

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMÉRI, TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET DE L'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

Mémoire de fin d'études
Présenté en vue de l'obtention
du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electronique

Option : Contrôle

Thème:

*Etude et régulation du phénomène de pompage dans le compresseur centrifuge BCL405/C avec implémentation de l'algorithme anti-pompage sur automate S7/300
<<Station Nord de Hassi R'mel>>*

Dirigé par :

H.Oubabas

Présenté par :

Ouldamer salim

Année universitaire 2008/2009

Soutenu le : 07/07/2009

Sommaire

Préambule

Introduction générale	01
-----------------------------	----

Chapitre I : Etude des systèmes de compression

I.1 Introduction.....	04
I.2 Présentation de la station de compression nord	04
I.2.1 La Fonction de la station	04
I.2.2 La réinjection a pour but de	04
I.2.3 Capacité de la station.....	04
I.2.4 Caractéristiques de fonctionnement.....	04
I.2.5 Les conditions de fonctionnement de la station	04
I.2.6 Les composantes principales de la station	05
I.3 Description du circuit de gaz	05
I.3.1 Section aspiration de la station	05
I.3.2 Tuyauteries d'aspiration premier étage	06
I.3.3 Unité de compression premier étage	06
I.3.4 Réfrigérant de gaz premier étage	06
I.3.5 Séparateur de gaz premier étage	06
I.3.6 Collecteur inter étage	06
I.3.7 Unité de compression deuxième étage.....	06
I.3.8 Réfrigérant de gaz deuxième étage	07
I.3.9 Collecteur final	07
I.4 Généralités sur les turbines a gaz	09
I.4.1 Définition	09
I.4.2 Présentation d'une turbine à gaz (type MS 5002B).....	09
I.4.3 Conception	09
I.4.4 Caractéristiques	10
I.4.5 Principe de fonctionnement	10
I.5 Description générale des compresseurs	12
I.5.1 Définition	12
I.5.2 But de la compression	12
I.5.3 Classification des compresseurs	13
I.5.4 Compresseurs volumétriques	13
I.5.5 Les turbocompresseurs.....	14
I.6 Description générale du compresseur centrifuge	15
I.6.1 Compresseur BCL (fig.).....	16
I.6.2 Classification des compresseurs centrifuges	17
I.6.3 Constitution des compresseurs centrifuges	18
I.7 Définition des grandeurs physiques concernant la compression	18
I.7.1 Hauteur réelle H_{eff}	19
I.7.2 Hauteur adiabatique.....	19
I.7.3 Hauteur Poly tropique H_{pol}	19
I.7.4 Rendement poly tropique	20
I.7.5 La puissance absorbée par le compresseur	20
I.8 Conclusion	20

Chapitre II : Phénomène de pompage et prévention anti pompage

II.1 Introduction	21
II.2 Etude du phénomène de pompage dans le compresseur	21
II.2.1 Position du problème	21
II.2.2 Pompage des compresseurs	21
II.2.3 Courbe de rendement et de puissance	21
II.2.4 Point de fonctionnement du compresseur	22
II.2.5 Stabilité du point de fonctionnement	22
II.3 Analyse du phénomène de pompage	24
II.3.1 Dangers et remèdes	24
II.3.2 Régulation anti-pompage	25
II.3.3 Principe de la régulation anti-pompage	25
II.3.4 Loi de commande anti-pompage	25
II.3.5 Fonctionnement de la boucle $k = \frac{h1}{\Delta P}$	28
II.3.5.1 Avantage	28
II.3.5.2 Inconvénient	28
II.3.6 Etude de l'influence de la température	30
II.3.7 Limite protection de pompage	30
II.3.8 Besoin en rapidité du système	31
II.4 Principaux problèmes d'exploitation des systèmes anti pompage	32
II.4.1 Le démarrage	32
II.4.2 Influence de la température	32
II.4.3 Influence de la nature de gaz	32
II.4.4 Stabilité de la boucle de régulation	32
II.5 Conclusion	33

Chapitre III : Synthèse des régulateurs et commande numérique

III.1 Introduction	34
III.2 Description de la chaîne étudiée	34
III.3 Choix de la structure du modèle	36
III.3.1 Estimation des paramètres du modèle	37
III.3.2 Validation du modèle identifié	37
III.4 Algorithme des Moindres Carrés Récursifs MCR	37
III.5 Choix du gain d'adaptation	38
III.6 résultats de simulation	39
III.7 Commande numérique	43
III.7.1 Introduction	43
III.7.2 structure et principe d'un système de régulation numérique	43
III.7.3 L'échantillonnage	44
III.7.4 Choix de la Période d'échantillonnage	44
III.7.5 Principes des méthodes modernes de calcul des régulateurs numériques	45
III.7.5.1 Description des régulateurs PID	46
III.7.5.2 Régulateur numérique PID	46
III.7.5.3 Structure d'un régulateur numérique PID	47
III.7.6 synthèse de la commande et résultat de simulation	48
III.7.6.1 Modèle échantillonné du procédé	49
III.7.6.2 Choix des pôles en boucle fermée P (Z^{-1})	49
III.7.6.3 calcul des paramètres du régulateur numérique	50

III.7.6.4 Etude du système par rapport à la perturbation.....	50
III.7.6.5 Interprétation des résultats.....	51
III.8 La commande adaptative.....	52
III.9 Principe de la commande adaptative.....	52
III.9.1 Commande adaptative à gains préprogrammés.....	54
III.9.2 Commande adaptative avec modèle de référence.....	54
III.9.3 Commande adaptative à régulateur auto-ajustable.....	55
III.10 Choix de la commande adaptative.....	58
III.11 Méthode de commande adaptative basée sur le placement des pôles....	60
III.11.1 Présentation de la méthode.....	60
III.11.2 Synthèse d'algorithme de commande.....	60
III. 11.2.1 choix de type du régulateur.....	60
III. 11.2.2 synthèse des paramètres du régulateur.....	61
III.12 Résultats de simulation.....	65
III.13 Interprétation des résultats.....	69
III.14 Conclusion.....	69

Chapitre IV : Système de contrôle par automate programmable

IV.1 Introduction.....	71
IV.2 Définition d'un automate programmable.....	71
IV.3 Présentation de l'automate programmable S7-300.....	71
IV.4 Caractéristiques de l'automate programmable S7-300.....	71
IV.5 Constitution de l'automate programmable S7-300.....	72
IV.5.1 Modules d'alimentation (PS)	72
IV.5.2 Unité Centrale (CPU)	73
IV.5. 3 Modules de coupleurs (IM)	76
IV.5.4 Modules de signaux (SM)	76
IV.5.5 Modules de fonction (FM)	77
IV.5.6 Modules de communication (CP)	77
IV.5.7 Châssis d'extension (UR : Universal Rack)	77
IV.5.8 Console de programmation (PG) ou PC avec le logiciel STEP7.....	77
IV.6 Programmation du S7-300 avec le Langage STEP 7.....	77
IV.6.1 Représentation de programme.....	78
IV.6.2 Les blocs STEP7.....	80
IV.6.2.1 Les blocs utilisateur.....	80
IV.6.2.2 Les blocs système.....	81
IV.6.3 Structure d'une programmation.....	82
IV.7 L'algorithme du régulateur RST.....	82
IV.8 Prise en compte de la trajectoire de poursuite.....	87
IV.8.1 GRAFCET d'évolution du régulateur.....	88
IV.8.2 Algorithmes RST sous forme de programmes informatique.....	90
IV .8.3 Programme en C	91
IV.9 Conclusion.....	95
Conclusion générale.....	97
Annexe	
Bibliographie	

Remerciements

Au terme de ce travail, qui a été réalisé au département électronique de l'université MOULOUD MAMMERI de Tizi-ouzou ainsi qu'au service instrumentation de la région Hassi R'mel de SONATRACH,

Je tiens à exprimer mes remerciements à mon promoteur : H.Oubabas pour son encadrement, son aide et surtout pour tous ses conseils et ses remarques qui m'ont permis de réaliser ce modeste travail.

Mes remerciements s'adressent également au personnel de la division maintenance de la région Hassi R'mel et particulièrement aux membres du service instrumentation qui ont contribué à ma formation durant mon stage.

Je tiens à remercier vivement le président et les membres du jury qui nous feront honneur d'examiner notre travail.

Enfin je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail, espérant qu'ils trouveront ici l'expression de ma profonde gratitude, et mon profond respect.

Salim.

Dédicaces

A la meilleure maman au monde pour son soutien et son amour ;

A mon cher père qui m'a offert tout son aide ;

A mon adorable femme qui ma toujours soutenu dans les moments difficiles ;

A la mémoire de ma grand mère Yasmina, mon grand père Chavane, mes oncles, Abdelkrim et Messaoud ;

A la mémoire de mon beau père D' Amar, qui ma encouragé et soutenu pour reprendre mes études, et qui était une grande source d'inspiration pour moi ;

A mon cher frère Mustapha, et sa femme Meriama ;

A ma chère sœur Nouara ;

A ma chère sœur Dalila, son mari Smail, et ses enfants, Tinhinane, Zaïna et Juba ;

A mes grands parents, Ouamar, Tassadit, Yakoute ;

A mon oncle Brahim, sa femme Saliha et leurs enfants ;

A ma tante Rachida, et ses enfants, Jugurtha, Katia, Juba et koukou ;

A ma chere belle mère Fatima, laquelle était toujours soucieuse de mes études ;

A mon beau frère et frère Karim, qui était toujours derrière moi pour que je ne manque jamais de rien, sa femme Djedjiga et leurs enfants Mohamed et Meriem ;

A mes belles sœurs Fariza, Zahia, Djamila, Samia, Fetima, Nassima, ainsi que leurs maris respectivement, Said, Chavane, Ali, mohamed, Samy, Lounes, et tous leurs enfants ;

A mes belles sœurs Ouiza et Naima ;

A mes amis Ali et Karim, agents de sécurité à la faculté ;

A mes amis, Hago, Fafar, Mouloud, Ferhat, Hinane, Nabila.....

Et tout le reste de mes amis du département électronique.

Salim.

Préambule

Présentation de l'entreprise :

L'entreprise nationale pétrolière et gazière SONATRACH a été créée en 1963. aujourd'hui elle emploie plus de 35000 personnes, ce qui lui permet d'occuper le 11ème rang parmi les grandes compagnies pétrolières internationales.

La SONATRACH est classée 7ème à l'échelle internationale, en ce qui concerne les réserves de gaz, plus de 50% de ces réserves en gaz naturel sont concentrées dans les gisements de HASSI R'MEL.

Les objectifs visés par SONATRACH, dans la région de HASSI R'MEL sont :

- ✓ la production de 100 milliards de m³/an
- ✓ la capacité de réinjection de 60 milliards de m³/an
- ✓ la vente de gaz: 40 à 60 milliards de m³/an, avec récupération maximale d'hydrocarbures liquides, condensât et GPL.

En déplétion naturelle, la récupération des hydrocarbures liquides est limitée par suite de la condensation au niveau du réservoir. Le recyclage partiel retenu pour le gisement de H-R. Permet :

- ✓ de réduire cette condensation dans le réservoir par le maintien de pression.
- ✓ de maximiser l'extraction des hydrocarbures liquides en balayant le gaz humide.
- ✓ de produire un potentiel optimal en condensât et GPL sans avoir recours au torchage des gaz excédentaires, d'où une meilleure flexibilité d'exploitation des unités de traitement de gaz.

Pour maintenir la pression d'un gisement et récupérer le maximum de son condensât, la réinjection de gaz est devenue une technique très répandue.

Pour le réinjecter, le gaz devrait être comprimé à de très hautes pressions (jusqu'à 350bar) par une série d'étages de compresseurs centrifuges hautes pressions, entraîné par des turbines à gaz.

Au centre de production, dans la région de H-R, deux stations de compression sont installées par l'entreprise nationale SONATRACH :

La Station nord et la station sud, Chacune de ces stations contient un totale de 18 compresseurs centrifuges qui sont dimensionnés pour assurer la compression de 9.10^7 m³/jour.

Position géographique :

Le gisement de gaz de Hassi R'mel se situe approximativement à 550 Km au sud d'Alger, à une altitude de 760 m. Ce gisement s'étend sur une superficie de 3500 Km² soit 70 Km environs dans la direction Nord-sud et 50 km environ dans la direction Est-Ouest.

Historique du champ de Hassi R'mel :

Le champ de Hassi R'mel est une vaste étendue, où sont réparties d'importantes installations, alimentées à partir de puits forés aux différents points du champ.

Le premier puits HR1 a été foré en 1956, ce puits a mis en évidence la présence de gaz riche en condensât.

Le développement de Hassi R'mel s'est trouvé étroitement lié au développement de l'industrie du gaz dans le monde et les importantes réserves estimées à 2000 milliards m³.

Les principales étapes du développement de Hassi R'mel :

Trois étapes importantes ont marqué le développement du champ de Hassi R'mel :

1^{ère} étape :

- 1961 : Réalisation d'une petite unité de traitement de gaz de 1,3 milliard de m³/an. Cette réalisation a coïncidé avec la construction de la première usine de liquéfaction de gaz, en 1964.
- 1969 : Cette capacité est portée à 4 milliards de m³ /an.

2^{ème} étape :

La capacité de traitement du champ de Hassi R'mel atteindra, après la nationalisation des hydrocarbures en 1971, 14 milliards de m³/an.

3^e étape (1975-1980) :

Cette période a permis de concrétiser un plan de développement qui concerne l'ensemble du champ de Hassi R'mel en mesure de répondre aux besoins énergétiques du pays, à moyen et long terme ainsi qu'aux besoins de nos partenaires, ce plan a permis également de doter Hassi R'mel d'un modèle d'exploitation en mesure d'optimiser la récupération de différents produits.

La capacité de traitement a été portée à 94 milliards m³/an par :

- La réalisation de 4 complexes de traitements de gaz.
- Le forage de 150 puits producteurs.

- Le forage de 52 puits injecteurs.
- La réalisation de deux stations de réinjection de gaz.

Le parc exploitation (XP) :

Les modules :

Module est le diminutif de "Module Processing Plant". Il désigne une usine de traitement de gaz naturel à l'échelle industrielle.

Cinq modules sont implantés sur le champ de Hassi R'mel. Quatre ont une capacité unitaire de 60 millions m³ / jour et datent des années 1979/1980.

Le cinquième, module zéro, à une capacité de 30 millions m³/jour. Il est le plus ancien.

Les modules 1 et 0 disposent d'une unité complémentaire commune, désignée d'ailleurs, «communs» ou «phase B».

Les modules de traitement de gaz sont reliés pour le stockage des hydrocarbures liquides (GPL, condensât) au CSTF et pour la réinjection de gaz à deux stations de réinjection de 90 millions de m³ /jour chacune.

Le parc compte 5500 machines tournantes, 2000 équipements statiques, 16000 appareils d'instrumentations.

La fonction XP consiste à traiter le gaz, à séparer les fractions liquides pour une meilleure valorisation. Une partie du gaz va à la réinjection, l'autre est destinée à la vente.

Station de compression :

Le but est de réinjecter le gaz sec au niveau du gisement pour le maintien de pression afin de récupérer le maximum de liquides (GPL et condensât).

Les stations de compression nord et sud ont pour objet de réguler la pression de gaz au niveau national et pour le marché international.

Chaque station contient 18 turbocompresseurs, une paire de turbocompresseurs forment une ligne de compression, cette dernière s'effectue en deux étages basses pressions (BP) et hautes pressions (HP), avec un refroidissement intermédiaire assuré par des aérorefrigerants.

Station boosting :

L'exploitation du gisement s'accompagne avec une baisse de pression.

Cette station est réalisée pour comprimer le gaz brut provenant des puits producteurs, en vue de maintenir la pression d'entrée pour le fonctionnement des modules de traitement de gaz à sa valeur nominale.

L'implantation des stations de boosting entre les puits de production et les modules de traitement de gaz du champ de Hassi R'mel, leur confère un rôle important dans la supervision et le contrôle de tous les puits producteurs, d'une part, et l'alimentation de tous les modules en gaz brut, d'autre part. Ces stations boosting deviendront le cœur de la production du champ de Hassi R'mel.

Les salles de contrôle pour la surveillance des installations :

C'est à partir de la salle de contrôle que sont données toutes les instructions aux opérateurs sur site en se basant sur les indications des instruments et des diagrammes d'enregistrement.

