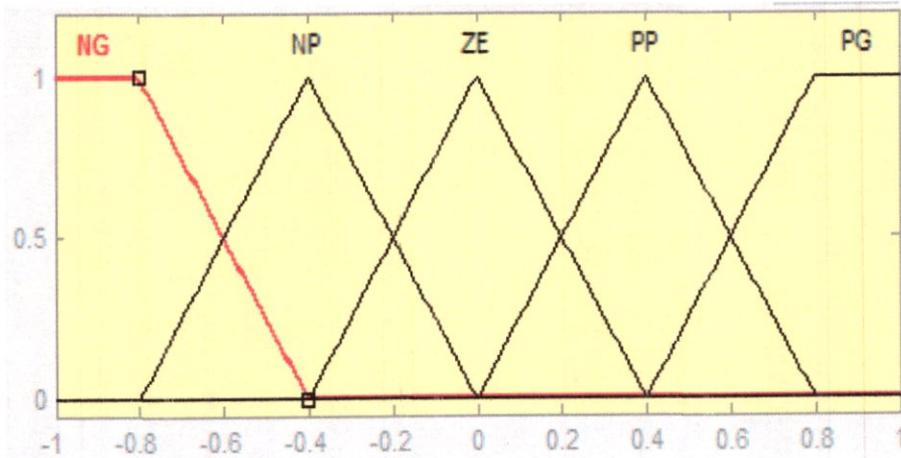


Figure 4.20.a : la fonction d'appartenance et les variables linguistiques d'erreur

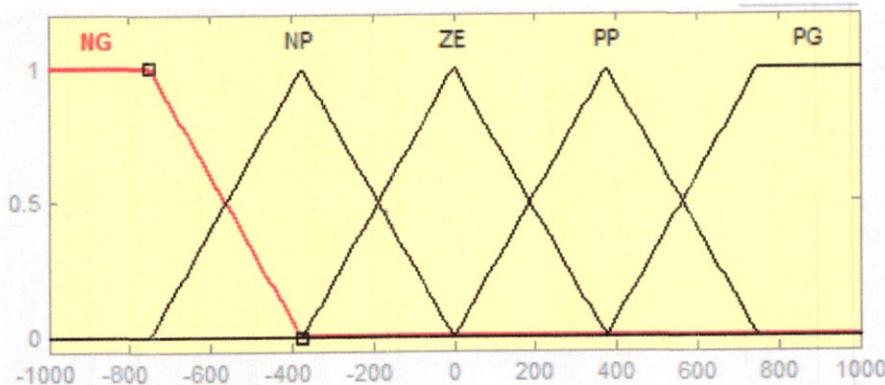


Figure 4.20.b : la fonction d'appartenance et les variables linguistiques variation d'erreur

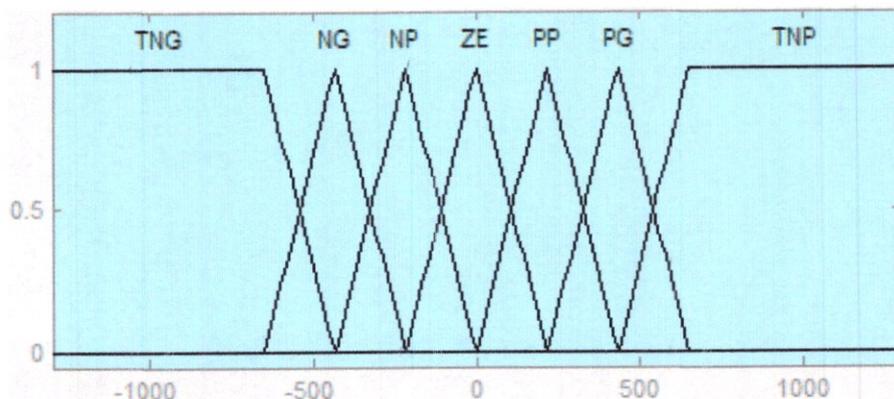


Figure 4.20.c : la fonction d'appartenance et les variables linguistiques de couple

c) 3^{ème} étape : Définition du comportement du contrôleur flou

Cette étape concerne l'élaboration de la base de règle du contrôleur.

Analyse du comportement dynamique - Détermination du jeu de règles

L'analyse temporelle, qui doit conduire à établir les règles du contrôleur flou, peut par exemple consister à considérer la réponse à un échelon d'un processus à piloter en fonction des objectifs que l'on se sera fixés en boucle fermée et à écrire les règles pour chaque type de comportement du processus:

e de	NG	NP	ZE	PP	PG
NG	TNG	TNG	NG	NP	ZE
NP	TNG	NG	NP	ZE	PP
ZE	NG	NP	ZE	PP	PG
PP	NP	ZE	PP	PG	TPG
PG	ZE	PP	PG	TPG	TPG

Tableau 4.2 : La matrice d'inférence

Algorithme :

- Si e est NG et de est NG alors U est TNG
- Ou Si e est NG et de est NP alors U est TNG
- Ou Si e est NG et de est ZE alors U est NG
- Ou Si e est NG et de est PP alors U est NP
- Ou Si e est NG et de est PG alors U est ZE
- Ou Si e est NP et de est NG alors U est TNG
- Ou Si e est NP et de est NP alors U est NG

Ou Si e est NP et de est ZE alors U est NP
Ou Si e est NP et de est PP alors U est ZE
Ou Si e est NP et de est PG alors U est PP
Ou Si e est ZE et de est NG alors U est NG
Ou Si e est ZE et de est NP alors U est NP
Ou Si e est ZE et de est ZE alors U est ZE
Ou Si e est ZE et de est PP alors U est PP
Ou Si e est ZE et de est PG alors U est PG
Ou Si e est PP et de est NG alors U est NP
Ou Si e est PP et de est NP alors U est ZE
Ou Si e est PP et de est ZE alors U est PP
Ou Si e est PP et de est PP alors U est PG
Ou Si e est PP et de est PG alors U est TPG
Ou Si e est PG et de est NG alors U est ZE
Ou Si e est PG et de est NP alors U est PP
Ou Si e est PG et de est ZE alors U est PG
Ou Si e est PG et de est PP alors U est TPG
Ou Si e est PG et de est PG alors U est TPG

Chapitre 05
Simulations et discussions

5.1. Introduction

Dans ce chapitre la simulation du régulateur proportionnel et du régulateur flou est effectuée par Simulink de Matlab version 2014 et sur un ordinateur qui possède un processeur Intel(R) core(TM) i3-2350M CPU @ 2.30 Ghz et un système d'exploitation Windows 8.1 pro

5.2. Simulation avec le régulateur P

La réalisation du schéma du régulateur proportionnel est comme il est représenté dans la figure 3.9 du chapitre précédant dans Simulink donne la figure suivante :