Le stockage et l'expédition des hydrocarbures liquide :

Le condensât et le GPL produit par tous les modules de traitement de gaz sont acheminés vers le centre de stockage et de transfert (CSTF) qui se trouve dans la zone centrale de Hassi R'mel. Là, ils sont débarrassés des éventuelles quantités d'eau résiduelles et comptabilisées avant d'être expédiées vers ARZEW.

Le CSTF comprend trois bacs de 35000 m³ et quatre bacs de 45000 m³ chacun pour le stockage du condensât ; douze sphères de 7000 m³ chacune pour le stockage du GPL.

Les vapeurs formées dans les sphères, sous l'effet de la température ambiante, sont comprimées par les turbocompresseurs, condensées puis remises dans le stockage pour éviter le boil off et le torchage du GPL.

Station de récupération des gaz associés (LE SRGA) :

C'est une unité qui a démarré le 18 avril 1999 avec une capacité de 4000 m³/jour.

Cette station comporte quatre turbocompresseurs avec une capacité unitaire d'un millions de m³/jour.

Centre national de dispatching gaz (LE CNDG) :

Son rôle est la collecte de toutes les quantités de gaz produites au niveau de Hassi R'mel et d'autres régions du sud, ces quantités sont ensuite distribuées vers les centres de

consommation comme les centres GNL, Sonelgaz, et à l'étranger : l'Italie via la Tunisie et l'Espagne via le Maroc.

Anneau d'huile :

L'anneau d'huile a été mis en évidence sur le flanc Est du champ en mars 1979.

Le développement final a été concrétisé par :

- Forage de 60 puits pour la production d'Huile ;
- Construction de 5 centres de traitement d'Huile (CTH1, CTH2, CTH3, CTH4, CTHSUD).

Les ressources humaines :

Parallèlement à cette activité industrielle, les ressources humaines ont constitué la priorité pour la prise en charge de tous les volets concernant cet important champ de production.

C'est ainsi que des actions de formation pluridisciplinaires d'envergure ont été lancées. Ces actions ont permis de disposer d'un personnel qualifié dans les différents domaines (exploitation, maintenance, puits, sécurité industrielle, etc.).

La population sur site, qui était à peine de 500 personnes avant 1975, est passée aujourd'hui à 3600 travailleurs (dont 350 ingénieurs et 540 techniciens supérieurs) ; c'est dire l'importance de l'évolution de cette «population gazière».

Le centre de formation :

La formation à Hassi R'mel a commencé en 1976, suite au développement du pôle de Hassi R'mel. A l'origine, c'était un petit centre de formation de 250 places. Le développement du champ de gaz de Hassi R'mel, les demandes croissantes en formation de la part des structures et le souci permanent de s'adapter aux technologies nouvelles ont favorisée la décision de construction d'un nouveau centre de formation, qui a ouvert ses portes en 1998. De par l'importance de ses capacités pédagogiques et de prise en charge en matière d'hébergement et de restauration, ce centre constitue une infrastructure de première importance pour la région. D'une capacité de 550 places pédagogiques dont 150 en internat, il est doté d'un amphithéâtre, de 14 salles de cours, de 8 laboratoires et de 5 ateliers.

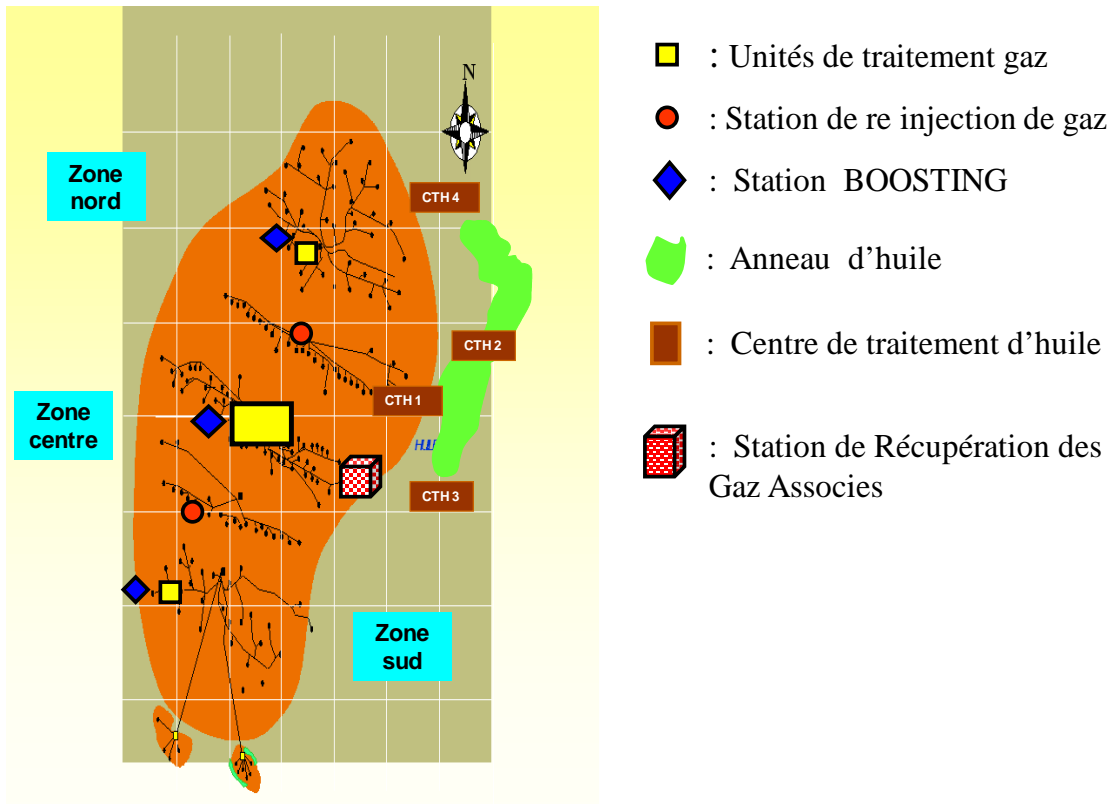


Figure (1) : Répartition des différentes installations sur le champ de Hassi R'mel

Organigramme de la région :

Direction régionale :

Elle a pour mission essentielle le développement et l'exploitation des hydrocarbures. Pour ce faire et afin de répondre à son plan de charge convenablement, elle s'est dotée de l'organisation donnée par l'organigramme suivant :

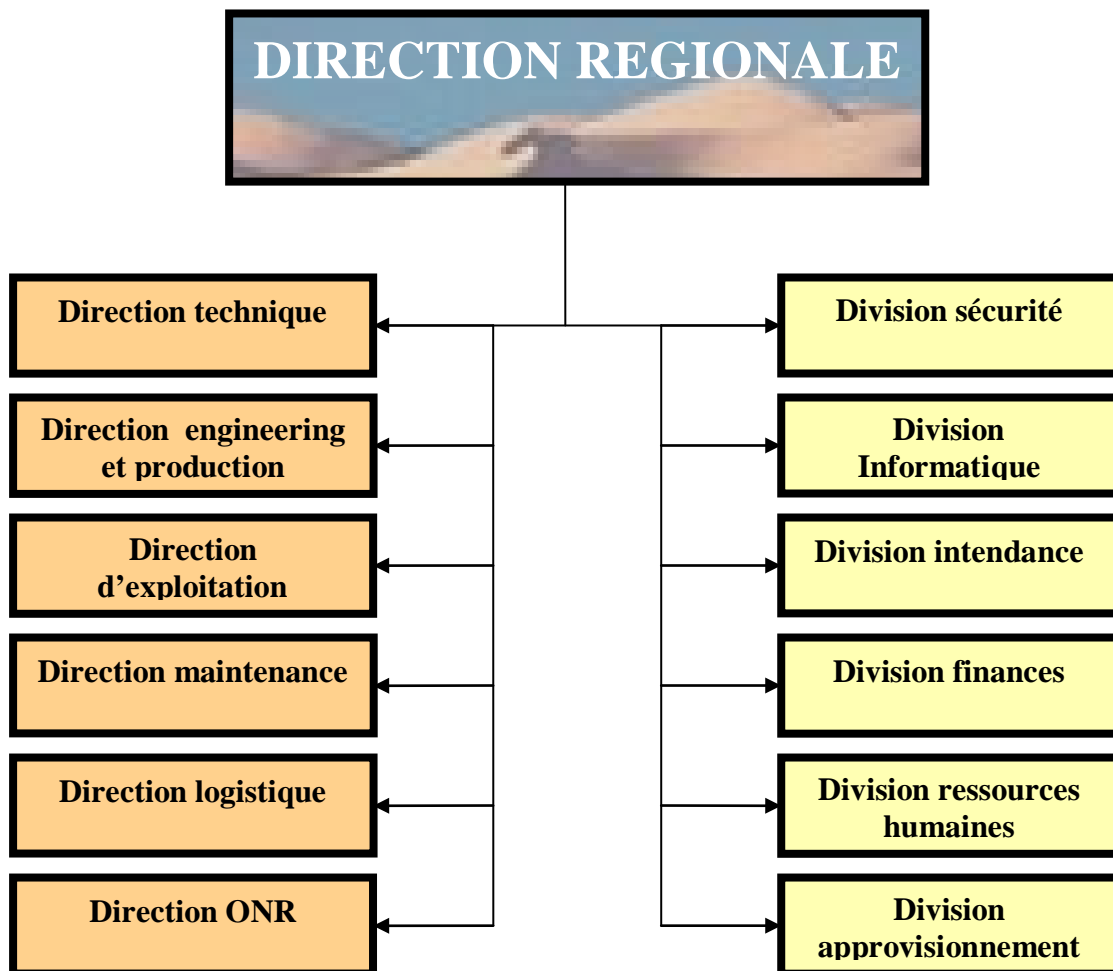


Figure (2) : Organigramme de la direction régionale de Hassi R'mel

Introduction générale

Introduction générale :

Il y'a encore quelques années, les gaz associés étaient évacués vers les torches étant donné que la structure de récupération de ces gaz n'était pas économiquement rentable.

L'installation de stations de traitement et de réinjection de gaz, comme c'est le cas à Hassi R'mel, avec l'avènement de certaines machines pouvant traiter des quantités énormes de gaz, nous permet non seulement de récupérer ces gaz mais aussi d'augmenter la production de brut.

Les machines qui se sont avérées les plus indiquées sont les compresseurs. Néanmoins, ces machines sont soumises à un problème très important à savoir le phénomène de pompage, qui est un état d'instabilité de fonctionnement entraînant des pulsations pouvant être dangereuses pour leur tenue mécanique provoquant l'inversion de la poussée axiale du rotor, des vibrations au niveau du compresseur et la rupture des ailettes suite à l'inversion du débit. Il est donc essentiel de maintenir le fonctionnement du compresseur en dehors de la zone d'instabilité.

Ce phénomène apparaît dans les zones de fonctionnement correspondant aux bas débits à l'aspiration et peut généralement avoir lieu à partir du moment où, la courbe caractéristique «taux de compression-Débit» atteint son maximum.

La stabilité d'un point de fonctionnement est assurée par l'association de la caractéristique du compresseur et celle des réseaux d'aspiration et de refoulement en même temps. Une diminution du débit d'aspiration engendre une translation de la caractéristique du réseau vers une zone d'instabilité. Une augmentation du volume de refoulement peut entraîner une recirculation du gaz dans le sens inverse de l'écoulement, ce qui peut créer des vibrations à l'intérieur du compresseur.

Pour prévenir ce phénomène, les compresseurs sont dotés de systèmes anti-pompage de régulation du débit à l'aspiration permettant de maintenir le compresseur dans un champs stable de fonctionnement en assurant, quel que soit le rapport de compression, un débit aspiré supérieur au débit correspondant au pompage en renvoyant à l'aspiration à l'aide d'une vanne de détente pilotée par un régulateur de débit, le gaz prélevé à son refoulement, ce qui provoque une grande baisse de production causée par l'ouverture permanente des vannes de recyclage.

Les solutions proposées auparavant, pour prévenir à ce phénomène n'ont pas données des résultats encourageants, car ces systèmes présentent un risque de passage en phase de pompage. En effet, ces systèmes de régulation anti-pompage présentent plusieurs inconvénients, à savoir:

- Le gaspillage du gaz à cause de l'ouverture permanente des vannes de recyclage.
- Un temps de réponse généralement assez grand des régulateurs anti-pompage.
- Création des vibrations radiales du rotor pouvant provoquer la rupture de la butée et des ailettes.
- Fonctionnement dans certains cas du compresseur dans la zone de pompage même si les vannes de recyclage sont complètement ouvertes.

D'un autre côté. La masse molaire du gaz varie fréquemment provoquant ainsi la variation de la pression dans le temps.

Tout ceci exige des moyens spécifiques de protection anti-pompage capables de s'adapter à tout changement dans les caractéristiques du système.

L'apparition et le développement de nouvelles techniques dans le domaine de l'automatisation ont provoqué des changements considérables dans la conception des systèmes de régulation. Afin de résoudre le problème du pompage et dans le souci d'améliorer les performances du système, nous avons fait appel à la commande adaptative, ce qui nous permettra de faire l'ajustement optimal du régulateur en fonction d'éventuels changements dans la dynamique en temps réel et de protéger le compresseur dans les zones de fonctionnement stables ou instables.

Ces dernière techniques peuvent dans certains cas prévenir le phénomène de pompage et donner une certaine approche de résolution du problème de l'ouverture permanente de la vanne de recyclage sous réserve d'intégration de nouveaux algorithmes qui assurent la régulation en temps réel, ce qui permet de récupérer la perte de production dans une certaine limite, tout en assurant le fonctionnement de la machine et de protéger le compresseur de tous les dangers.

Actuellement en Algérie. Plusieurs installations de traitement du pétrole et du gaz sont dotées de nouveaux systèmes tel que le DCS « Distributed Control System » et le système de control des turbocompresseurs le MARK VI (systèmes faisant appel à la technologie des micros processeurs dans le but de répartir l'intelligence entre ses différents modules opérationnels).

L'apparition des techniques adaptatives ainsi que l'introduction de ces algorithmes dans la conception du Software du MARK VI peuvent apporter une solution nouvelle à ce problème et fournir une protection du pompage plus fiable, du fait que le système MARK VI opère en temps réel et donne une haute vitesse de réponse aux signaux et aux commandes initiées par les utilisateurs.

Le but de cette étude est de maintenir le compresseur dans la zone de fonctionnement stable quel que soit le taux de compression, et ce, dans le but d'assurer un débit d'aspiration supérieur au débit de pompage. L'utilisation des techniques de la commande adaptative nous permettra d'assurer de meilleures performances en implantant un correcteur numérique permettant la protection du compresseur.

Ce travail se résume à l'implémentation de ces algorithmes dans l'automate programmable S7/300, tout aussi fiable que le MARK VI, mais l'avantage de l'automate S7/300 est la disponibilité de la documentation des automates siemens, à l'inverse du speedtronic MARK VI pour lequel on exerce toujours le secret industriel, et la possibilité de programmation directement avec GRAFCET.

Pour cela nous avons réparti notre travail en quatre chapitres :

- **Dans le premier chapitre**, on fera l'étude des systèmes de compression, nous présenterons le lieu de travail qui est la station nord (station de compression réinjection de gaz), suivi des généralités sur les turbocompresseurs ainsi que le compresseur centrifuge BCL405/C.
- **Le deuxième chapitre**, sera consacré à l'étude de fonctionnement du compresseur centrifuge avec une analyse du phénomène de pompage, et la prévention anti-pompage, enfin citer les principaux problèmes d'exploitation de ces systèmes anti-pompage.
- **Au troisième chapitre**, nous passerons; dans une première partie; à l'identification de l'ensemble du système de compression, afin de déterminer les paramètres du système en fonction d'éventuels changements de la dynamique dans ce dernier, dans la seconde partie nous ferons une synthèse du régulateur numérique, et le contrôle du compresseur avec la commande adaptative.
- **Le dernier chapitre**, sera consacré à la présentation et la description du système de contrôle, qu'est l'automate programmable industriel S7/300, avec l'implémentation de l'algorithme anti-pompage, nous utilisons le régulateur adaptatif de type PID numérique sur ce dernier.

Enfin, nous terminerons par une conclusion générale.