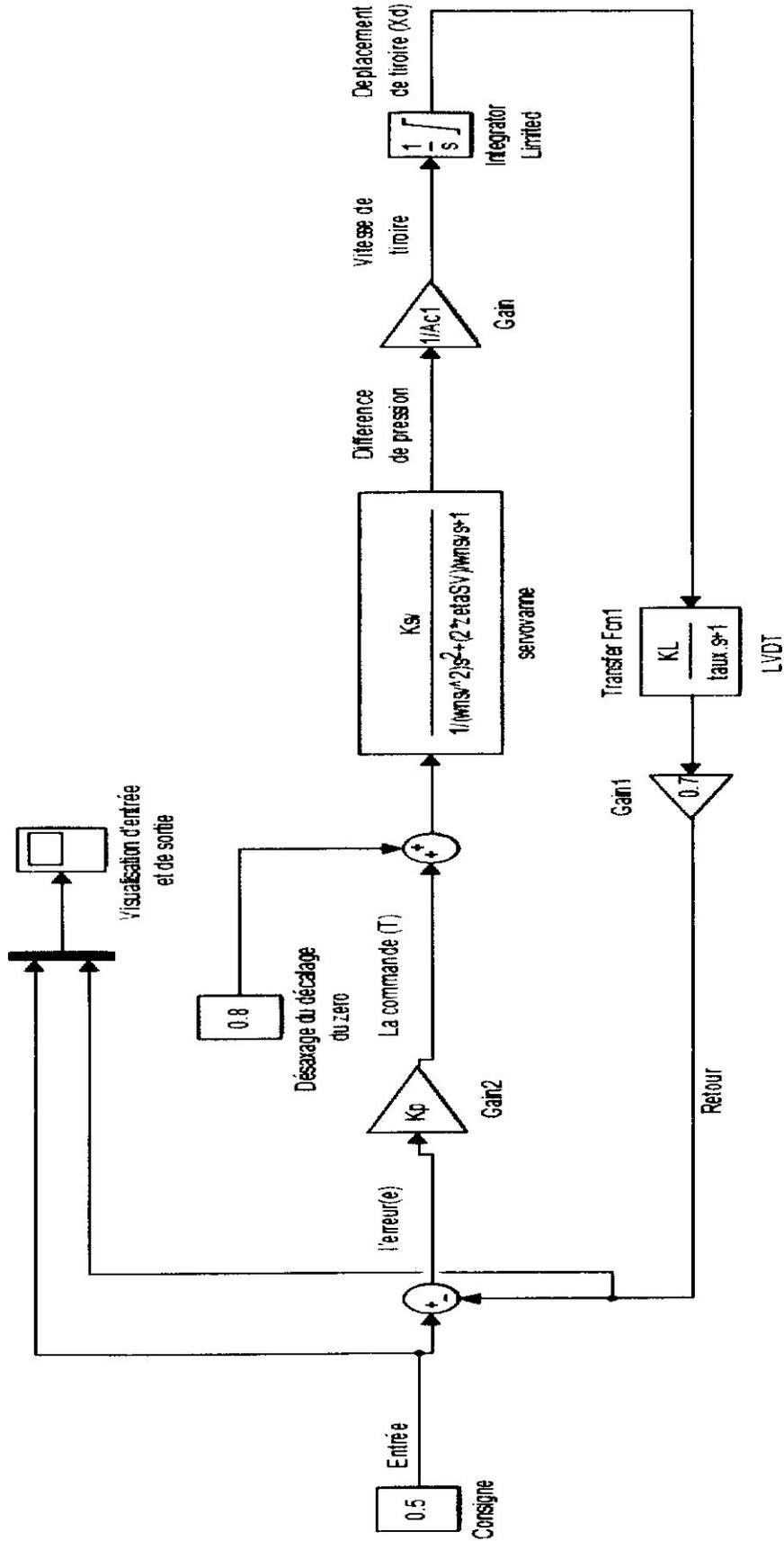


Figure 5.1 : schéma bloc de simulation sur Simulink

En fixant la durée de simulation à une seconde (1 s), On effectue une série de changement de consignes à l'entrée (1, 0.5 et 0) et on simule le comportement du procédé.

5.2.1. Résultat de simulation

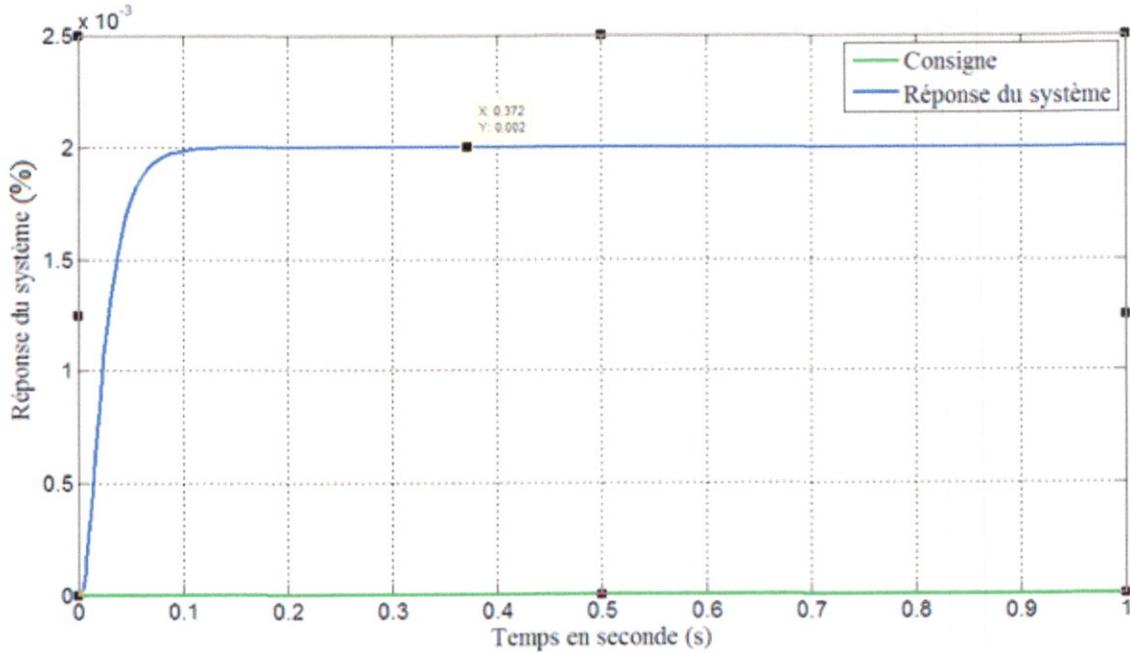


Figure 5.2.a : Réponse de système pour une consigne de 0 (0%)

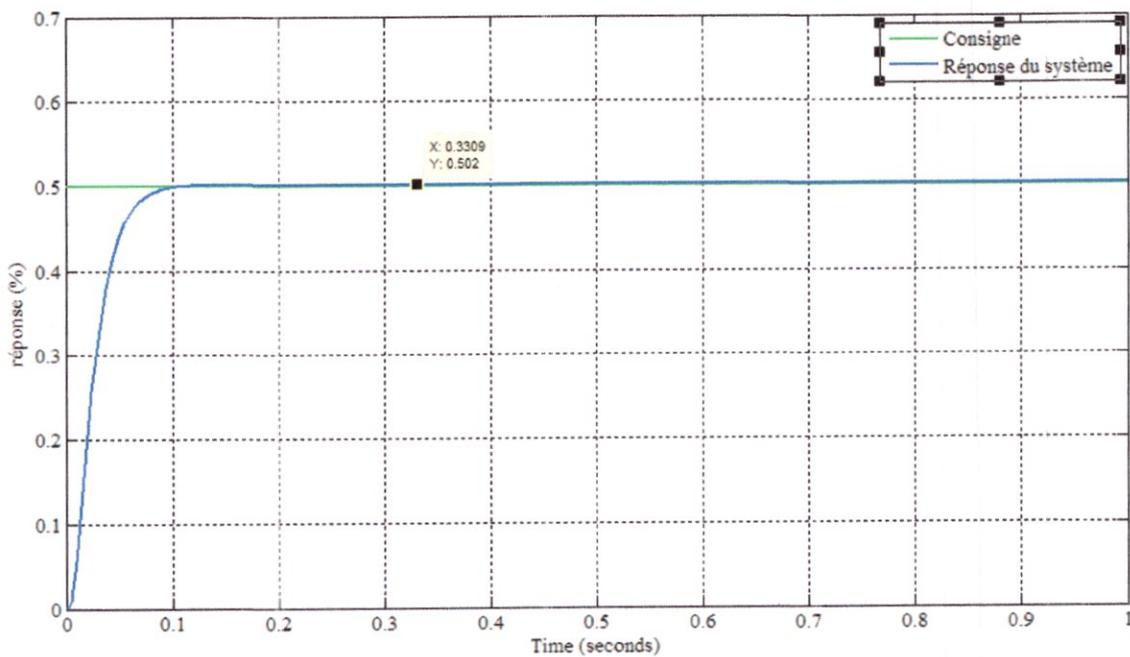


Figure 5.2.b : Réponse de système pour une consigne de 0.5 (50%)

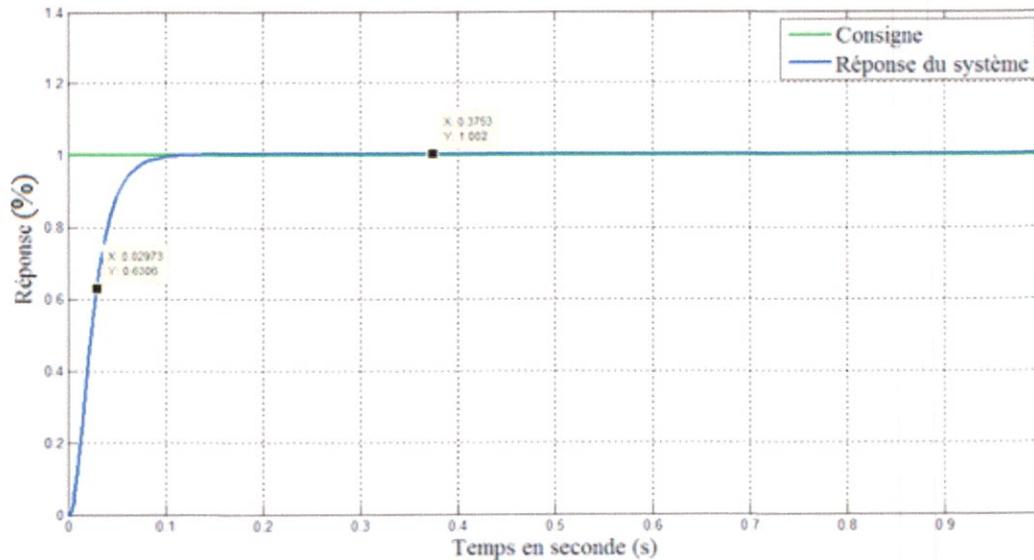


Figure 5.2.c : Réponse de système pour une consigne de 1 (100%)

5.2.2. Interprétation des résultats :

On observe que le procédé atteint la consigne donnée (régime stationnaire) dans un temps très faible exactement 120 ms qui est acceptable et répond au besoin du procédé et on observe aussi que lorsque le procédé dans le régime stationnaire devient stable malgré qu'il y a une erreur statique très petit de l'ordre 0.3 % de la consigne mais cette erreur peut être considérée comme négligeable et elle n'affecte pas le bon fonctionnement du système.