Chapitre I

Etude des systèmes de compression

I.1 Introduction :

Le gaz est une ressource naturelle importante qui peut être récupérée du gisement en tant que gaz naturel associé au pétrole brut. Une grande portion du gaz associé est torchée, ce qui cause une perte économique conséquente et énorme à cet effet, Sonatrach a installé des unités de compression réinjection pour récupérer le maximum de gaz.

I.2 Présentation de la station de compression nord :

I.2.1 La Fonction de la station :

La station de compression est conçue pour comprimer le gaz provenant des installations de traitement (T0, T1, T3 et T4) et le réinjecter dans le sous-sol (la nappe gazière de Hassi R'mel).

I.2.2 La réinjection a pour but de :

- Maintenir la pression du gaz dans le réseau de distribution national et international à 70Kg/cm².
- Eviter de torcher le gaz et le perdre inutilement.
- Maintenir la pression du gisement élevée, afin de récupérer le maximum de liquide (condensât et GPL).

I.2.3 Capacité de la station :

Le débit de la station est environ 3387884 m³/h ou 296940 Kg/h pour un poids moléculaire de gaz égal à 18.84 g et de 3787884 m³/h pour un poids moléculaire de 20g de gaz

I.2.4 Caractéristiques de fonctionnement :

- Altitude : 760 m
- Température été : 40°
- Température hivers : 0°
- Humidité relative : 34%

I.2.5 Les conditions de fonctionnement de la station :

Les conditions normales de fonctionnement de la station de compression nord sont :

- Pression de gaz à l'entrée de la station : 68.14 bars.
- Température du gaz à l'entrée de la station : 45° C
- Pression de gaz à la sortie de la station : 350 bars
- Température du gaz à la sortie de la station : 100° C

I.2.6 Les composantes principales de la station :

- Un pré séparateur.
- Un groupe de 04 séparateurs (parallèle) pour le gaz procès.
- Neuf turbocompresseurs premiers étage (BP).
- Neuf turbocompresseurs deuxièmes étage (HP).
- Quatre salles machinent.
- Deux postes de fuel gaz pour l'alimentation des turbines.
- Deux générateurs de gaz inerte pour les travaux de soudures et la purge.
- Quatre groupes d'aéroréfrigérateurs pour le refroidissement du gaz et de l'huile.
- Un turbogénérateur.
- Un système de distribution de l'énergie électrique.
- Une unité de transfert d'épuration de l'huile.
- Une unité de production d'air comprimé pour instruments et service.
- Un groupe de traitement d'eau.
- Une unité de refroidissement d'eau.
- Une unité de production de gaz inerte.
- Un système anti-incendie à eau.
- Un système anti-incendie par des agents chimiques.
- Un système de torche.
- Bâtiment de salle de contrôle.

La station est alimentée en énergie électrique par deux lignes à partir de Sonelgaz de 30 KW.

En cas de panne sur le réseau de la Sonelgaz la station est munie d'un turbogénérateur électrique (TGE) de puissance 3440 W qui peut alimenter les récepteurs prioritaires de la station et éviter ainsi son arrêt.

I.3 Description du circuit de gaz :

I.3.1 Section aspiration de la station :

Le gaz entre dans la station à travers le pré séparateur FA301 pour séparer d'éventuelles grosses quantités de liquide puis par les scrubbers à chicanes FA302 à FA305 pour séparer les petites particules de liquide, ensuite mesuré (débit, pression et température) et ainsi envoyé aux machines.

I.3.2 Tuyauteries d'aspiration premier étage :

Les trois premières machines sont alimentées par la ligne 52 pouces qui se réduit à 42 pouces pour alimenter trois autres machines et finalement se réduit à 30 pouces et alimente les trois dernières machines premier étage. De la même ligne (50 et 30 pouces) partent également:

La ligne 6 pouces pour prélever et traiter le gaz de démarrage pour les 18 turbines.

Les lignes 8 pouces pour prélever et traiter le gaz combustible des 18 turbines.

Les lignes 2 pouces pour la pressurisation du manifold inter étage.

I.3.3 Unité de compression premier étage:

Le gaz est comprimé à une pression de 160 bars par un compresseur centrifuge entraîné à travers un multiplicateur de vitesse à deux axes horizontaux, par une turbine à gaz bi-arbres type MS5002.

I.3.4 Réfrigérant de gaz premier étage :

Le gaz comprimé, refoulé par le compresseur première étage, est refroidi par un réfrigérant du type à "tirage induit" constitué par quatre faisceaux tubulaires à ailettes d'aluminium. L'air ambiant de refroidissement est aspiré à travers les faisceaux par un ensemble de six ventilateurs entraînés par des moteurs électriques. La transmission de puissance se fait par des courroies.

I.3.5 Séparateur de gaz premier étage:

En aval du réfrigérant premier étage le gaz passe par un séparateur de type à chicanes pour séparer la vapeur d'eau éventuelle ou bien d'hydrocarbures et condensât.

I.3.6 Collecteur inter étage:

Les refoulements des neufs compresseurs première étage, les aspirations des compresseurs deuxième étage ainsi que la ligne de décompression (mis à l'air de la ligne de torche) sont reliés au collecteur inter étage 16 pouces.

I.3.7 Unité de compression deuxième étage :

Au deuxième étage le gaz comprimé à une pression de 355 bars, par un compresseur centrifuge entraîné par une turbine identique à celle qui entraîne le compresseur première étage, grâce au multiplicateur deux axes horizontaux.

I.3.8 Réfrigérant de gaz deuxième étage :

Le gaz comprimé, refoulé par le compresseur deuxième étage est refroidi par le réfrigérant final du type "à tirage induit " constitué par deux faisceaux tubulaires à ailettes d'aluminium. L'air ambiant de refroidissement est aspiré à travers les faisceaux par un ensemble de trois ventilateurs entraînés par des moteurs électriques. La transmission de puissance se fait par des courroies.

I.3.9 Collecteur final:

Les tuyauteries (12 pouces) de refoulement des compresseurs deuxième étage, sont reliées au collecteur final de la station.

La décompression du collecteur final en cas de secours ou d'arrêt normal est obtenue par la vanne de mise à l'air VV351, qui évacue le gaz sur la ligne de torche 20-V-3004.

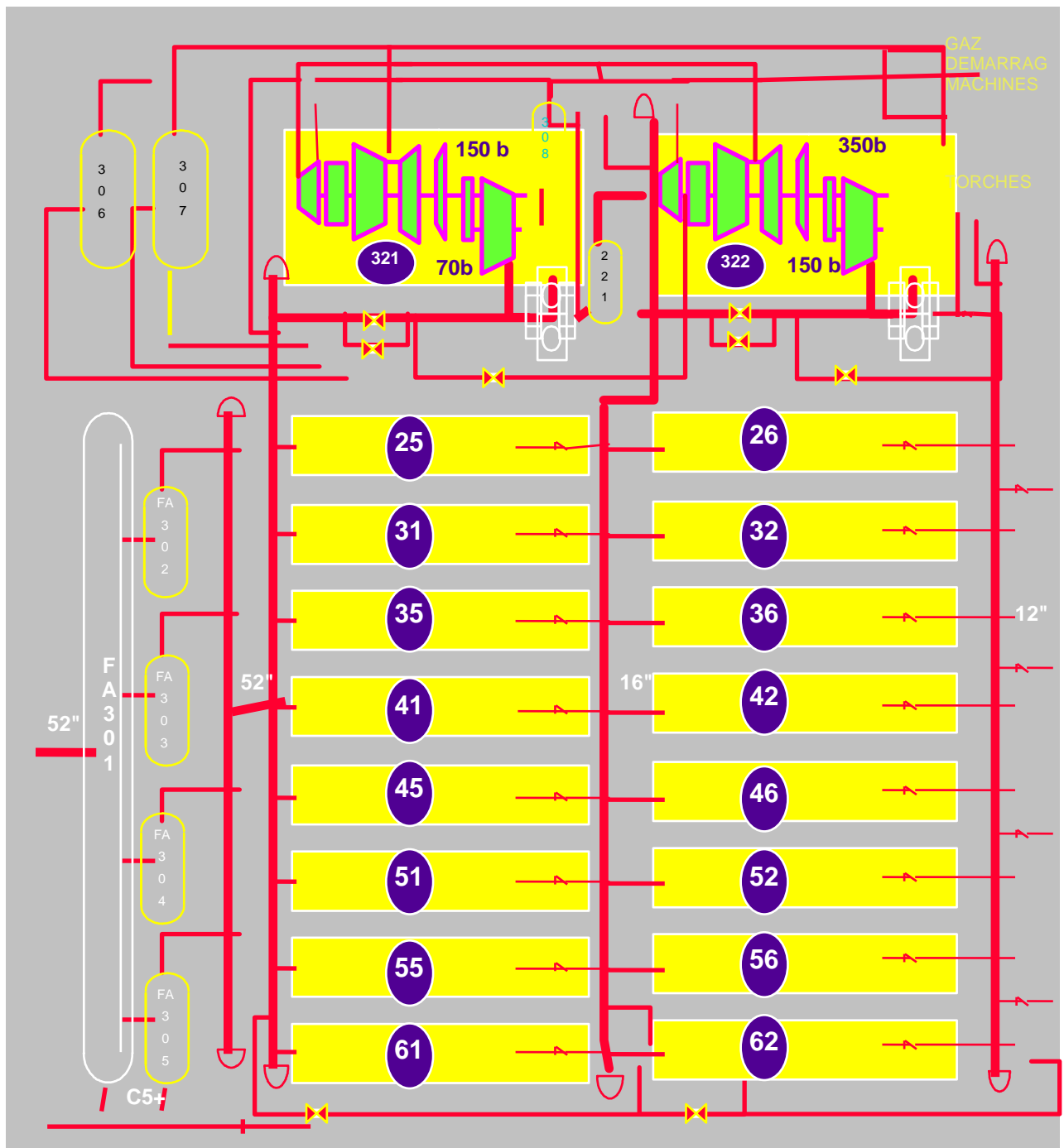


Schéma I.1 Station nord : compression réinjection de gaz

I.4 Généralités sur les turbines a gaz :

I.4.1 Définition :

La turbine à gaz est une machine productrice d'énergie, elle utilise des fluides compressibles.

L'énergie thermique et de pression sera transformée en énergie cinétique puis en énergie mécanique. Le travail et la puissance fournie à l'arbre sont fonctions des propriétés thermodynamiques du fluide et de la machine elle-même.

La turbine à gaz peut être considérée comme une machine autonome, grâce à son compresseur axial et ses chambres de combustion, elle est en mesure de produire du fluide sous pression.

I.4.2 Présentation d'une turbine à gaz (type MS 5002B) :

La turbine à gaz MS5002B NUOVO-PIGNONE est une turbine à gaz d'entraînement à deux arbres qui fonctionne suivant un cycle simple. Elle est employée pour entraîner un compresseur centrifuge.

La portion d'une turbine à gaz pour entraînement mécanique est la partie dans laquelle le fuel et l'air sont utilisés pour produire une puissance sur l'arbre.

Cette turbine possède deux roues de turbine indépendantes mécaniquement. La roue de turbine du premier étage haute pression, entraine le rotor du compresseur d'air, du type axial à seize étages, et l'arbre entraînant les accessoires (pompes de lubrification et hydraulique).

La roue de la turbine du second étage, ou étage basse pression, entraine la charge (compresseur centrifuge).

Les deux roues de la turbine ne sont pas liées afin de leurs permettre de travailler à des vitesses différentes pour s'adapter aux variations de charge.

Les roues sont refroidies par l'air extrait du dixième étage du compresseur axial.

Ce modèle de turbine implanté au niveau de HASSI R'MEL a été prévu pour un fonctionnement au gaz naturel.

I.4.3 Conception :

La turbine à gaz est une machine à écoulement continu, composée de trois composants principaux: compresseur, chambres de combustion, et turbine.

* Le compresseur : La fonction principale du compresseur est de comprimer l'air atmosphérique à une pression plus élevée.

* La chambre de combustion : L'air haute pression en provenance du compresseur y est mélangé avec le combustible, et le mélange est allumé, le produit de cette combustion est une veine de gaz chauds à haute pression.

* La turbine : les gaz chauds à haute pression s'y détendent en produisant du travail pour entraîner, d'une part le compresseur de la turbine à gaz et d'autre part la charge.

I.4.4 Caractéristiques:

- Puissance délivrée estimée 35000 CV

(Condition ISO, +15,760mmHg)

- Compresseur axial :

- Nombre d'étage 16

- Vitesse de rotation 5100 tr/mn

- Turbine :

- Nombre d'étages 2

- Vitesse de rotation 1^{er} étage 5100 tr/mn

- Vitesse de rotation 2^{ème} étage 4670 tr/mn

- Nombre de chambres de combustion 12

- Température gaz d'échappement 500°C

- Combustible gaz naturel

- Système de lancement turbine de détente

- Commande et contrôle armoire speedtronic

- Machine entraînée compresseur centrifuge

- Sens de rotation d'une montre en regardant vers l'échappement

I.4.5 Principe de fonctionnement :

Le Rotor turbine du compresseur haute pression, est tout d'abord lancé à 20% de sa vitesse nominale par un dispositif de démarrage.

L'air atmosphérique aux conditions de température et de pression ambiante est aspiré et comprimé par le compresseur axial à 16 étages puis acheminé vers les chambres de combustion.

La combustion à pression constante se produit continuellement jusqu'à ce que le combustible soit sectionné, on obtient ainsi des gaz chauds sous pression dont la détente à travers les roues de la turbine jusqu'à atteindre la pression atmosphérique, effectuant la transformation de l'énergie thermique en énergie mécanique.

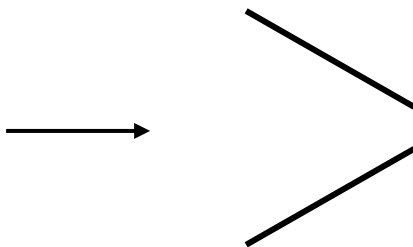
La détente se produit sur deux étages à travers deux roues indépendantes mécaniquement, la première roue dite roue HP et destinée uniquement à l'entraînement du compresseur axial et les accessoires attelés à l'arbre tandis que la deuxième roue dite roue BP (roue de puissance) est reliée à la charge.

L'emploi de deux roues de turbine séparées permet aux deux arbres de tourner à des vitesses différentes pour répondre aux exigences de charge variable du compresseur centrifuge tout en permettant au générateur de gaz haute pression de fonctionner à la vitesse nominale du compresseur axial.

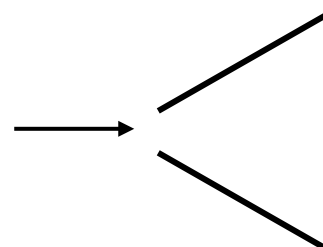
Définition des opérations principales du cycle de la turbine à gaz :

- Tuyère : c'est un dispositif qui transforme un jet de gaz de pression élevée à faible vitesse en un jet de forte vitesse à faible pression (voir fig. I.1).

- Diffuseur : un diffuseur est un dispositif qui transforme un jet de gaz à grande vitesse sous relativement basse pression en un écoulement de vitesse inférieure et de pression supérieure (voir fig. I.2).



(Fig. I.1)



(Fig. I.2)

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA TURBINE A GAZ

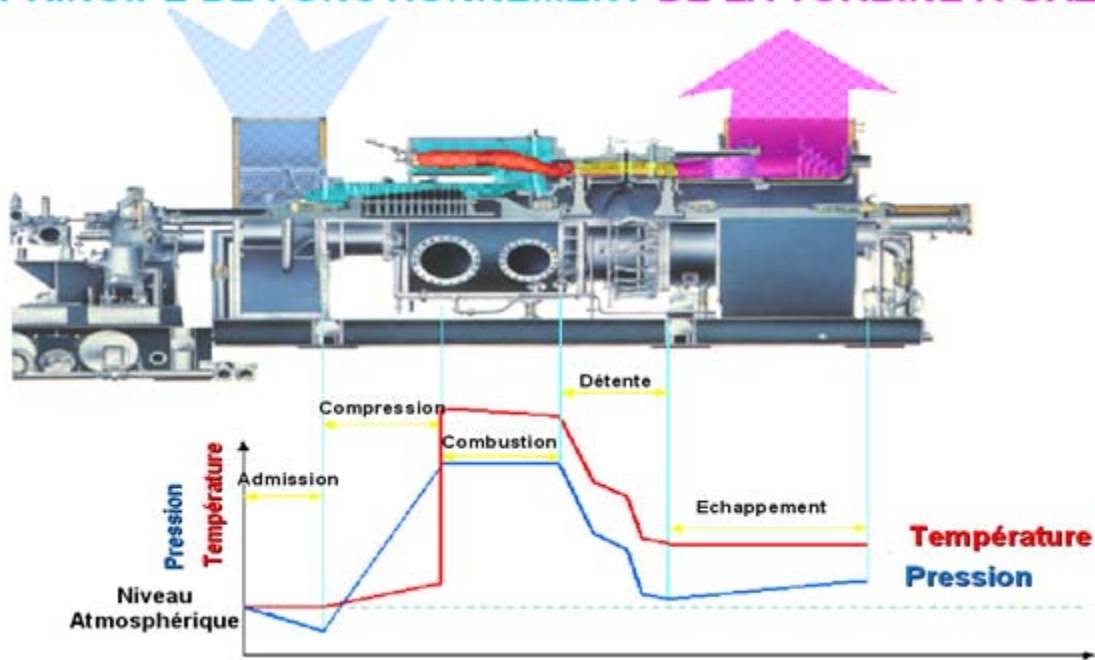


Schéma I.2 principe de fonctionnement de la machine

I.5 Description générale des compresseurs :

I.5.1 Définition :

Les compresseurs sont des appareils qui transforment l'énergie mécanique fournie par une machine motrice en énergie de pression; (en réalisant un accroissement de pression d'un fluide à l'état gazeux).

I.5.2 But de la compression :

La compression en générale, peut être imposée par la nécessité technique de déplacer une certaine quantité de gaz d'un système à une certaine pression, vers un autre système à une autre pression plus élevée.

Cette opération a pour but de:

- Faire circuler un gaz dans un circuit fermé.
- Produire des conditions favorables (de pression) pour des réactions chimiques.
- Envoyer un gaz dans un pipe-line de la zone de production vers l'utilisateur.
- Obtenir de l'air comprimé pour la combustion.
- Récupérer du gaz (unités de réinjection ou autres).

I.5.3 Classification des compresseurs :

Les compresseurs peuvent être classés selon plusieurs caractéristiques:

- Le principe de fonctionnement (volumétrique, turbocompresseur).
- Mouvement des pièces mobiles (mouvement linéaire, rotatif).
- Les compresseurs d'air.
- Les compresseurs des gaz.

En général il existe deux grandes familles de compresseurs, les compresseurs volumétriques et les turbocompresseurs. Dans les premiers, l'élévation de la pression est obtenue en réduisant un certain volume de gaz par action mécanique, dans les seconds, on augmente la pression en convertissant de façon continue l'énergie cinétique communiquée au gaz en énergie de pression due à l'écoulement autour des aubages dans les roues.

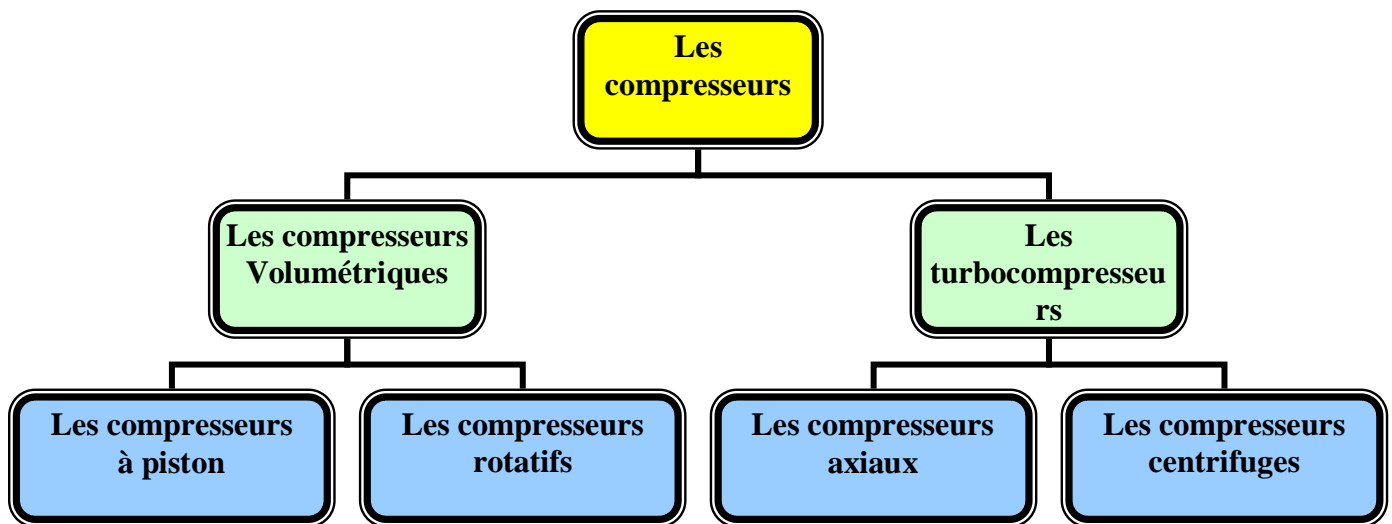


Fig. I.3. Classification des compresseurs

D'après leurs principes de fonctionnement, on distingue les types de compresseurs suivants:

I.5.4 Compresseurs volumétriques :

a. Compresseurs à piston :

Ces compresseurs réalisent la compression du gaz par réduction du volume qui lui est offert. La variation du volume et le déplacement du gaz est obtenu par le mouvement alternatif d'un piston à l'intérieur d'un cylindre. On classe les compresseurs à piston d'après les différents indices:

- Disposition des cylindres (horizontale, verticale).
- Nombres des cylindres (monocylindrique, ...).
- Méthode de refroidissement (air, eau).
- Méthode de graissage (barbotage, sous pression,...).

b. Compresseurs rotatifs volumétriques :

Ces compresseurs tels que les compresseurs à piston compriment les gaz par réduction du volume. Parmi ces appareils :

- Les uns réalisent la compression progressivement dans une capacité fermée de volume, décroissant suivant un cycle semblable à celui qui est obtenue dans les compresseurs à piston.
- Les autres transportent les gaz d'une enceinte à basse pression à une autre à pression élevée, le cycle est alors tout à fait différent.

Parmi les compresseurs rotatifs on distingue:

- compresseurs à palettes mobiles;
- compresseurs à anneau liquide;
- compresseurs à rotors hélicoïdaux.

I.5.5 Les turbocompresseurs :

Dans les turbocompresseurs, l'élévation de la pression résulte précisément d'une action sur la vitesse du fluide. Ici encore, l'énergie nécessaire au fonctionnement du compresseur est dépensée sous forme de travail, celui-ci est transformé sous forme d'énergie cinétique au fluide à comprimer, et cette dernière à son tour est transformée en pression. La mise en vitesse est obtenue en soumettant le fluide à l'action des roues à aubes ayant une grande vitesse rotative.

Ces machines assurent la compression grâce à la force centrifuge, due au mouvement de rotation des roues munies d'aubes ou d'ailettes.

Les turbocompresseurs sont divisés en:

a. Compresseurs centrifuges :

Les turbocompresseurs peuvent être des compresseurs centrifuges (fig. I.4), dans lesquels le parcours du gaz dans les roues est dirigé du centre vers la périphérie. Donc l'énergie de gaz comprimé augmente grâce à la force centrifuge qui est provoquée par le mouvement de rotation des roues des aubes. Les compresseurs centrifuges sont employés pour des hauteurs manométriques élevées.

b. Compresseurs axiaux :

Les compresseurs axiaux comme les compresseurs centrifuges, sont des turbocompresseurs, L'accroissement de la pression résulte d'une action sur la vitesse de fluide. Le travail fourni par la turbine sous forme d'énergie mécanique transmise à l'aube du compresseur est transformé en énergie cinétique du gaz à comprimer grâce à la rotation des aubes; celle-ci est à son tour transformée en énergie de pression dans le diffuseur.

Chaque étage est constitué par une rangée d'aubes fixes, et une rangée d'aubes mobiles, disposées en un même cylindre. Les compresseurs axiaux sont utilisés pour les grands débits.

I.6 Description générale du compresseur centrifuge :

Le compresseur centrifuge est une machine dynamique à écoulement continu de fluide. Des roues solidaires à l'arbre fournissent de l'énergie à ce dernier. Une partie de cette énergie est transformée en augmentation de pression directement dans les roues, le reste dans le stator, c'est à dire dans les diffuseurs.

Bien que la théorie des compresseurs centrifuges soit connue avec plus ou moins de raffinement; depuis fort longtemps; ce n'est qu'aux alentours 1945-1950 que leur utilisation industrielle à grande échelle commença. Actuellement le fait est établi que leur production excède celle des compresseurs alternatifs.

Très succinctement les raisons sont les suivantes :

- La taille des usines chimiques augmente continuellement d'où des volumes de gaz à comprimer de plus en plus importants ; ce qui est à l'avantage des compresseurs centrifuges.
- Du fait des vitesses élevées de rotation, le volume du compresseur ; donc son prix est inférieur à celui des compresseurs alternatifs :

Il faut généralement plusieurs compresseurs alternatifs pour remplacer un seul compresseur centrifuge.

- La compression se fait à sec sans huile dans le gaz.
- Les pulsations de pressions sont faibles d'où en principe des massifs de fondation moins onéreux.

Bien étendu les compresseurs centrifuges ont aussi quelques inconvénients par rapport à ceux alternatifs, leurs rendements sont inférieurs, de l'ordre de 5% à 15% suivant les cas :

- Leur exploitation demande une main d'œuvre très qualifiée et capable de discerner, dans un but préventif les causes provoquant le changement de la machine en cours d'exploitation : par

exemple, les causes possibles d'évolution du niveau des vibrations du rotor. Les contrôles et la surveillance systématique de ces machines, jouent un grand rôle dans leur fiabilité.

I.6.1 Compresseur BCL:

Ce sont des compresseurs du type "barrel" prévoyant un seul étage de compression.

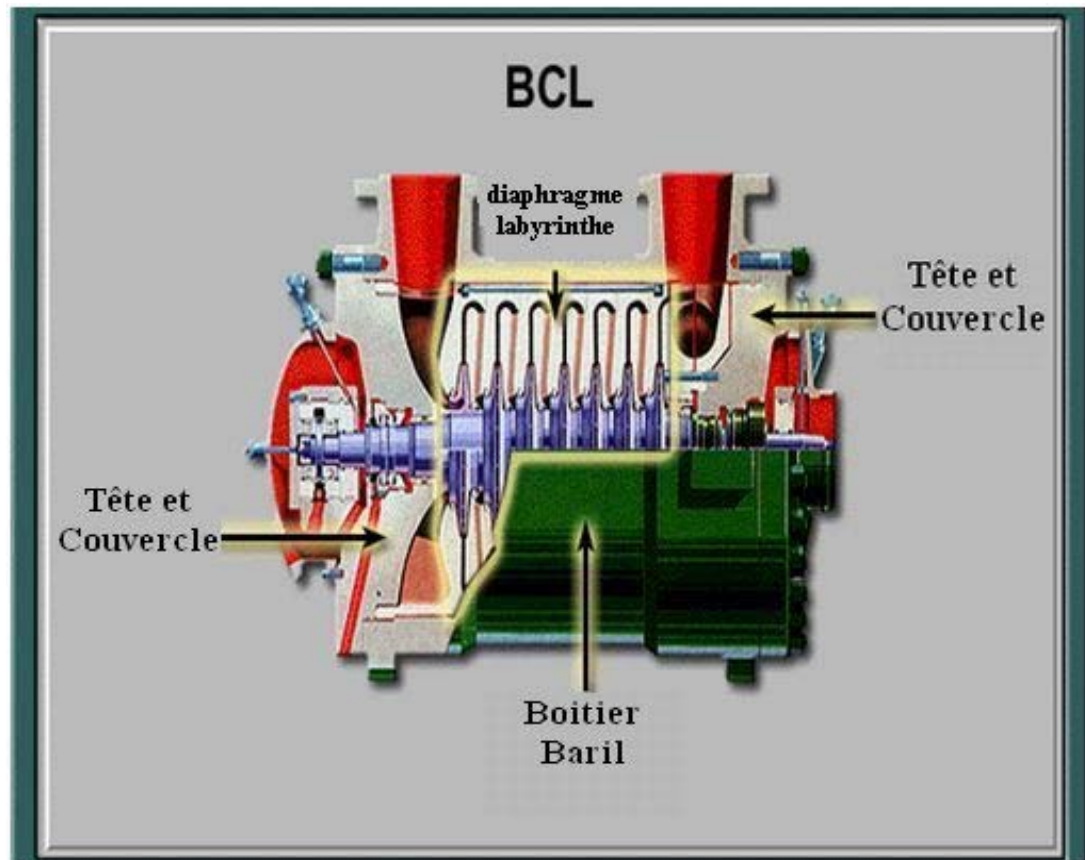


Figure. I.4 Compresseur BCL

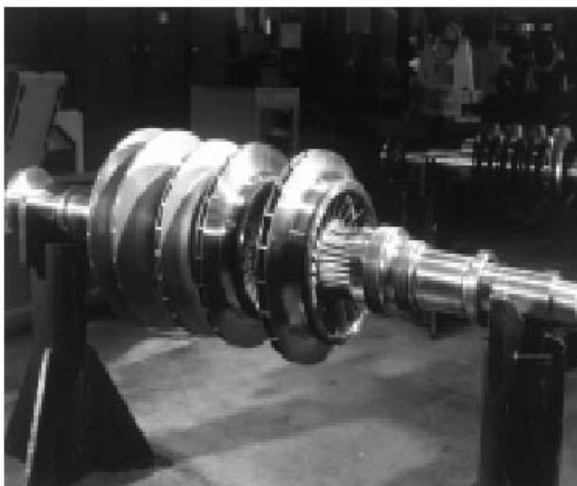


Fig. I.5 : Rotor d'un

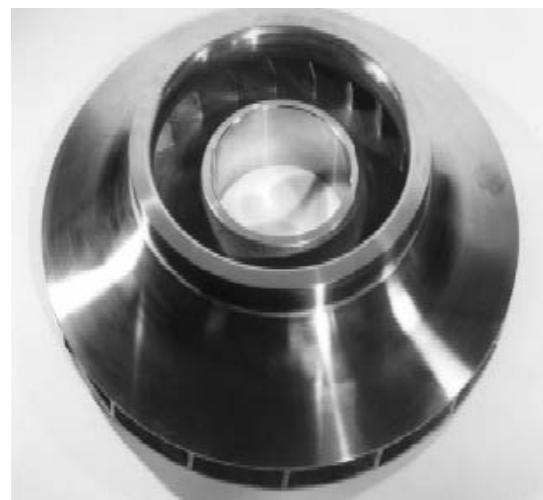


Fig. I.6 : Une roue

I.6.2 Classification des compresseurs centrifuges :

Les compresseurs centrifuges ont des formes différentes en fonction du service pour lequel ils doivent être utilisés, et en fonction de la pression nominale.