5.3. Simulation avec le régulateur flou :

Nous allons changer notre régulateur classique de type proportionnel par le régulateur flou à deux entrées on obtient la figure suivante :

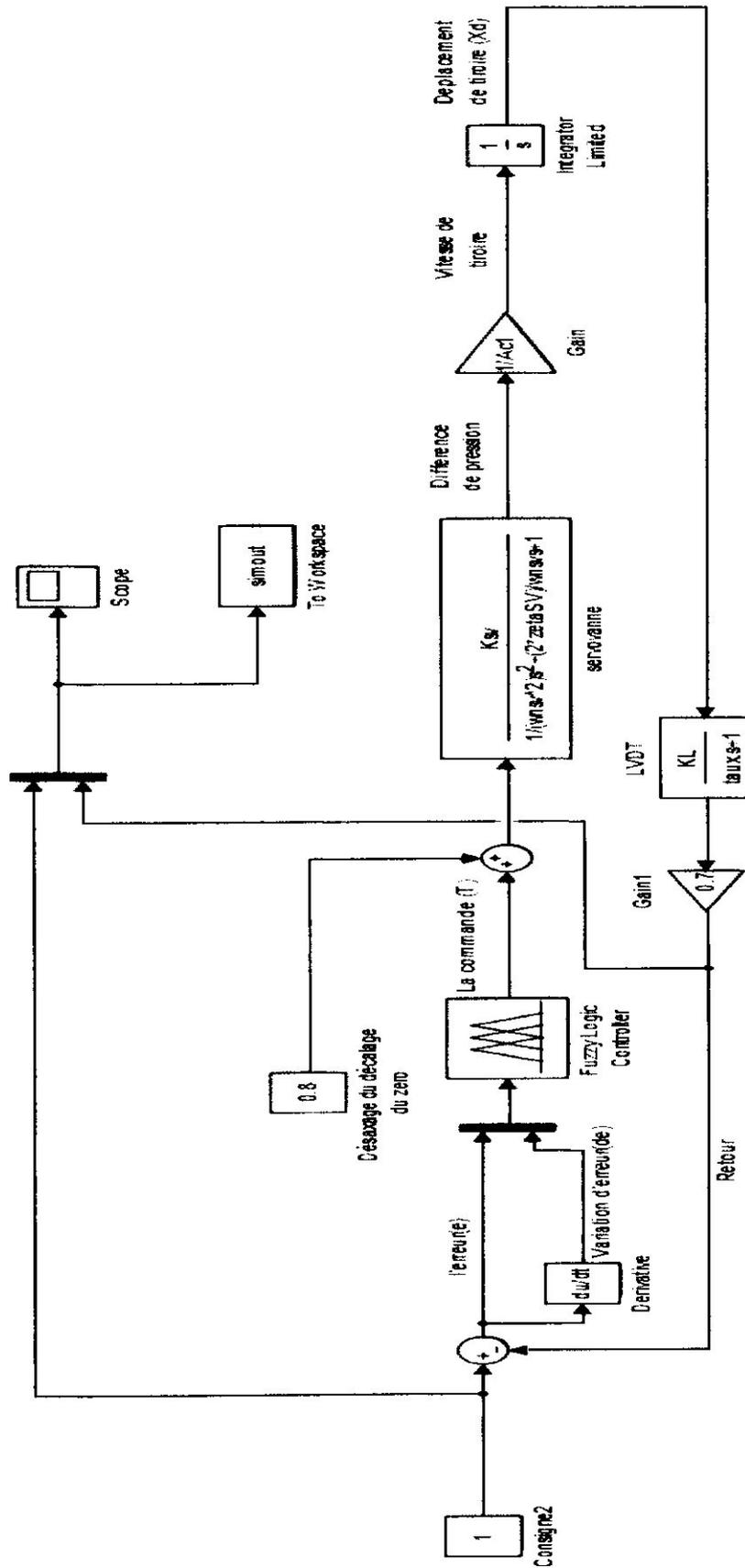


Figure 5.3 : schéma bloc de simulation sur Simulink

On exécute ce programme, en injectant plusieurs consignes à l'entrée du système

(1, 0.5 et 0) nous obtenons les résultats de simulations suivantes :

5.3.1. Résultat de simulation :

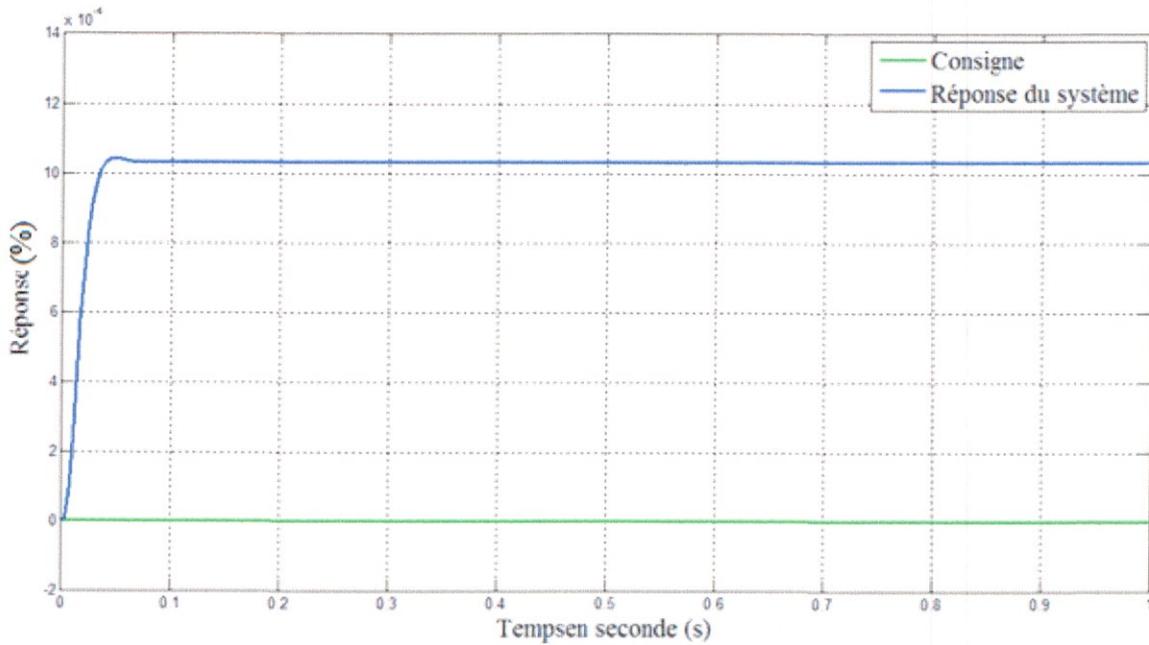


Figure 5.4.a : Réponse de système pour une consigne de 0 (0%)