La signification des symboles de code du compresseur BCL405/A ou C est la suivante :

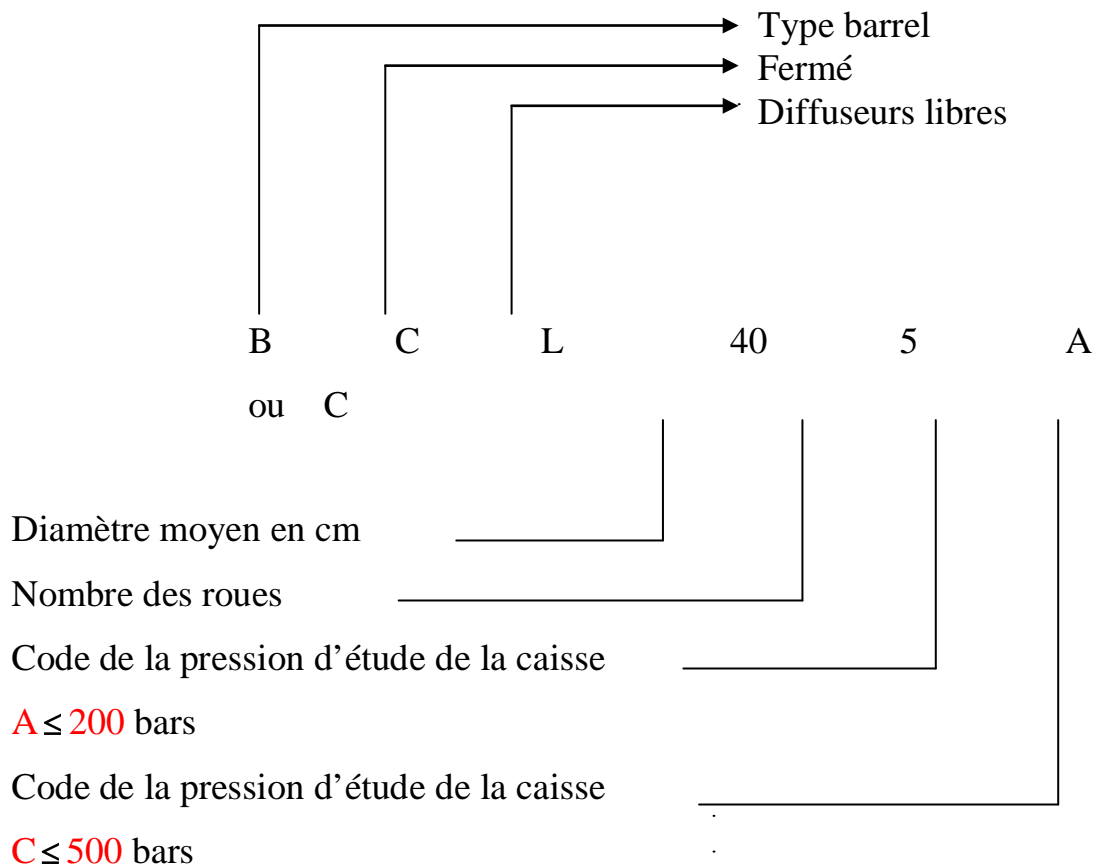


Fig. I.7 Classification des compresseurs BCL

I.6.3 Constitution des compresseurs centrifuges :

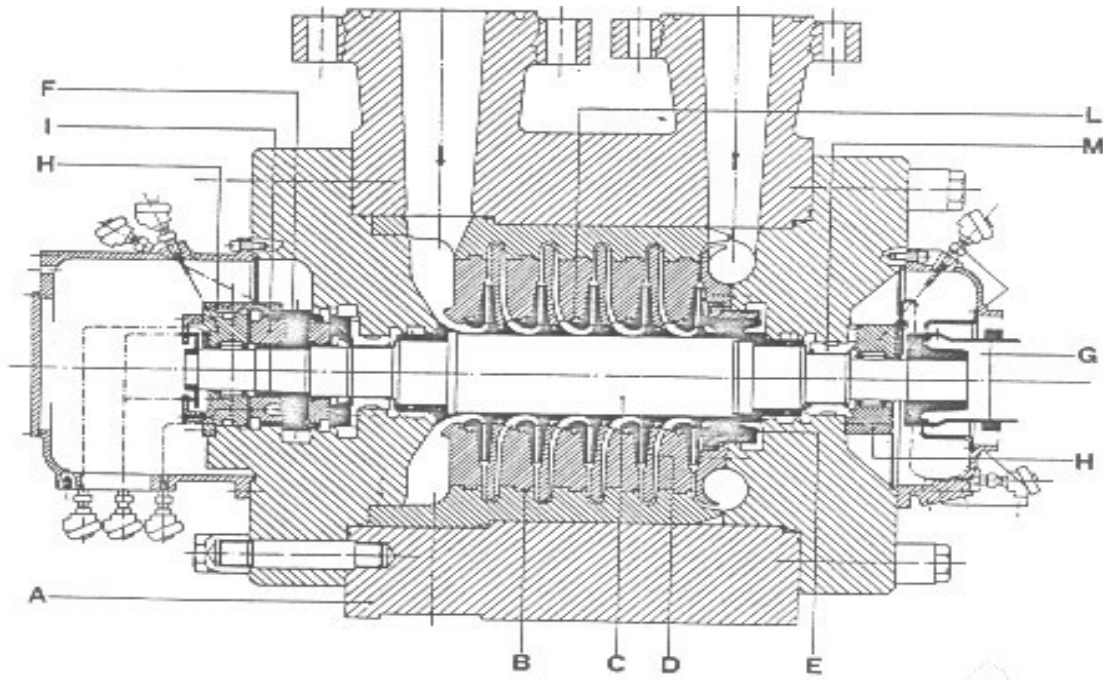


Figure I.8 Constitution des compresseurs centrifuges

A- corps extérieur

I- palier de butée

B- diaphragmes

L- labyrinthe

C- arbre

D- roues

E- piston d'équilibrage

F- collet du palier de butée

G- rotor

H- Paliers porteurs

I.7 Définition des grandeurs physiques concernant la compression :

Comme les pompes centrifuges, les compresseurs centrifuges sont destinés à Comprimer un fluide, ils développent une « Hauteur » de fluide, exprimée généralement en mètres ou fret, égale à $\int V dp$. La hauteur dans les différentes transformations : adiabatiques, polytropiques est:

I.7.1 Hauteur réelle, H_{eff} :

La hauteur réelle d'un compresseur est le travail effectif ou réel d'échange entre le fluide et le milieu extérieur par unité de poids de gaz sur la base de cette supposition la hauteur réelle sera exprimée par la relation :

$$H_{eff} = \int_{P_1}^{P_2} V dp + La$$

$$H_{eff} = h_2 + h_1 + Q_e \quad \text{Ou bien par :}$$

h_2-h_1 : différence d'enthalpie

Q_e : Quantité de chaleur

Cette dernière relation dans l'hypothèse, très près des conditions réelles, dans le cas où la transformation est adiabatique : $Q=0$: $H_{eff} = h_2-h_1$

I.7.2 Hauteur adiabatique :

La hauteur adiabatique H_a exprimée par la relation suivante :

$$PV = RT \quad \text{Avec :} \quad H_a = \int_{P_1}^{P_2} V dp$$

Pour les gaz parfaits.
$$H_a = \frac{\gamma}{\gamma-1} RT_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]$$

Si le gaz n'est pas parfait l'équation d'état devient $PV=ZRT$

$$H_a = \frac{\gamma}{\gamma-1} ZRT_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]$$

Et avec :

Z : compressibilité moyenne entre les états $P_1 T_1$ et $P_2 T_2$.

Rapport des chaleurs spécifiques. γ

R : constante de gaz

I.7.3 Hauteur Poly tropique H_{pol} :

La hauteur poly tropique est l'énergie qui est accumulée dans le fluide sous forme d'accroissement d'énergie potentielle thermodynamique exprimée par : $H_{pol} = \int_{p1}^{p2} v dp$ on a :

$PV^n = \text{Constante}$ (transformation poly tropique) alors :

$$H_{pol} = \frac{n}{n-1} Z_1 R T_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

Z_1 : facteur de compressibilité calculé aux conditions initiales

R : constante caractéristique du gaz

T_1 : température du gaz à l'aspiration

n : exposant de la transformation polytropic

I.7.4 Rendement poly tropique :

C'est le rapport entre l'hauteur poly tropique et l'hauteur réelle.

$$\eta_p = \frac{RT_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]}{J(h_2 - h_1)} \cdot \frac{n-1}{n}$$

I.7.5 La puissance absorbée par le compresseur :

C'est le travail réel spécifique $L_{1,2}$, qui est donné par la relation suivante :

$$L_{1,2} = \frac{H_p}{\eta_p} = \frac{H_a}{\eta_a} = H_{eff}$$

I.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté dans la première partie, le champ de Hassi R'mel avec une description générale de l'unité de compression réinjection (station nord) le lieu de travail, nous avons aussi abordé dans la deuxième partie de ce chapitre des généralités sur les turbines à gaz et les compresseurs dans l'industrie pétrolière.

Le chapitre suivant est consacré au phénomène de pompage et aux moyens de protection installés sur les compresseurs centrifuges.

Chapitre II

*Phénomène de pompage et prévention anti
pompage*

II.1 Introduction :

Dans les compresseurs centrifuges ou même axiaux à une vitesse de rotation bien déterminée, si on réduit suffisamment le débit d'aspiration, on atteint une zone de fonctionnement instable dite zone de pompage, dans laquelle, on obtient des oscillations fortes pouvant entraîner des risques importants. Dans ce cas, ce dernier ne peut plus pomper contre la hauteur de pression présente, alors on aurait un inversement du sens d'écoulement ce qui produit une chute de la hauteur de pression du point de vue physique.

L'adaptation du compresseur à des conditions de fonctionnement variées doit être réalisée de manière à lui assurer dans tous les cas une marche stable, c'est-à-dire en dehors de la zone de pompage.

II.2 Etude du phénomène de pompage dans le compresseur :

II.2.1 Position du problème :

Le fonctionnement d'un compresseur n'est stable que dans certaines limites et qu'en dehors de la zone de pompage, la marche de la machine est accompagnée par des pulsations pouvant être dangereuses pour la tenue mécanique du compresseur.

Le but de la régulation anti-pompage est de maintenir le compresseur dans la zone de fonctionnement stable quelque soit le taux de compression, et ceci dans le but d'assurer un débit d'aspiration supérieur au débit de pompage.

II.2.2 Pompage des compresseurs :

Le pompage est un phénomène fondamental propre aux compresseurs dynamiques. Ces machines sont caractérisées par le fait que la compression est obtenue par échange d'énergie dans le gaz mis en mouvement dans des rangées d'ailettes. Le pompage est cette instabilité aérodynamique d'ensemble du compresseur dans son environnement, lors du fonctionnement à petit débit. Quand le réseau de refoulement s'est suffisamment vidé dans l'aspiration, le compresseur trouve de nouvelles conditions de fonctionnement lui permettant de rétablir le débit dans la bonne direction jusqu'à ce qu'un nouveau cycle d'instabilité recommence.

II.2.3 Courbe de rendement et de puissance :

Le constructeur fournit des conditions d'aspiration (pression, température, débit...) à un gaz donné; de courbes « taux de compression/débit massique » ; Pour les vitesses opératoires envisagées, comme dans le cas de notre compresseur BCL 405/C.

On peut avoir ce graphe qui représente le rapport de pression en fonction du débit. Comme on peut avoir la même caractéristique si on prend $P_2=f(Q_1)$.

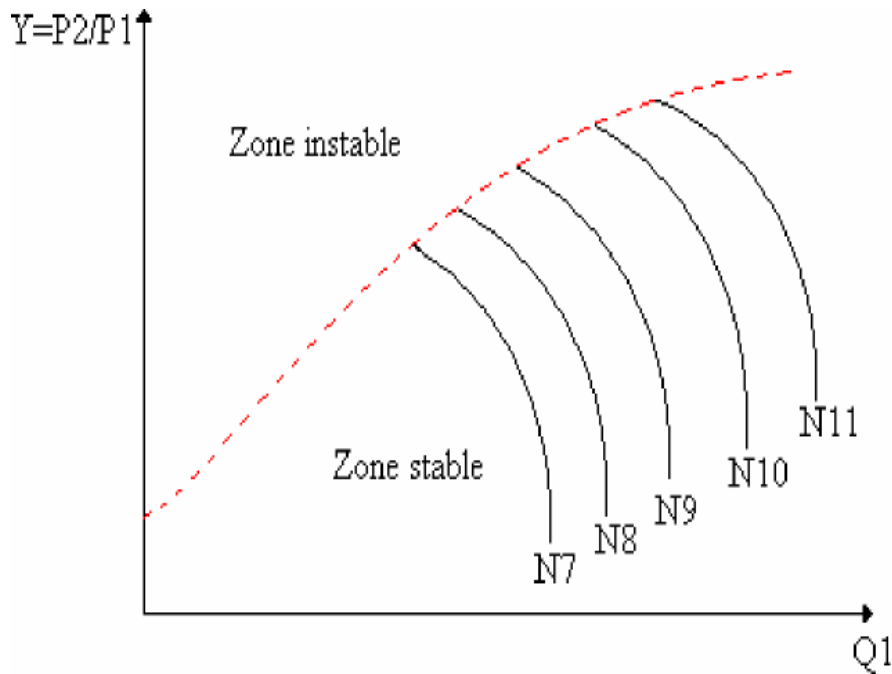


Figure II.1 Courbes caractéristiques du compresseur

II.2.4 Point de fonctionnement du compresseur :

Le point de fonctionnement du compresseur se situe à l'intersection de sa caractéristique propre de compression et de celle du réseau. En fait, ce type de représentation, tout à fait conventionnelle, est trompeur pour comprendre le fonctionnement réel de la machine. Il y a lieu de bien réaliser que, physiquement, c'est le rapport de pression imposé au compresseur par les réseaux amont et aval qui fixe le débit. Les pressions dans chaque réseau d'aspiration ou de refoulement sont en fonction de : son volume, la masse de gaz incluse dans ce volume et des conditions thermodynamiques du gaz.

II.2.5 Stabilité du point de fonctionnement :

Cette étude a pour but de déterminer les différents cas de fonctionnement possible du compresseur pendant sa marche ainsi que les performances avec les perturbations extérieures.

Afin de démontrer que le pompage est bien une instabilité d'ensemble du compresseur dans ses réseaux, on va s'intéresser à la configuration de la figure II.2.

Le compresseur aspire à des conditions P_0 , T_0 constante et refoule en R à travers une tuyauterie (surface S_T , longueur L_T) où est concentrée l'énergie cinétique, dans une chambre de grand volume V_c où la vitesse est négligeable.

L'ensemble des pertes de charge est concentré à la sortie constituée par un orifice (surface S_0), ramenant le fluide à la pression P_0 . Pour étudier le régime de fonctionnement à

l'intersection de la caractéristique du compresseur et celle du réseau, il faut supposer que, pour une raison quelconque, une perturbation ait été introduite, et on s'intéressera à l'évolution de la pression P_c dans la chambre, en fonction du débit Q_r refoulé par le compresseur.

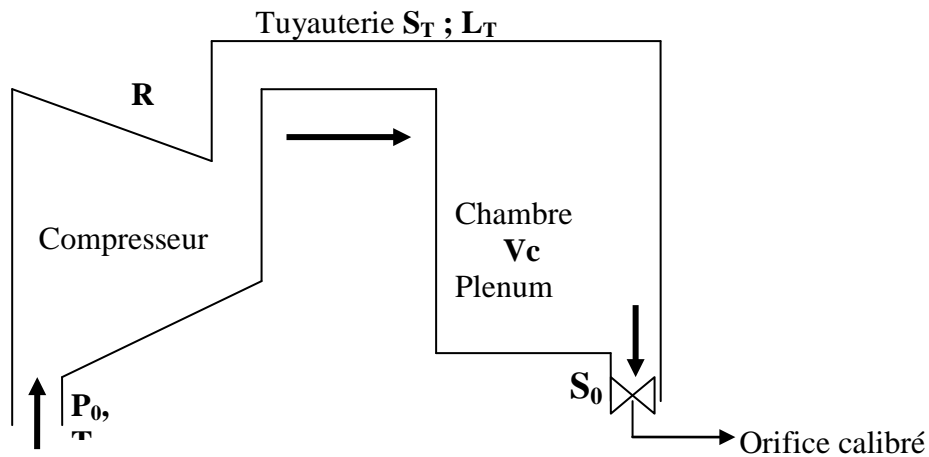


Figure II.2 le compresseur avec ses périphériques

La figure II.3 montre la caractéristique du compresseur, celle du réseau, le point de fonctionnement et la perturbation introduite sur la pression P_c .