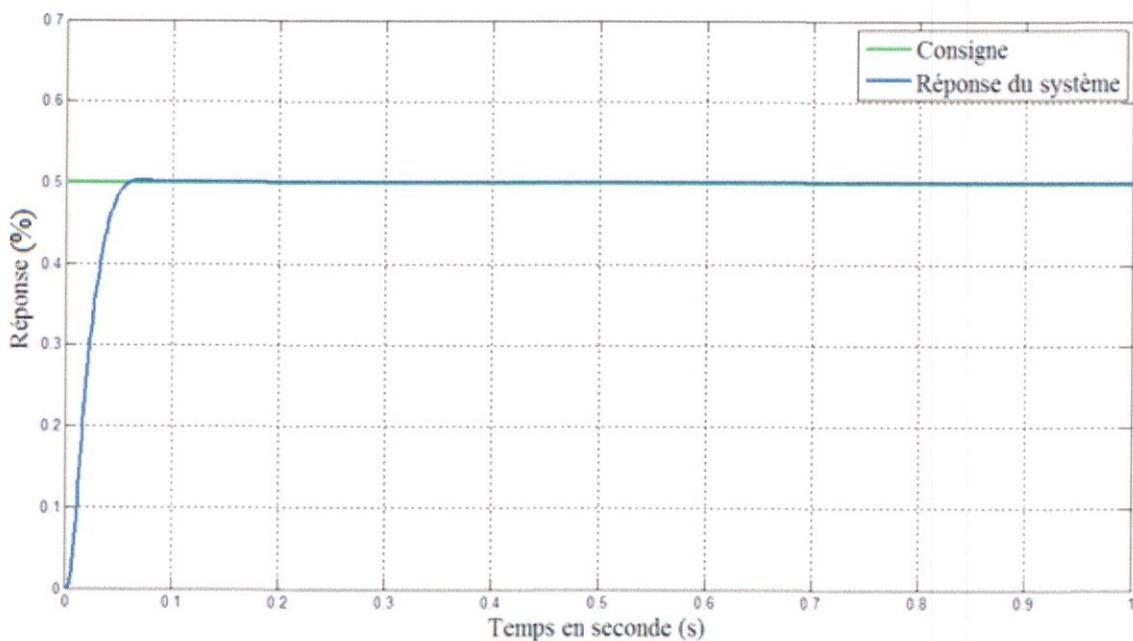


Figure 5.4.b : Réponse de système pour une consigne de 0.5 (50%)

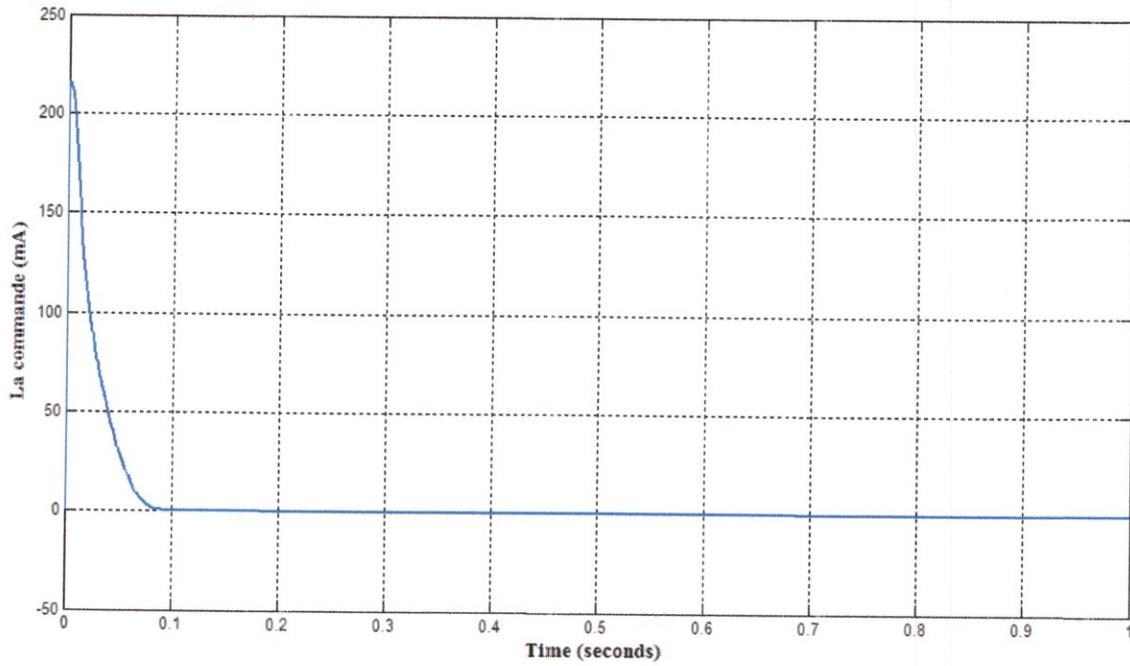


Figure 5.4.c : représentation de courant de commande pour la consigne 50%

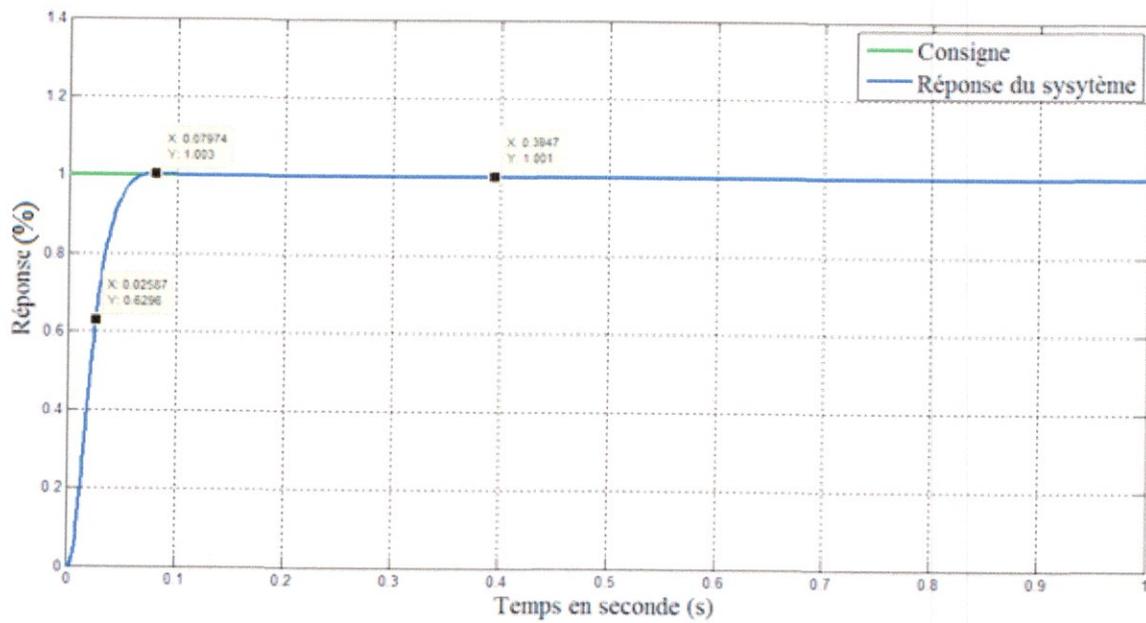


Figure 5.4.d : Réponse de système pour une consigne de 1 (100%)

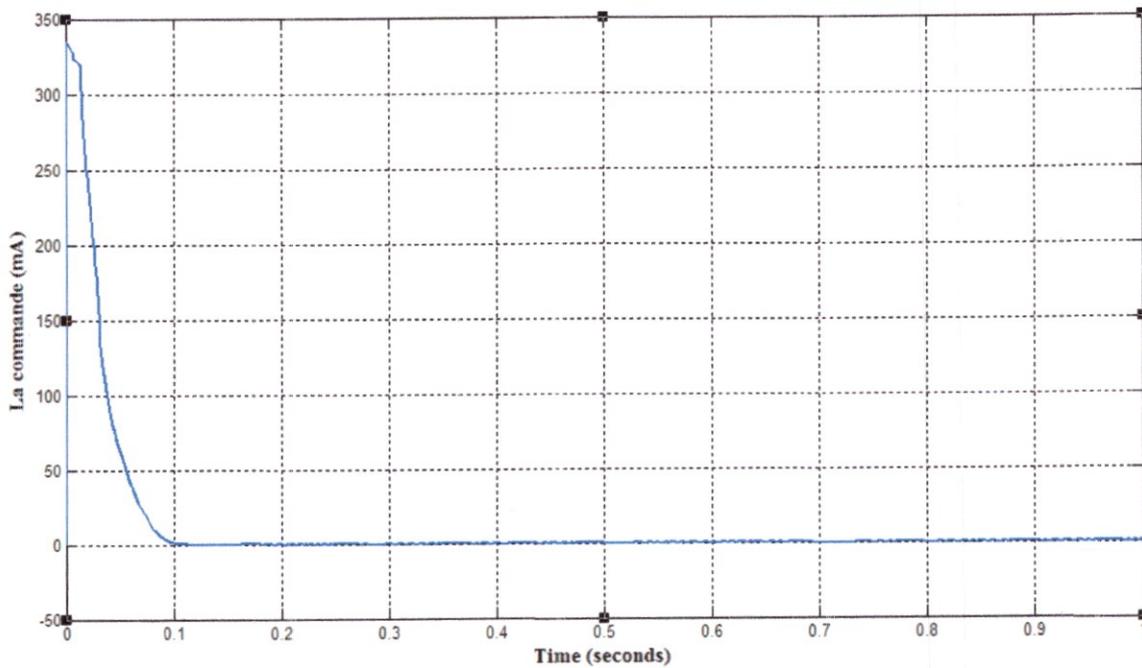


Figure 5.4.e : représentation de courant de commande pour la consigne 100%

5.3.2. Interprétation des résultats :

On observe que le procédé atteint la consigne donnée (régime stationnaire) dans un temps très faible exactement 100 ms qui est acceptable et répond au besoin du procédé et on observe aussi que lorsque le procédé dans le régime stationnaire devient stable malgré qu'il y a une erreur statique très petite de l'ordre de 0.1 % de la consigne mais cette erreur peut être considérée comme négligeable, on peut aussi voir un dépassement négligeable de 0.2 %, ce dépassement et l'erreur statique n'affectent pas le bon fonctionnement du système

5.4. Comparaison entre régulateur flou et proportionnel:

On réalise le schéma de simulation suivante :

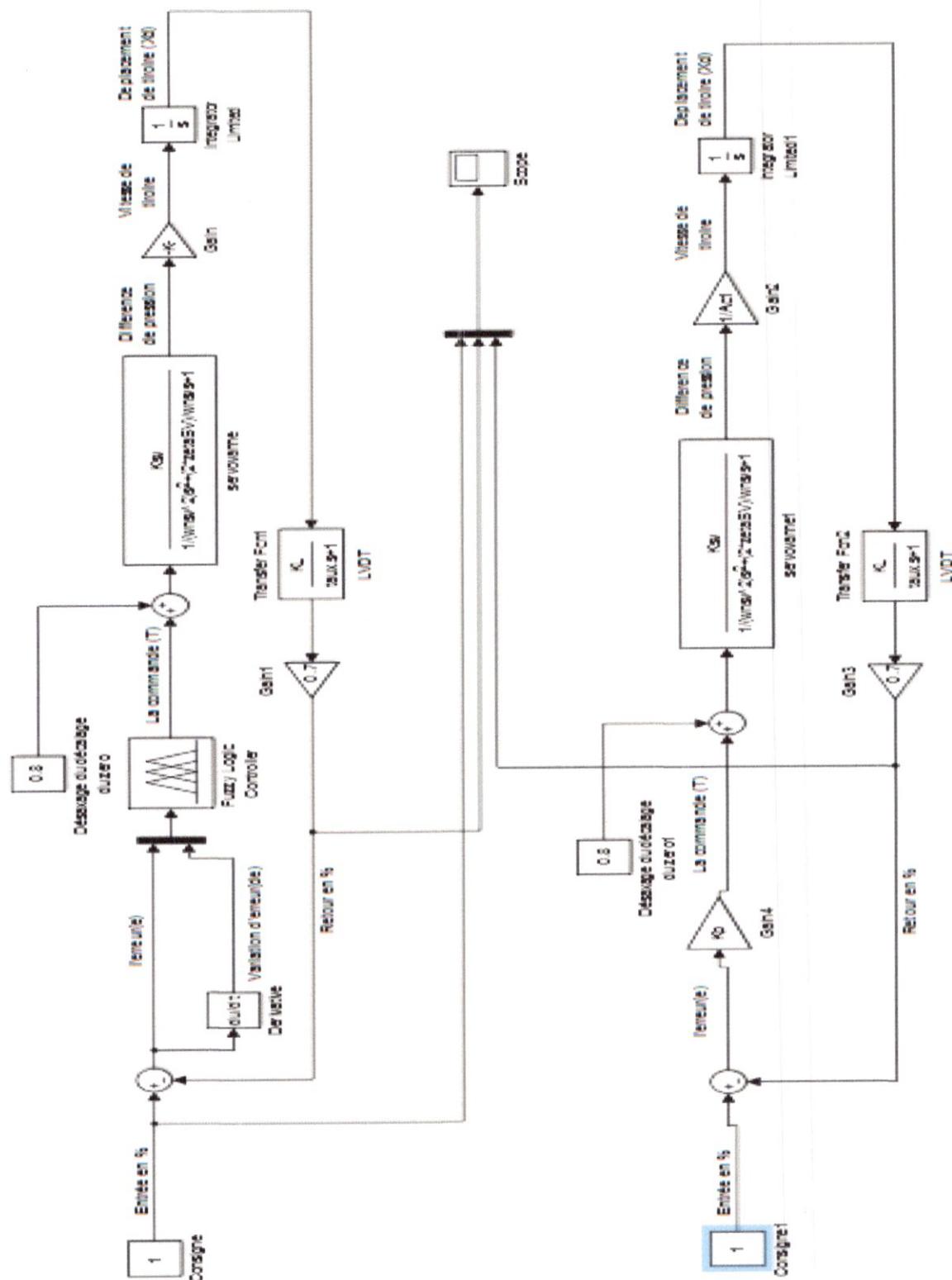


Figure 5.5 : schéma de simulation du régulateur flou et régulateur P

5.4.1. Résultats de simulation

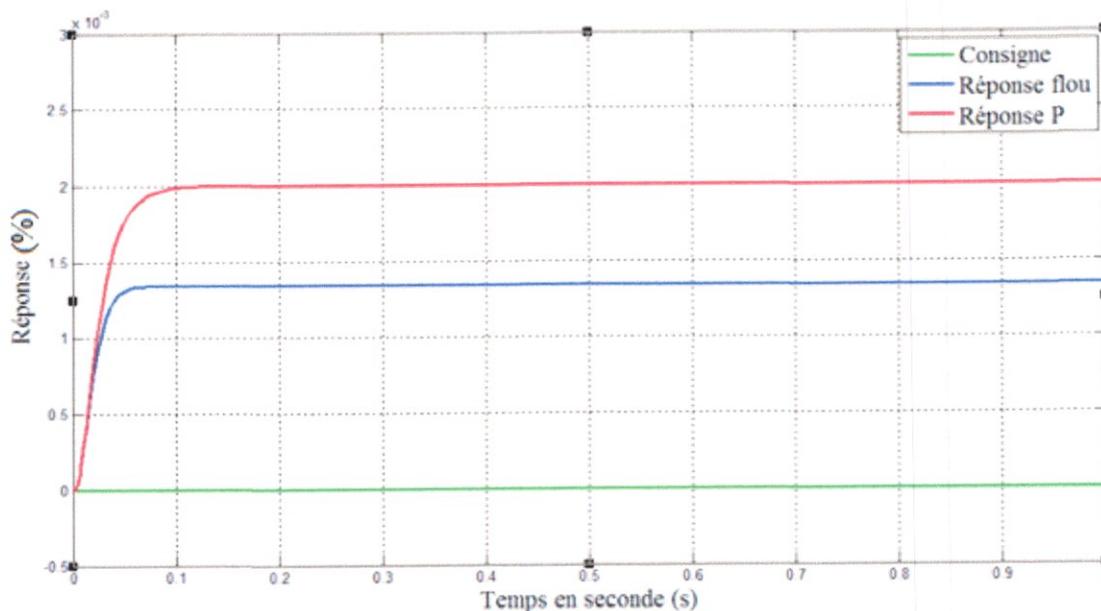


Figure 5.6.a: comparaison du régulateur flou avec le régulateur P
(Pour consigne de 0%)