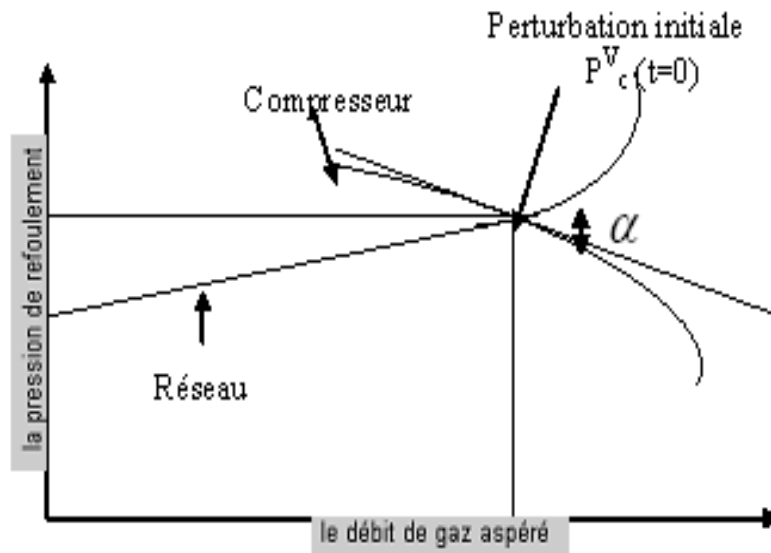


Figure II.3 la perturbation initiale sur le point de fonctionnement

II.3 Analyse du phénomène de pompage :

Supposons que le compresseur fonctionne à vitesse constante $N=constante$, donc pratiquement à vitesse réduite constante.

Le point de fonctionnement est donc sur une des courbes précédentes (figure II.4).

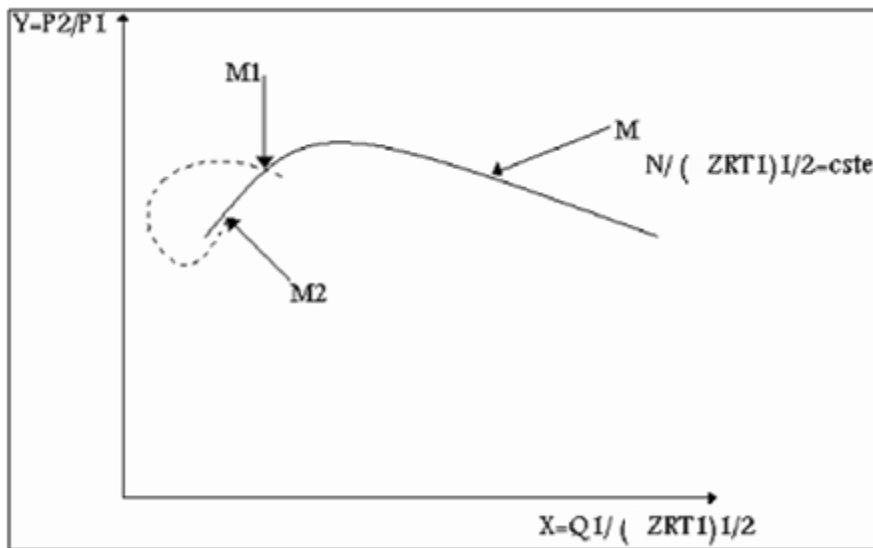


Figure II.4 Le point de fonctionnement d'un compresseur

D'après la figure, si le compresseur fonctionne en M, à droite du maximum, tout est normal, mais si le point de fonctionnement est en M1 à gauche du maximum, le fonctionnement est forcément instable. En effet, une petite diminution du débit par exemple, fera passer le point M1 en M2 et fera donc chuter le taux de compression, la pression aval du récepteur deviendra supérieure à cette pression de sortie. Il en résultera que le gaz va tendre à circuler en arrière dans le compresseur. Un changement de débit rétablira le taux de compression et le point reviendra en M1 en suivant la courbe représentée en pointillé sur la figure précédente. Et le cycle recommencera constamment. L'amplitude et la fréquence de pompage dépendent des caractéristiques du compresseur.

Le lieu des sommets des courbes de vitesse réduite constante indique donc la limite de la zone de pompage : on l'appelle la courbe de pompage la figure.

II.3.1 Dangers et remèdes :

Le pompage des compresseurs est un phénomène très redouté par les exploitants et les constructeurs car il entraîne des pulsations pouvant être dangereuses pour la tenue mécanique du compresseur et qui provoque :

- Des efforts de torsion alternés sur le rotor.
- D'inversion des poussées axiales du rotor.
- Des vibrations de très basse fréquence de l'ensemble du compresseur.

Pour éviter le phénomène de pompage, il faut utiliser des systèmes de protection comportant au moins des vannes, de l'instrumentation de mesure et un système de commande. En cas de

diminution du débit consécutif à l'augmentation d'un rapport de pression, ce dispositif à pour but :

- Soit d'augmenter artificiellement le débit traversant la machine.
- Soit de diminuer le rapport de pression.

II.3.2 Régulation anti-pompage :

Pour les raisons déjà montrées dans le paragraphe précédent, il est nécessaire d'installer un système de protection contre le pompage pour éviter les conséquences catastrophiques de ce phénomène.

II.3.3 Principe de la régulation anti-pompage :

La tâche de la régulation anti-pompage est de maintenir le compresseur dans le champ stable de fonctionnement en assurant quelque soit le rapport de compression un débit d'aspiration supérieur au débit correspondant au pompage.

On peut considérer trois cas de système anti-pompage classiques auxquels on peut ajouter des variantes s'y rattachant :

- ✓ protection par débit minimum.
- ✓ protection par une parabole passant par l'origine.
- ✓ protection par une parabole passant par $Y=1$.

II.3.4 Loi de commande anti-pompage :

On a déjà vu que le lieu des points de pompage aux différentes vitesses (sur le plan du rapport de pression débit volumétrique aspiré) est une parabole.

En effet à chaque vitesse pour le point de pompage on appliquera les lois :

$$Q=K_1 \cdot N \quad (1)$$

$$H_p=K_2 \cdot N^2 \quad (2)$$

Des équations 1 et 2 en remplaçant N , on obtient l'équation de la courbe de pompage :

$$H_p=K_3 Q^2 \quad \text{avec } K_3=K_2 / (K_1)^2 \quad (3)$$

On sait que la hauteur polytropique est donnée par la formule suivante :

$$H_p = Z_1 R T_1 \frac{n}{n-1} \left(\rho^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) \quad (4)$$

Au cas où le débit aspiré serait mesuré avec un orifice calibré, on aura :

$$Q_1 = \beta \sqrt{\frac{h_1}{\gamma_1}} \quad (5)$$

Où : h_1 = perte de charge de l'orifice.

$$Q_1 = \beta \sqrt{\frac{h_1 \cdot R \cdot Z_1 \cdot T_1}{P_1}} \quad (6)$$

En remplaçant dans l'équation (5), la valeur de γ_1 donnée par l'équation (6) on a :

$$Q_1 = \beta \sqrt{\frac{h_1 \cdot R \cdot Z_1 \cdot T_1}{P_1}} \quad (7)$$

Où h_1 est en Kg/cm².

En remplaçant encore une fois l'équation (4) et l'équation (7) dans l'équation (3)

$$Z_1 \cdot R \cdot T_1 \cdot \frac{n}{n-1} \left(\rho^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) = K_3 \beta^2 \frac{h \cdot R \cdot Z_1 \cdot T_1}{P_1} \quad (8)$$

En simplifiant on obtient:

$$\frac{1}{K_3 \cdot \beta^2} \cdot P_1 \frac{n}{n-1} \left(\rho^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) = h_1 \quad (9)$$

D'après cette formule on voit que, pour éviter le pompage, quelles que soient les conditions d'aspiration ou de vitesse de la machine, il suffit de faire en sorte que :

$$\frac{h_1}{P_1 \frac{n}{n-1} \left(\rho^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right)} > \frac{1}{K_3 \cdot \beta^2} \quad (10)$$

L'inégalité (10) est importante pour les raisons suivantes :

- elle est indépendante de la vitesse du compresseur.

Elle demande seulement la mesure de la perte de charge de l'orifice calibré (h) Sans aucune compensation de pression, température, composition de gaz, ou linéarisation.

- elle est influencée par la composition du gaz seul à travers « n » dont la Variation à

toutefois peu d'influence sur la quantité : $\frac{n}{n-1} \left(\rho^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right)$

En somme, l'inégalité (10) utilise le rapport de compression sensible aux conditions d'aspiration et vitesse, pour compenser le débit. Bien que considérablement simplifiée, l'inégalité (10) est encore trop compliquée pour être réalisée avec une instrumentation très simple. Si le rapport de compression est suffisamment mono et deux étages.

Il est possible de remplacer la quantité : $\frac{n}{n-1} \left(\rho \frac{n-1}{n} - 1 \right)$

Avec la quantité $(\rho - 1)$ sans commettre une grosse erreur.

Par conséquent (10) devient $\frac{n}{n-1} \left(\rho \frac{n-1}{n} - 1 \right)$

Si l'on indique
$$\frac{h_1}{P_1(\rho - 1)} = K_4 \quad (11)$$

Où
$$K_4 > \frac{1}{K_3 \beta^2} \quad (12)$$

L'équation (11) peut aussi être écrite comme suit :

$$\frac{h_1}{P_1} = K_4 \frac{\Delta P}{P_1} \quad (13)$$

D'où
$$h_1 = K_4 \Delta P \quad (14)$$

Cette relation définit l'allure de la ligne limite de pompage (**SLL**) et met en évidence l'extrême simplicité d'un tel système anti-pompage qui, avec deux seuls instruments installés sur site (deux transmetteurs différentiels) collecte tous les renseignements nécessaires du procédé pour protéger la machine.

Les deux signaux sont envoyés à un diviseur qui calcule le rapport. Où ce dernier est envoyé à un régulateur, sur lequel sont réglée la valeur de K_4 , c'est-à-dire la valeur de Consigne de la régulation anti-pompage. Le régulateur, en agissant sur la vanne de recyclage, fait de sorte que le rapport ne descende jamais en dessous de la valeur de consigne réglée, en obtenant ainsi ce qui est demandé.

Cette dernière équation représente une solution pour la régulation anti-pompage, qui est une équation d'une parabole dans le plan (ρ, Q_1) ayant son origine dans le point de coordonnées $(1,0)$, qui est représenté par la figure II.5.

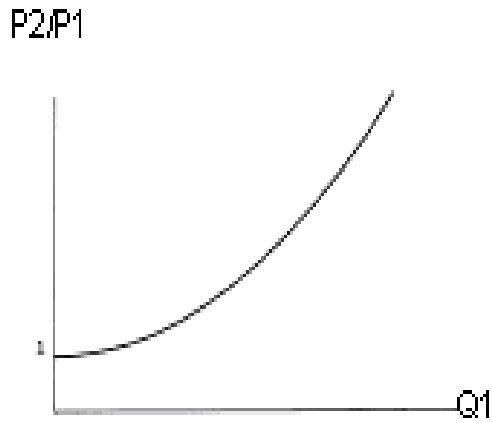


Figure II.5

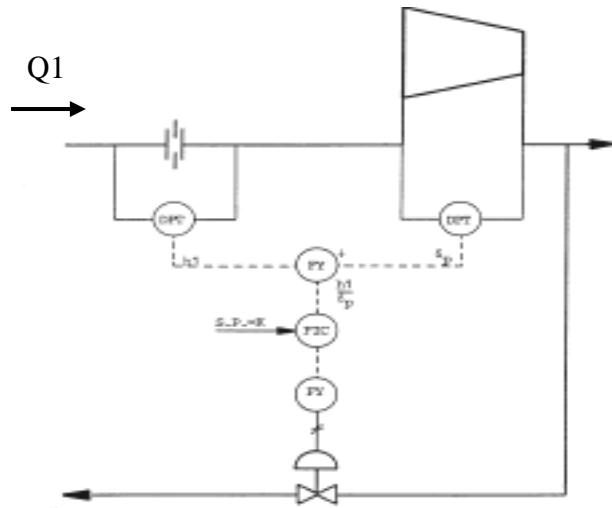


Figure II.6 schéma typique réalisant la fonction $K = \frac{h_1}{\Delta P}$

II.3.5 Fonctionnement de la boucle : $K = \frac{h_1}{\Delta P}$

II.3.5.1 Avantage :

Elle met en évidence l'extrême simplicité d'un tel système anti-pompage (avec deux instruments installés sur site), qui collecte tous les renseignements nécessaires pour protéger le compresseur.

II.3.5.2 Inconvénient :

- les variations de température à l'aspiration ne sont pas prises en considération.
- Pour les rapports de compression élevés, les courbes anti-pompages ne sont plus paraboliques, alors, on ne peut plus utiliser l'équation

$$K = \frac{h_1}{\Delta P} \quad (15)$$

Pour remédier à cet inconvénient, il est possible d'ajouter un coefficient multiplicatif **a** pour

P₂ et l'équation devient $K = \frac{h_1}{(P_1 - aP_2)}$ (16)

Pour l'équation (16), on a le schéma de régulation de la figure II.8.

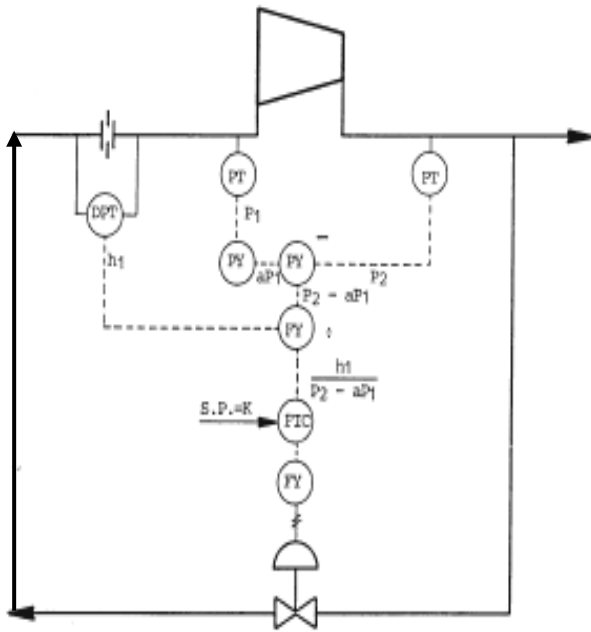


Figure II.7 schéma de régulation avec un coefficient multiplicatif

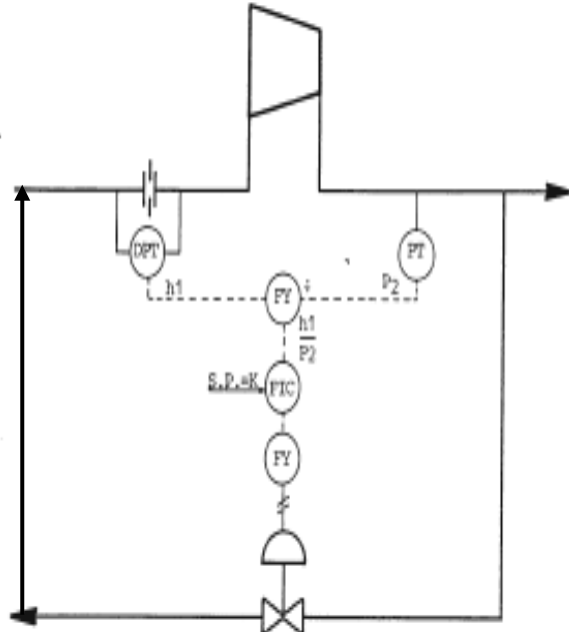


Figure II.8 schéma de régulation sans le coefficient multiplicatif

Pour le dernier cas ($a=0$), on peut réaliser l'équation par la figure. Dans la nécessité d'utiliser au maximum le champ stable du compresseur, les équations d'un générateur de fonction sur un des deux signaux de façon à modifier la courbe anti pompage, on l'adaptant le plus proche possible à la courbe de pompage.

$$\text{L'équation de base devient : } K = \frac{h}{f(\delta P)} \quad (17)$$

D'autre part, l'utilisation d'un générateur de fonction, entraîne que les signaux h et ΔP sont influencés par les variations de la pression d'aspiration, dans ce cas là, il est recommandé de compenser les deux signaux h et ΔP par P_1 et l'équation de base devient :

$$K = \frac{h_1 \cdot \left(\frac{P_1}{P_2} \right)}{f \left(\delta P \cdot \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \right)} \quad (18)$$

Le schéma réalisant l'équation (18) est représenté par la figure II.9.