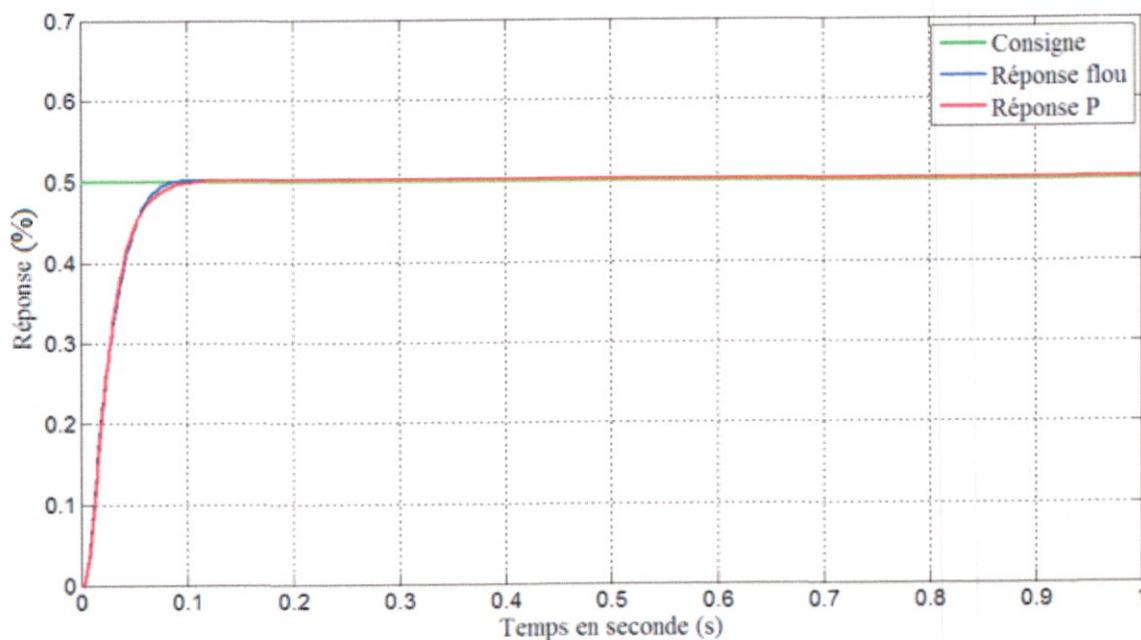
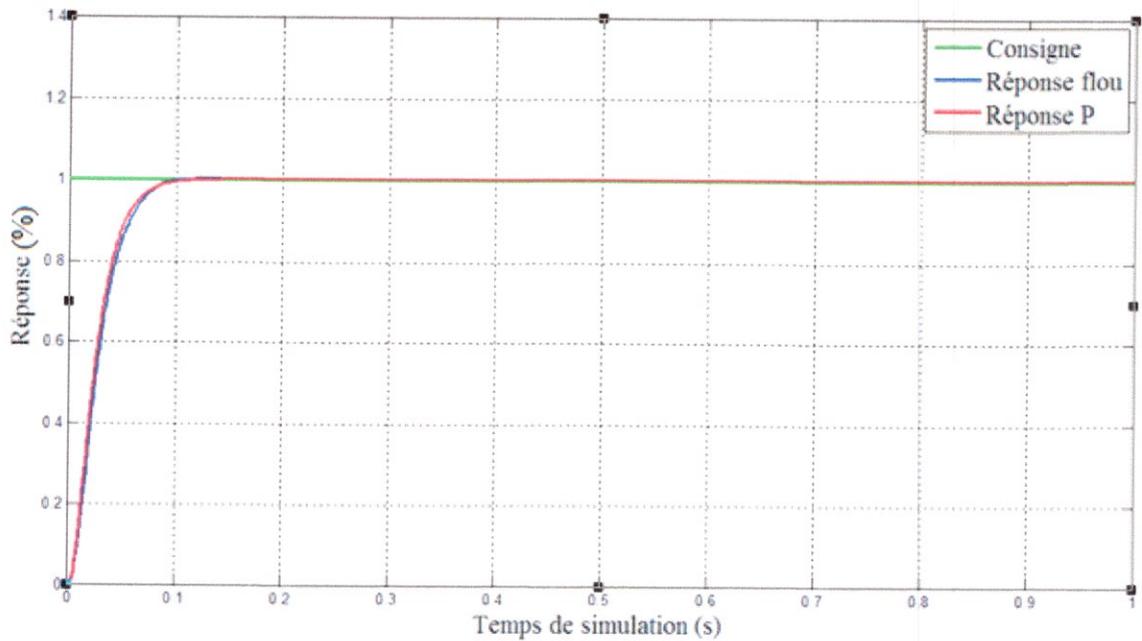


Figure 5.6.b : comparaison du régulateur flou avec le régulateur P
Pour consigne de 0.5 (50%)



**Figure 5.6.c : comparaison du régulateur flué avec le régulateur P
Pour consigne de 1 (100%)**

5.4.2. Interprétation du résultat :

Les résultats obtenus nous permettent de constater que la commande flué est plus efficace comparativement au régulateur classique proportionnel

5.5. Simulation avec perturbation

On ajoute une perturbation à l'entrée de la servovanne (un signal care d'amplitude égale à 10) pour avoir une idée sur le comportement du système en présence du bruit due à la pression d'air à l'entrée du compresseur et à la température et on simule.

Dans cette partie on fixe la durée de simulation à 10 secondes (10 s)

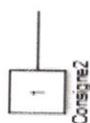
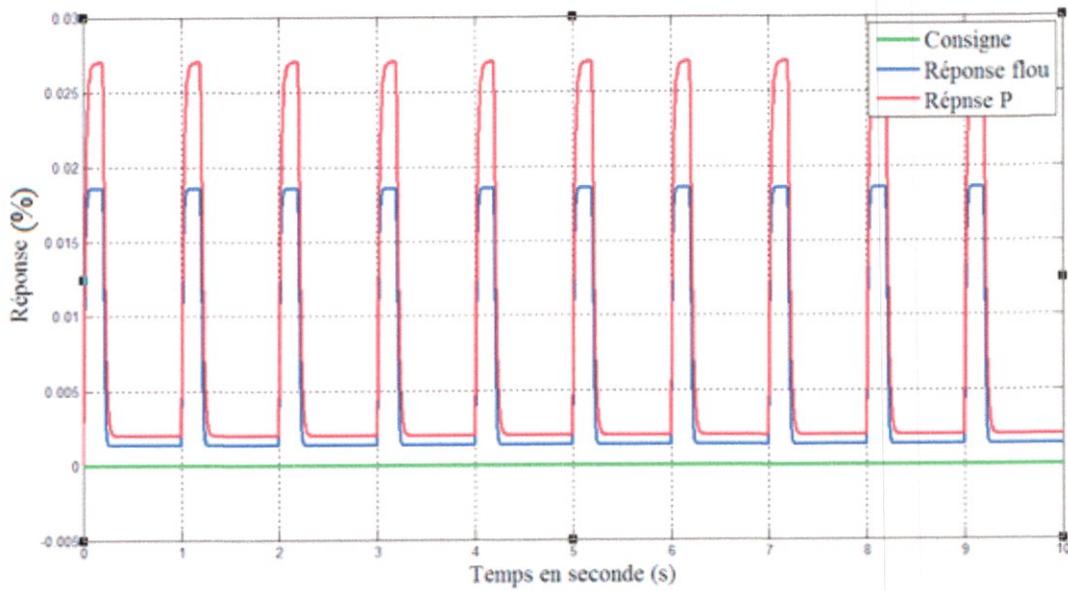
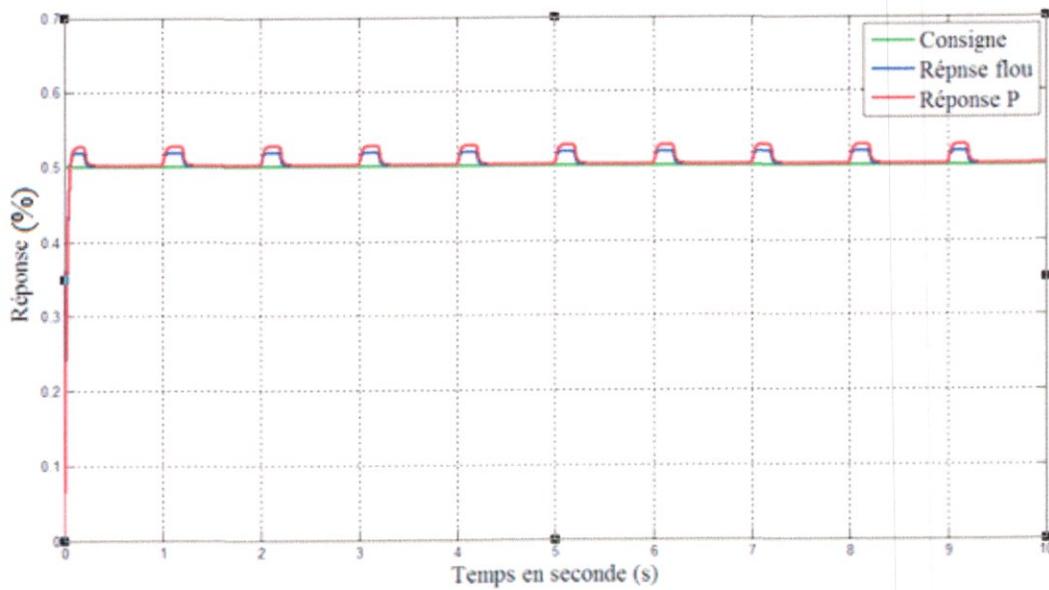


Figure 5.7 : schéma de simulation avec perturbation

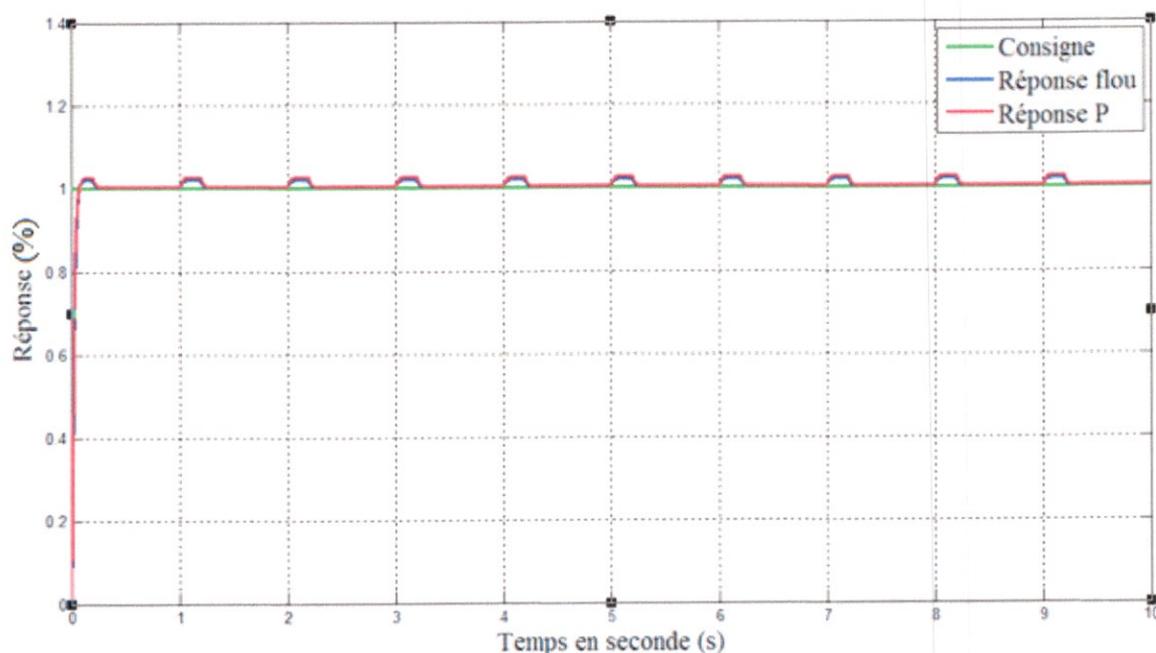
5.5.1. Résultat de la simulation :



**Figure 5.8.a: Comportement de la servovanne en présence de perturbation
Pour consigne de 0 (0 %)**



**Figure 5.8.b : Comportement de la servovanne en présence de perturbation
Pour consigne de 0.5 (50 %)**



**Figure 5.8.c : Comportement de la servovanne en présence de perturbation
(Pour consigne de 1 (100%))**

5.5.2. Interprétation du résultat

A partir du résultat de simulation, on observe que le régulateur flou converge vers la consigne donnée mieux que le régulateur proportionnel en présence de perturbation extérieure, malgré les différentes valeurs de bruit.

5.6. Conclusion :

D'après les simulations réalisées dans ce chapitre et les graphes obtenus on peut conclure que le régulateur P contrôle bien les aubes directrices d'entrée compresseur variable, le régulateur flou aussi assure sa fonction de contrôle de VIGV bien comme il faut.

On peut conclure aussi qu'il y a une différence entre le régulateur P et le régulateur flou en termes de précision et robustesse où le régulateur flou est plus puissant que le régulateur proportionnel surtout en présence de bruit extérieur, mais en terme de temps de calcul le régulateur proportionnel devient meilleur et rapide par rapport au régulateur flou donc chacun des régulateurs a des avantages et des inconvénients.

Conclusion général

Conclusion général

Dans cette mémoire, nous sommes intéressés par la capacité de la logique floue commandé une servovanne qui le servo de système VIGV. Ce choix a été justifié par la capacité de la logique floue soit pour l'leurrer statique c'est presque nul, soit pour le dépassement et il montre que les performances de poursuite de la consigne sont satisfaire par rapport aux régulateur classique Proportionnel (P). Le rejet de perturbation est mieux que celui des régulateur classique même quand on a appliqué à l'entrée du système une bruit (bruit due à la pression d'air à l'entrée du compresseur et à la température) le système reste stable soit dans la période transitoire soit quand il est dépassé la consigne.

La logique floue permet de raisonner non pas sur des variables numériques, mais sur des variables linguistiques, c'est-à-dire, sur des variables qualitatives (grand, petit, moyen, loin, près, fort, etc.). Le fait de raisonner sur ces variables linguistiques va permettre de pouvoir manipuler des connaissances en langage naturel. Tout ce que l'on a à implimenter au système, ce sont des règles d'inférences exprimées en langage naturel.

Il y a donc un avantage certain à travailler en logique floue. Cette méthode est très utile lorsque l'on se trouve confronté à des systèmes qui ne sont pas, ou difficilement modélisable. De même, cette méthode est très avantageuse si l'on possède un bon niveau d'expertise humaine. En effet, il faut fournir au système flou toute une base de règle exprimé en langage naturel pour permettre de raisonner et de tirer des conclusions. Plus l'expertise humaine d'un système est importante et plus on est capable d'ajouter des règles d'inférences au système.

La logique floue permet donc de contrôler des systèmes complexes non linéaire et tient compte d'information incertaine. Néanmoins, cette méthode présente divers inconvénients. Tout d'abord, le fait d'exprimer ses connaissances sous la forme de règles en langage naturel (et donc qualitative) ne permet pas de prouver que le système aura un comportement optimal. Tous les réglages que le programmeur doit entrer au système se fait de façon totalement ad-hoc. Cette méthode ne peut donc pas garantir que le système soit stable, précis ou optimal, ni même qu'elle ne peut garantir que les règles entrées par le programmeur ne soient pas contradictoire.

Références Bibliographiques

- [1]: Manuel d'opération et maintenance des centrales de production électrique Sonalgaz type de turbine gaz model MS-9001AF de Général Electric
- [2]: KAKI Mohammed et BELAHCENE EL Hadj Ahmed. « Etude des vannes de gaz de turbine à gaz MS5002C ». Université Kasdi Merbah Ouargla. 2016
- [3]: CHABBI Abdeldjalil. « Conception d'un contrôleur flou anti-pompage d'un système de compression de gaz ». Université BATNA 2. 2016
- [4]: Publication 113-27620 « The power of Technology, Experience and Innovation ». GE Power Systems
<https://fr.scribd.com/document/338669494/113-27620-pdf>
- [5]: D.E. Brandt, R.R. Wesorick. « GE gas turbine design philosophy ». GE Industrial & Power Systems. 1994
- [6]: Mark Howard. LIVRE BLANC TECHNIQUE « Principe de fonctionnement des capteurs inductifs ». Zettlex UK Ltd
- [7]: CORREVON Marc. « Capteurs inductifs de position LVDT, RVDT, inductosyn (Conditionnement et traitement du signal) ». Haute école d'ingénierie et de gestion du Canton du Vaud. 2013
- [8]: PRITHWIRAJ Purkait. « Electrical and Electronics Measurements and Instrumentation ». McGraw Hill Education – India. 2013.
- [9]: Le magazine Schneider Electric de l'enseignement technologique et professionnel. « La régulation ». 2004
- [10]: TAFRAOUTI Mohamed. « Contribution à la modélisation et à la commande des Systèmes électrohydrauliques » Université Henri Poincaré-Nancy I. 2006
- [11]: GAGNON Tommy. « Modélisation causale et acausale d'un système électrohydraulique ». Université du Québec. 2011

Références Bibliographiques

[12]: FREDDY Mudry. « justage des Paramètres d'un Régulateur PID ». Ecole d'ingénieurs du Canton de Vaud. 2002

[13]: CABODEVILA Gonzalo. « Commande et Identification Floue ». Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques – France. 2007

[14]: DERNONCOURT Franck. « La Logique Floue : entre raisonnement humain et intelligence artificielle ». Paris. 2011

[15]: T. Amieur. « Commande à base de la logique floue ». Université de Biskra. 2009

[16]: CHUEN CHIEN LEE. « Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller - part I ». IEEE Rransactions on sustems, MAN, AND cybernetics, vol.20, NO. 2. 1990

[17]: S. Meradi. « Conception d'un régulateur flou pour la commande vectorielle de la machine asynchrone ». Université de Biskra. 2007

[18]: B.Sellali, E.H. Rebaa. « fuzzy techniques to improve engineering judgement for faults identification and diagnostic electric power equipment. Risk, Reliability and Societal Safety. ED Taylor & Francis Group. London. 2007

[19]: B.Sellali & al. « les méthodes neuro-flou pour le management de la fiabilité transformateur de puissance ». Confere 6-7 juillet ENSAM CPI-Paris, Marrakech. 2006

[20]: B.Sellali. « Les méthodes neuro-flou et leurs application indistriel ». Polycopié, Labo des AERONEFS, IAES, Universté de Blida. 2017

Annexes

Annexe

Annexe 01 :

Ci-dessous le tableau descriptif de différentes sections de la turbine à gaz MS9001AF [1].