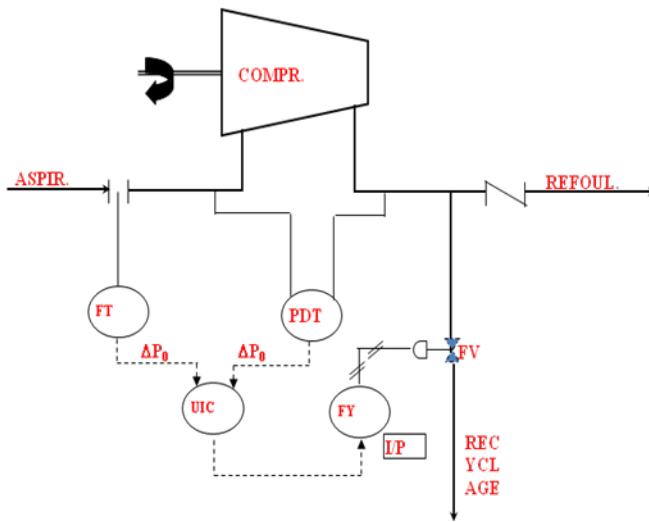


Figure II.9

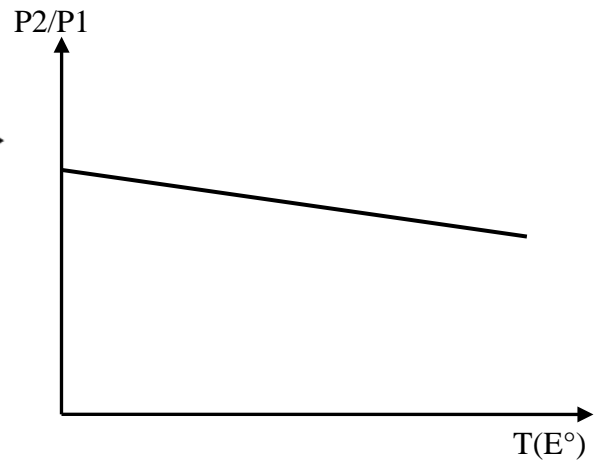


Figure II.10

II.3.6 Etude de l'influence de la température :

Dans les équations de base précédentes, on n'a pas considéré les variations de la température à l'aspiration, mais par fois cette dernière influe sur le procédé de régulation.

$$\text{On peut écrire : } Q = K \cdot \sqrt{\frac{h \cdot T_1}{P_1}} \Rightarrow h = K \cdot \left(\frac{Q^2 \cdot P_1}{T_1} \right) \quad (19)$$

Pour les valeurs spécifiques de Q et P1, la figure montre comment h varie inversement avec la température et les deux membres, l'équation $\Delta P = K \cdot h$ change d'une façon proportionnelle. Dans la plus part des cas, ce problème est souvent résolu par un déplacement de la ligne de contrôle à droite de la courbe de pompage. Si la variation de la température est importante, il est nécessaire de la compenser à l'aide d'un système de contrôle.

$$\text{Dans ce cas là, on a : } K = \frac{h_1 \cdot \left(\frac{P_1}{P_2} \right)}{f \left(\delta P \cdot \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \right)} \quad (20)$$

II.3.7 Limite protection de pompage :

Des dispositifs de protection contre le pompage sont installés pour que le compresseur n'atteigne pas la ligne de pompage, même lors de fonctionnement transitoire.

Une marge donc nécessaire entre la ligne d'apparition de pompage et la limite pratique de pompage, cette dernière définissant le point de consigne de protection (Figure II.11). Toute régulation sera basée sur la mesure du débit traversant la machine, ainsi que d'autres variables physique de sorte que la régulation adoptée puisse satisfaire les conditions suivantes :

- La ligne de régulation doit être le plus possible proche de la ligne limite de pompage déplacée parallèlement d'une quantité établie par rapport à l'axe de débit.
- La ligne de régulation, lorsque les conditions du fluide aspiré varie, ne doit pas s'approcher de la ligne de pompage relative aux conditions d'étude, plus de ce qui est nécessaire au bon fonctionnement du système anti-pompage.
- Le système doit protéger la machine dans toutes les conditions de fonctionnement, démarrage et d'arrêt possible.

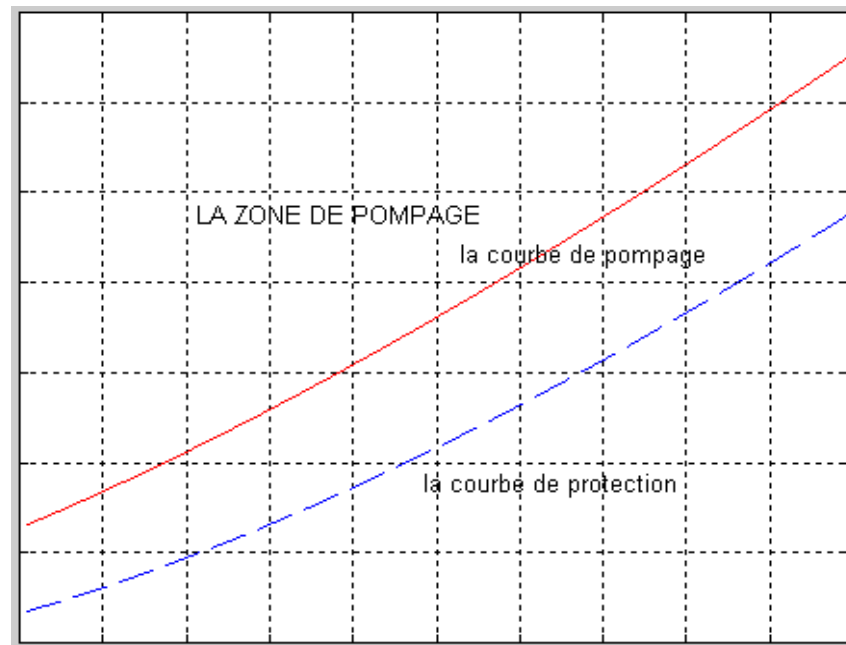


Figure II.11 Figure II.9 Courbe de protection anti-pompage

II.3.8 Besoin en rapidité du système :

La rapidité du système de protection doit être élevée. Nous avons vu qu'elle était limitée par le bruitage du signal de mesure du débit.

Le diamètre de la vanne de recirculation doit être adapté au débit du compresseur, mais aussi au volume du gaz ramené rapidement à l'aspiration, ce diamètre atteint alors 200 à 250 mm, voir plus. Le servomoteur doit être spécifié avec un temps d'ouverture inférieure à la seconde, ce qui n'est pas facile à réaliser, vu sa taille. Un autre élément important est la distance entre le compresseur et la vanne de recirculation. Lorsque la vanne s'ouvre, une onde de choc est émise. Et il attend son arrivée sur la machine pour avoir un effet.

Par conséquent, la vanne ne doit pas être installée au milieu de la boucle de retour. Une longueur de tuyauterie de 50m coté aspiration, ou coté refoulement, représente 0.25s de propagation de l'onde de choc pour une application de réfrigération.

II.4 Principaux problèmes d'exploitation des systèmes anti pompage :

II.4.1 Le démarrage :

Un compresseur sera mis en service avec sa vanne d'anti-pompage ouverte, pour rester dans la plage des grands débits, cela doit être pris en compte pour la détermination de la capacité en couple de démarrage du moteur.

Aux basses vitesses et faibles taux de compression, les courbes du compresseur sont assez incertaines et les mesures du débit (au ΔP orifice) entachés d'erreur. Il convient alors de recycler manuellement soit par la même vanne anti-pompage si elle est suffisamment dimensionnée (quand $P2$ est faible, le débit refoulé peut être trop important) ou par une deuxième vanne de recyclage.

II.4.2 Influence de la température :

Ces régulations comportent rarement des corrections de température. Si $T1$ augmente la courbe de protection se déplace tandis que la courbe du compresseur descend. On n'est plus protégé. Il y a lieu de régler le coefficient X pour des conditions maximales de température à l'aspiration.

II.4.3 Influence de la nature de gaz :

Dans beaucoup de procédés, la masse molaire du gaz est variable, pour les mêmes raisons si M diminue, la protection disparaît. Il y a lieu de régler pour la masse molaire minimum envisagée en opération normale. Ces deux dernières contraintes peuvent conduire à recycler plus que nécessaire dans certaines conditions de marche ce qui est énergétiquement coûteux.

II.4.4 Stabilité de la boucle de régulation :

Lorsqu'une perturbation survient, la vanne anti-pompage doit pouvoir s'ouvrir car il faut un certain temps pour décompresser le servomoteur. Ensuite la vanne ne s'ouvre pas suffisamment. Si le pompage survient, la régulation entre elle même en pompage et l'opérateur doit reprendre manuellement le recyclage.

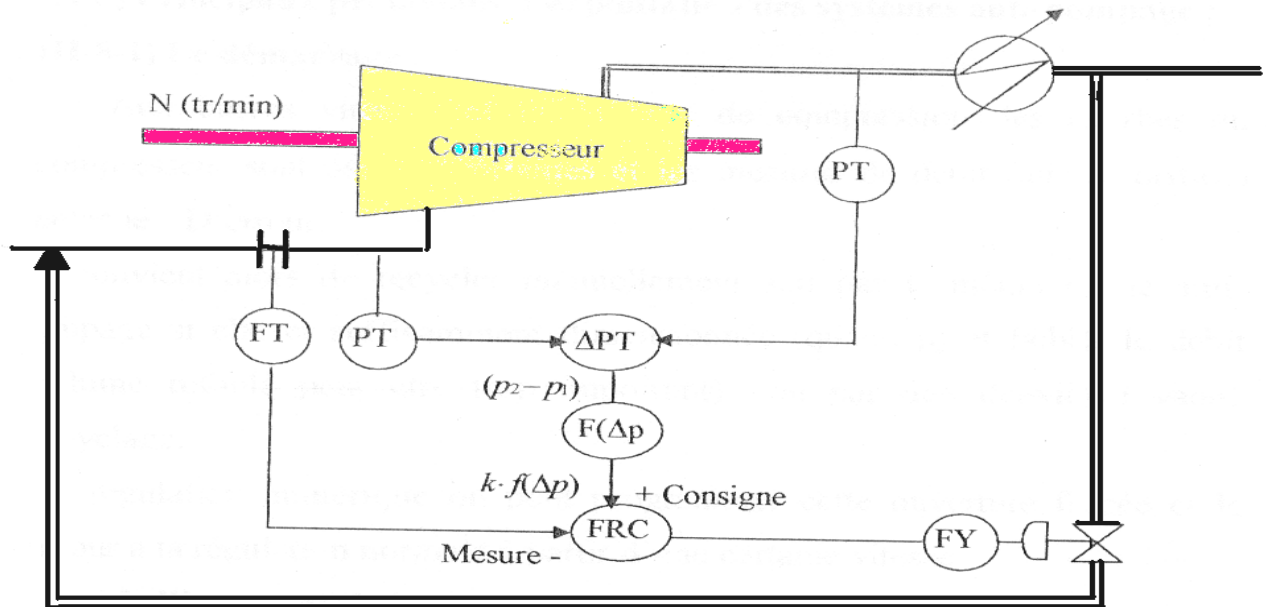


Figure II.12: schéma de régulation anti-pompage avec compensation de ΔP

II.5 Conclusion :

Dans ce chapitre on a expliqué le phénomène de pompage et donné les différents systèmes de protection existant actuellement à l'industrie. En fonction des différents schémas de régulation anti-pompage étudiés, et suivant les conditions de performance du système. On a opté pour le schéma de régulation anti-pompage avec compensation de ΔP (figure II.12), c'est-à-dire un système tenant compte de la pression de refoulement, de la pression d'aspiration et du débit d'aspiration.

Pour l'étude du système de réglage anti pompage du compresseur, on est obligé de déterminer le modèle du compresseur et de calculer les paramètres du régulateur anti pompage.

Chapitre III

*Synthèse des régulateurs et commande
numérique*

III.1 Introduction :

A l'époque de l'automatisation, la notion de régulation suggère en langage courant des propriétés telles que la fiabilité fonctionnelle, la précision élevée, la qualité particulière ou le confort accru. Bien que le principe de la régulation trouve un champ d'application toujours plus étendu et diversifié dans les systèmes techniques de toute sorte, il ne constitue pas une invention technique. Il s'agit plutôt d'un phénomène naturel qui permet de maintenir automatiquement un état stable en dépit de l'action de perturbations externes. De nombreux processus biologiques et écologiques ainsi que sociologiques et économiques fonctionnent d'après ce principe de régulation. Parallèlement au développement pratique de la technique de régulation, l'étude théorique de cette technique a connu un développement considérable. Depuis les débuts de l'exploitation technique du principe de régulation, approximativement avec le régulateur centrifuge de la machine à vapeur de James Watt (1788), en passant par les premières descriptions mathématiques de processus de régulation au début du 20ème siècle. La commande automatique s'affirme aujourd'hui comme une branche autonome majeure des sciences de l'ingénieur. [5]

Dans cette partie, on s'intéresse à la détermination de la fonction de transfert caractérisant le compresseur, (la variation du débit d'aspiration en fonction de la pression de refoulement). Dans la seconde partie nous avons opté pour la synthèse des paramètres des régulateurs numériques, et le contrôle du compresseur avec la commande adaptative, grâce aux régulateurs auto-ajustables.

III.2 Description de la chaîne étudiée :

La boucle de régulation anti-pompage est constituée des éléments suivants (Figure III.1) :

- Transmetteur de pression d'aspiration.
- Transmetteur de pression de refoulement.
- Convertisseur électropneumatique I/P.
- Vanne anti-pompage.
- Transmetteur de débit d'aspiration.
- Régulateur anti-pompage.

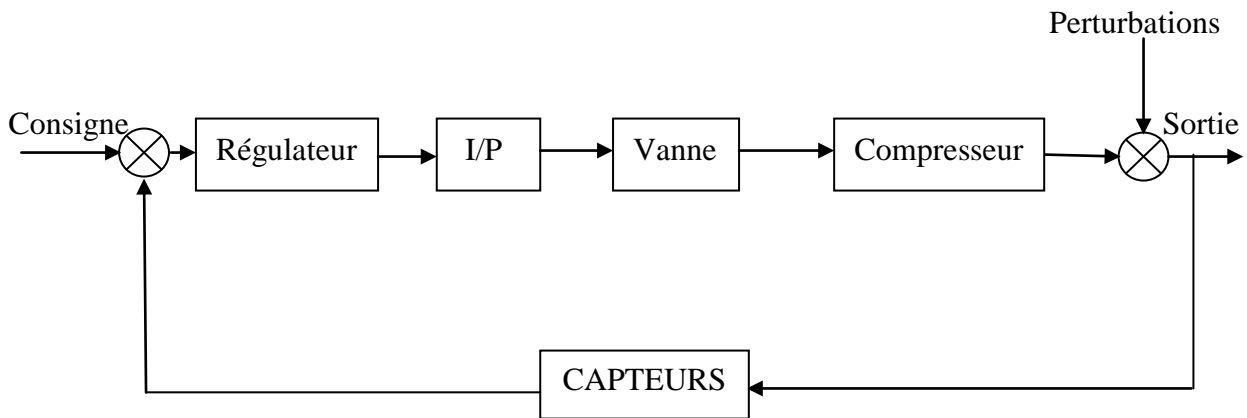


Figure III.1 : schéma fonctionnel de la chaîne étudiée

La vanne de recyclage règle le débit du gaz à l'aspiration du compresseur en répondant au signal provenant du régulateur (FIC), après qu'il soit converti en signal pneumatique par le convertisseur (I/P), les deux transmetteurs de pression et le transmetteur de débit émettent des signaux de mesure vers le régulateur anti-pompage.

- **Modèle mathématique de l'objet élargi :**

L'objet élargi est représenté par la figure (III.1), il comprend le compresseur, la vanne, le convertisseur, les transmetteurs.

Généralement les fonctions de transfert des procédés industriels sont difficiles ou parfois impossible à déterminer par un calcul. En pratique, il est difficile de connaître à l'avance la fonction de transfert, les études théoriques qui préciseraient cette fonction sont souvent complexes ou bien inachevées.

Il sera nécessaire d'avoir recours à l'identification (réponse indicielle). Cette réponse est représentée par la variation de la grandeur de sortie (qui est ici la pression de refoulement) en fonction du temps, lors de la variation de la grandeur d'entrée (débit d'aspiration).

Pour identifier l'objet, on a fait l'expérience dans l'unité et on a enregistré les réponses indicelles.