Description	Unité	Données technique
Fabricant		General Electric
Série du model		PG9351FA
Puissance brute ISO (15 °C ; humidité relative 60 % ; 1,013 bar ; méthane 100 % ; perte de pression d'admission 62,2 mmH ₂ O ; pression statique d'échappement 139,7)	MW	265,318
Consommation spécifique brute ISO (fonctionnement au gaz naturel) (PCI - pouvoir calorifique inférieur) (15 °C ; humidité relative 60 % ; 1,013 bar ; méthane 100 % ; perte de pression d'admission 62,2 mmH ₂ O ; pression statique d'échappement 139,7)	kJ/kWh	9538
Consommation spécifique brute ISO (fonctionnement au diesel) (PCI - pouvoir calorifique inférieur) (15 °C ; humidité relative 60 % ; 1,013 bar ; PCI = 42 566 kJ/kg ; perte de pression d'admission 62,2 mmH ₂ O ; pression statique d'échappement 139,7)	kJ/kWh	10201
Débit de diesel requis par une TG dans les conditions du site (température maximale 50°C ; humidité relative 60 % ; 1,013 bar ; PCI = 42 566 kJ/kg ; perte de pression d'admission 62,2 mmH ₂ O ; pression statique d'échappement 139,7)	kg/h	Environ 49 824
Avec injection de la quantité d'eau requise de	kg/h	Environ 32 352
Débit de gaz requis par une TG dans les	m ³ /h	63364,01

Annexes

conditions du site (température max. 50 °C)		
Débit de gaz requis par une TG dans les conditions du site (température minimale -12,9 °C ; humidité relative 60 % ; 1,013 bar ; PCI = 42 566 kJ/kg ; perte de pression d'admission 62,2 mmH2O ; pression statique d'échappement 139,7)	m ³ /h	82090,66
Débit de diesel requis par une TG dans les conditions du site (température minimale -12.9 °C ; humidité relative 60 % ; 1,013 bar ; PCI = 42 566 kJ/kg ; perte de pression d'admission 62,2 mmH2O ; pression statique d'échappement 139,7)	kg/h	Environ 67 728
Avec injection de la quantité d'eau requise de	kg/h	Environ 77 608

Annexe 02 :

Caractéristiques fonctionnelles de l'actionneur de l'aube mobile entrée compresseur [1]

Exigences fonctionnelles	Actionneur d'aube mobile entrée compresseur
Précision de position	±1 % de la pleine échelle (sur un écart-type de ±25 °F/±14 °C de l'étalonnage)
Répétabilité de position	±0,5 % de point dans la plage de 10 % à 100 %
Type de fluide hydraulique	Fluides hydrauliques à base de pétrole et fluides hydrauliques résistants au feu tels que Fyrquel EHC
Pression hydraulique maximale de fonctionnement	(9653 à 12 411) kPa / (1400 à 1800) psig (pression nominale à 11 722 kPa/1 700 psig)
Niveau de pression du fluide d'essai d'épreuve	18 616 kPa (2 700 psig) minimum conformément à SAE J214 (Prod Test)
Pression de rupture minimale du fluide	31 264 kPa (4 500 psig) minimum conformément à SAE J214

Annexes

Filtration requise du fluide	De 10 µm à 15 µm à 75 bêta
Niveau de contamination du fluide hydraulique	Conformément à la norme ISO 4406 code 18/16/13 max, Code 16/14/11 conseillé
Température du fluide	hydraulique (+10 à +71) °C / (+50 à +160) °F
Température ambiante de l'actionneur	(-40 à +121) °C / (-40 à +250) °F
Niveau d'essai de vibration	0,5 gp 5 Hz à 100 Hz onde sinusoïdale Décélération aléatoire 0,01500 gr ² /Hz de 10 à 40 Hz jusqu'à 0,00015 gr ² /Hz à 500 Hz
Choc	limité à 30 G par servovanne
Délai de déclenchement	Moins de 5 secondes pour une pression d'alimentation de 11 032 kPa (1 600 psi), une température d'huile de 38 °C / 100 °F et une charge de (13 à 22) kN / (3 000 à 5 000) livre-force (course de 100 % à 0 %)
Temps de pivotement	0 % à 100 % en (4,5 ± 1,5) secondes et 100 % à 0 % en (5,0 ± 1,5) s. Exception pour unités à course de 3,94 pouces: 0 % à 100 % en (5,0 ± 1,5) s et 100 % à 0 % en (5,0 ± 1,5) s
Pression de déclenchement (option de déclenchement hydraulique à basse pression)	Les pressions d'excitation et de désexcitation doivent être ≥207 kPa (30 psid) (par rapport au retour hydraulique)
Connexions de fluides hydrauliques	Pression de relais de déclenchement (seulement pour actionneur avec relais de déclenchement hydraulique) 0,500 SAE Code 61 orifice à bride (-8) Pression d'alimentation-0., 750 SAE Code 61 orifice à bride (-12) Orifice de retour-1., 250 SAE Code 61 orifice à bride (-20)
Courant d'entrée nominal de	-7,2 à +8,8 mA (polarisation nulle 0,8 ± 0,32

Annexes

servocommande	mA)
Peinture	Résine époxy à deux éléments
Forces d'actionnement (ouverture et fermeture à 11 722 kPa / 1 700 psig	Force de rétraction (ouvert) 253 887 N / 57 079 livres Force de détente 291 006 N / 65 424 livres
Objectif de disponibilité nominal	Supérieur à 99,5 % sur une période de 8 760 heures

Annexes

Annexe 03 :

Les différents types d'implémentations [9]

Plusieurs implémentations des calculs sont possibles : les structures Série, Parallèle, Mixte.

1. Structure PID Série :

Les calculs sont réalisés en série.

$$S = K_p \left[\frac{T_i + T_d}{T_i} \right] (PV - SP) + \frac{K_p}{T_i} \int (PV - SP) dt + K_p * T_d \frac{d(PV - SP)}{dt}$$

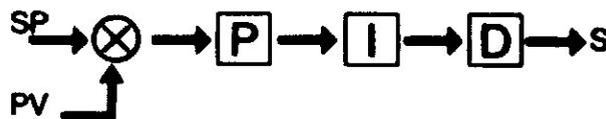


Figure 1 : structure PID série

Il existe un lien fort entre les paramètres puisque le réglage de l'action Proportionnelle G_r influe (par exemple) sur l'action Intégrale et que T_i influe sur l'action Proportionnelle. . [9]

2. Structure PID Parallèle :

Les calculs sont réalisés en parallèle et une somme est effectuée sur les différentes contributions pour avoir la commande à appliquer.

$$S = G_r(M - C) + \frac{1}{T_i} \int (M - C) dt + T_d \frac{d(M - c)}{T_d}$$

Une grande liberté de choix de réglages est offerte.

Malgré tout, cette structure est peu utilisée car plus complexe à régler. . [9]

$$S = K_p(PV - SP) + \frac{1}{T_i} \int (PV - SP) dt + T_d \frac{d(PV - SP)}{T_d}$$

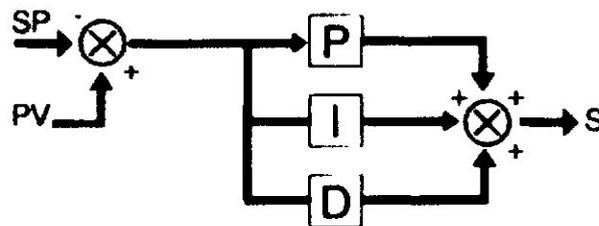


Figure 2 : structure PID parallèle

3. Structure PID Mixte :

Les calculs sont réalisés en parallèle pour les contributions Intégrale et Dérivée et la somme de ces actions est mise en série avec la contribution

Proportionnelle. . [9]

$$S = Gr(M - C) + \frac{Gr}{Ti} \int (M - C)dt + Gr * Td \frac{d(M - c)}{Td}$$

C'est la structure la plus classique.

$$S = Kp(PV - SP) + \frac{Kp}{Ti} \int (PV - SP)dt + KP * Td \frac{d(PV - SP)}{dt}$$

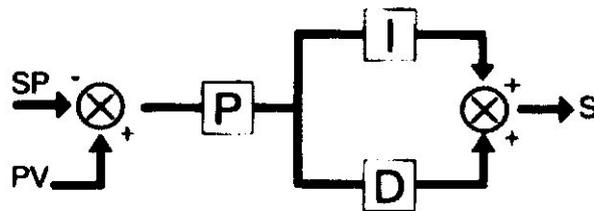


Figure 3 : structure PID mixte