Il existe plusieurs classifications des modèles, chaque type de modèle étant destiné à une application particulière. Dans notre cas nous avons un modèle dynamique du système à régler, les modèles dynamiques sont spécifiés aux modèles mathématiques d'un système physique, ils sont principalement utilisés dans l'analyse de comportement du système. Ils sont appelés aussi modèles de commande, qui décrivent ainsi la relation entre les variations de la commande et les variations de la sortie.

L'identification consiste à déterminer dans le cas général :

- Les paramètres du modèle (identification paramétrique)
- réponses temporelles ou fréquentielles (identification non paramétrique).

III.3 Choix de la structure du modèle :

Le choix de la structure du modèle dépend de l'application et du type de commande. On a choisi la structure d'un modèle dynamique paramétrique discret de la forme ARX (Autorégressif à Entrée Exogène) représentée par la figure (III.2).

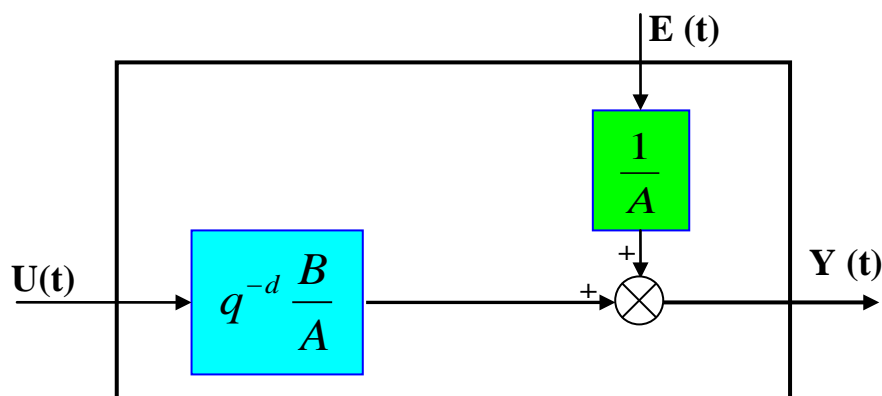


Figure III.2 Structure du modèle type ARX

Avec :

$$A(q^{-1})Y(t) = q^{-d} \cdot B(q^{-1})U(t) + e(t) \quad (\text{III.1})$$

$$H(q^{-1}) = q^{-d} \cdot \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} + \frac{1}{A(q^{-1})} e(t) \quad (\text{III.2})$$

Ce choix est justifié car, on peut utiliser cette structure du modèle avec la méthode des moindres carrés récurrents MCR.

Le modèle de l'objet élargi peut être représenté par un modèle du deuxième ordre avec :

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2} \quad (\text{III.3})$$

$$B(q^{-1}) = b_1 q^{-1} + b_2 q^{-2} \quad (\text{III.4})$$

III.3.1 Estimation des paramètres du modèle :

(Choix du critère à minimiser et de la méthode de minimisation).

En présence de bruits, certains algorithmes d'identification peuvent assurer un biais sur les paramètres ($\lim_{\text{Nombre-de-mesure} \rightarrow \infty} \theta_{est} \neq \theta_{reel}$). Un estimateur biaisé, (dans certains cas les moindres carrés récursifs) introduit une erreur systématique. Il doit donc être manié avec précaution. Des algorithmes d'identification performants, ayant une formulation récursive adaptée au problème d'identification en temps réel et leurs mises en œuvre sur micro-ordinateur.

Le fait que ces méthodes d'identification pouvant opérer avec des signaux d'excitation extrêmement faible constituent une qualité très appréciable en pratique, la variation paramétrique du modèle du compresseur nous amène à utiliser, par la suite, l'algorithme des MCR qui prend en charge cette variation paramétrique.

III.3.2 Validation du modèle identifié : (structure et valeur des paramètres) :

Elle doit être effectuée sur des données différentes de celle utilisées par l'identification. La validation de la structure repose sur des critères minimalisés par les procédures d'identification. Lorsque la méthode utilise un blanchement des erreurs de prédiction (elles doivent tendre vers un bruit blanc), on teste les fonctions d'auto-corrélation des erreurs de prédiction (qui théoriquement sont nulles).

III.4 Algorithme des Moindres Carrés Récursifs MCR :

Un des algorithmes les plus couramment utilisés est celui des MCR, il a pour objectif de minimiser un critère quadratique en fonction de l'erreur de prédiction il est donné par la formule suivante :

$$J(t) = \sum [Y(i) - \hat{\theta}(t)^T \phi(i-1)]^2 \quad (\text{III.5})$$

Le modèle discrétisé du procédé s'écrit :

$$Y(t+1) = -a_1 Y(t) - a_2 Y(t-1) + b_1 U(t-1) + b_2 U(t-2) = \theta(t)^T \phi(t) \quad (\text{III.6})$$

Où le vecteur paramètre est :

$$\theta(t)^T = [a_1, a_2, b_1, b_2] \quad (\text{III.7})$$

Le vecteur de mesure ou des observations est :

$$\phi(t)^T = [-Y(t+1), -Y(t), U(t-1), U(t-2)] \quad (\text{III.8})$$

L'algorithme d'adaptations paramétriques des moindres carrés récursif est donné par les équations suivantes :

$$\hat{\theta}(t+1) = \hat{\theta}(t) + F(t) \cdot \phi(t) \cdot \varepsilon(t+1) \quad (\text{III.9})$$

$$F(t+1)^{-1} = F(t)^{-1} + \phi(t) \cdot \phi(t)^T \quad (\text{III.10})$$

$$F(t+1) = F(t) - \frac{F(t) \phi(t) \phi^T(t) F(t)}{1 + \phi^T(t) F(t) \phi(t)} \quad (\text{III.11})$$

$$\varepsilon(t+1) = \frac{Y(t+1) - \hat{\theta}(t) \phi^T(t)}{1 + \phi^T(t) F(t) \phi(t)} \quad (\text{III.12})$$

La sortie de prédiction a priori est donnée par :

$$\hat{Y}^\circ(t+1) = -\hat{a}_1 Y(t) - \hat{a}_2 Y(t-1) + \hat{b}_1 U(t-1) + \hat{b}_2 U(t-2) = \hat{\theta}(t)^T \phi(t) \quad (\text{III.13})$$

Où le vecteur des paramètres est:

$$\hat{\theta}(t)^T = [\hat{a}_1(t), \hat{a}_2(t), \hat{b}_1(t), \hat{b}_2(t)] \quad (\text{III.14})$$

Le vecteur des mesures :

$$\phi(t)^T = [-Y(t+1), -Y(t), U(t-1), U(t-2)] \quad (\text{III.15})$$

Pour l'estimation, on utilise l'algorithme donné par les équations (III.9) (III.10) et (III.11).

III.5 choix du gain d'adaptation :

$F(t)$ est une matrice du gain qui décroît dans le temps $F(t+1) \leq F(t)$ afin de corriger la direction du gradient et la longueur du pas d'adaptation. La formule (III.10) qui donne l'inverse du gain d'adaptation $F(t+1)^{-1}$ se généralise en introduisant deux paramètres de pondération $\lambda_1(t)$ et $\lambda_2(t)$:

$$F(t+1)^{-1} = \lambda_1(t) F(t)^{-1} + \lambda_2(t) \phi(t) \cdot \phi(t)^T \quad (\text{III.16})$$

En utilisant le lemme d'inversion matricielle (voir annexe B) donnée par l'équation on obtient à partir de l'équation (III.10) :

$$F(t+1) = \frac{1}{\lambda(t)} \left[F(t) - \frac{F(t) \phi(t) \phi^T(t) F(t)}{\frac{\lambda_1(t)}{\lambda_2(t)} + \phi^T(t) F(t) \phi(t)} \right] \quad (\text{III.17})$$

On choisit un gain d'adaptation à trace constante, dans ce choix $\lambda_1(t)$ et $\lambda_2(t)$ sont choisis automatiquement à chaque pas pour assurer une trace constante de la matrice du gain donné par l'équation (III.8).

$$\text{tr}(F(t+1)) = \text{tr}(F(t)) = \text{tr}(F(0)) = nGI \quad (\text{III.18})$$

Où :

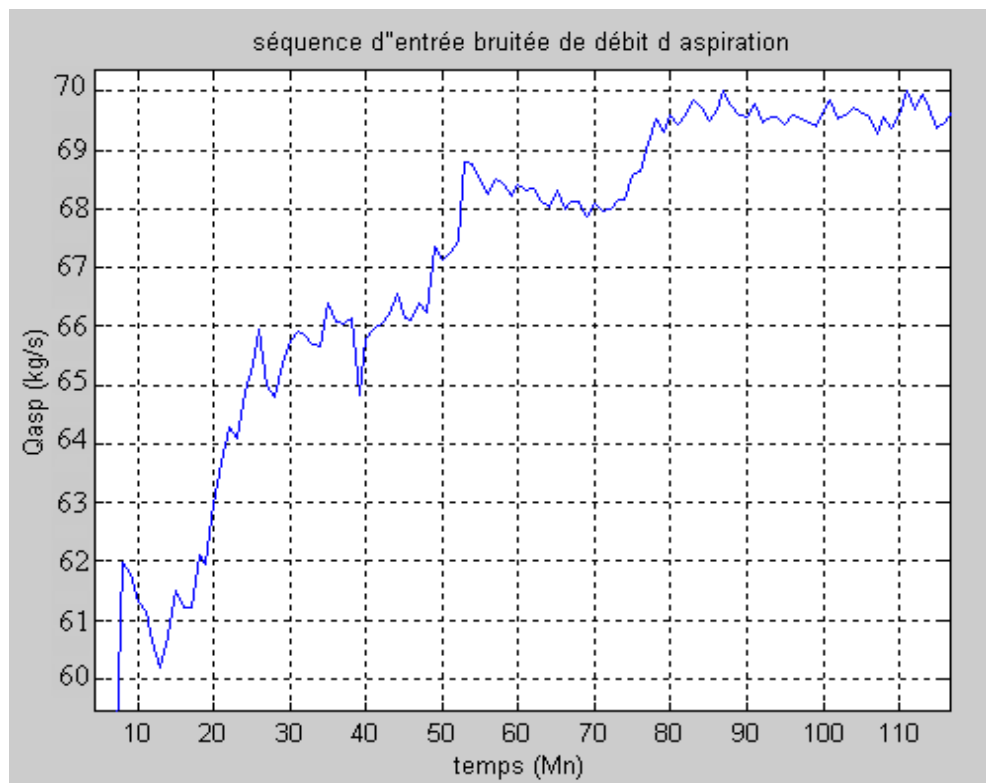
n : nombre de paramètres

GI : gain initial

Ce type de choix du gain est utilisé pour l'identification des systèmes à paramètres variables dans le temps.

III.6 résultats de simulation :

Pour confirmer l'efficacité de l'algorithme des MCR, nous avons choisi l'excitation du compresseur dans le démarrage avec une séquence d'entrée bruitée de débit d'aspiration avec l'ouverture totale de la vanne anti-pompage, en assurant le fonctionnement stable du compresseur. Les résultats sont les suivants :



L'estimation a été faite par MCR à trace constante du gain initial $F_0=1$ et le coefficient de

pondération $\frac{\lambda_1(t)}{\lambda_2(t)} = 0.98$, les paramètres initiaux sont nuls.

Les variations paramétriques du modèle sont représentées par les figures (III.3), (III.4), (III.5) et (III.6).

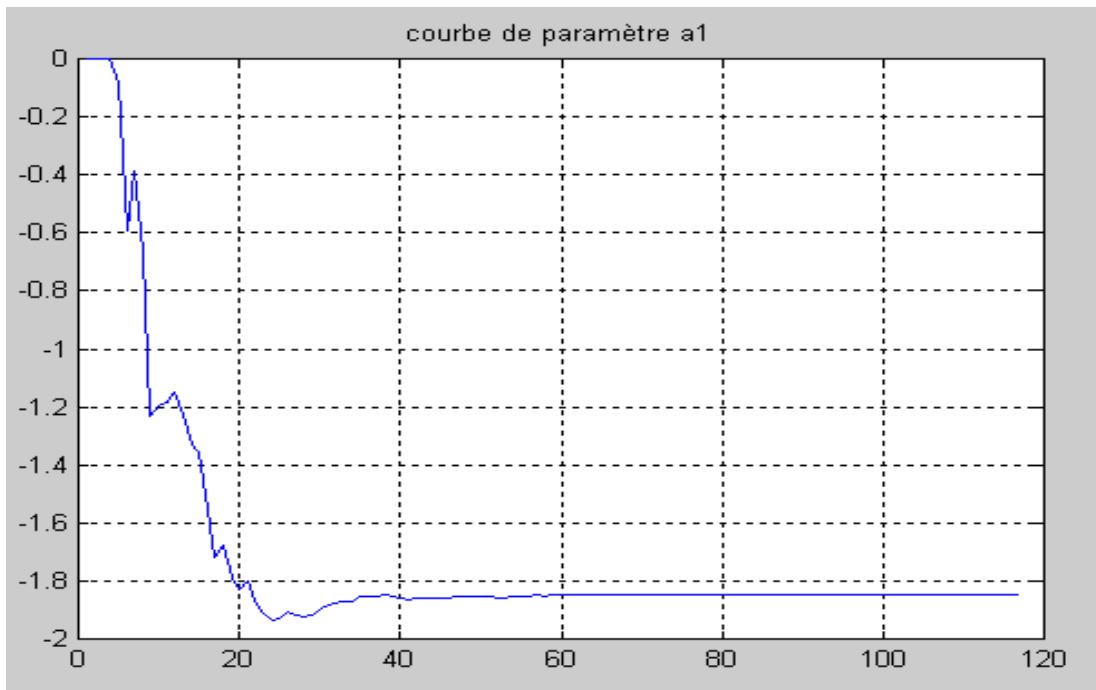


Figure III.3 Réponse de la courbe du paramètre a_1

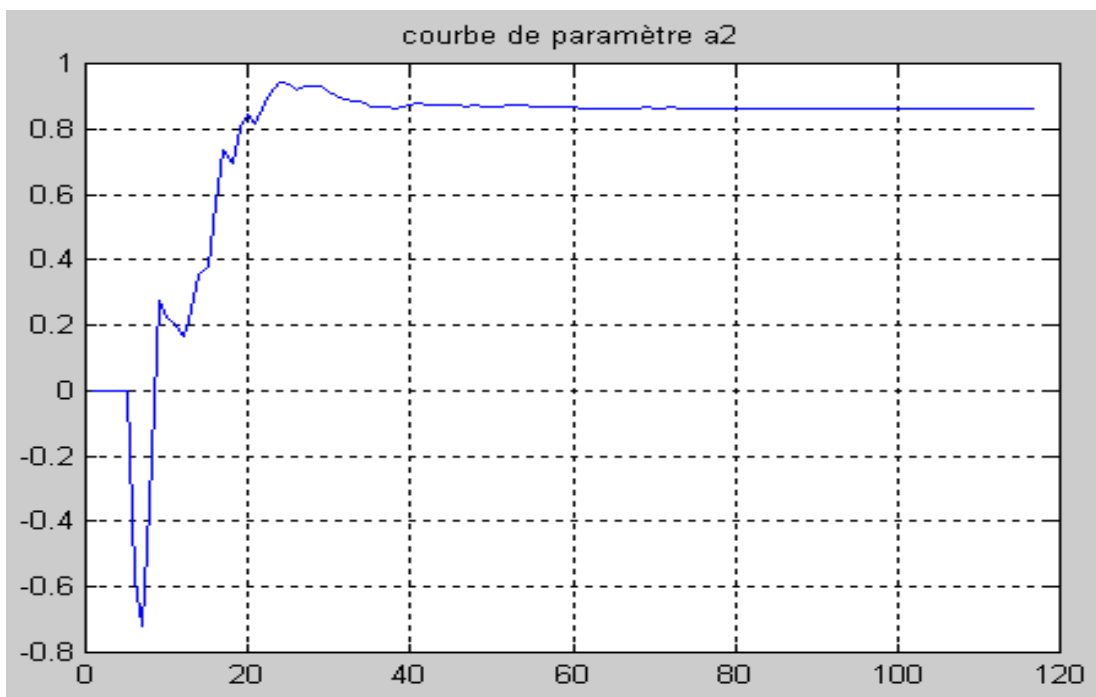


Figure III.4 Réponse de la courbe du paramètre a_2

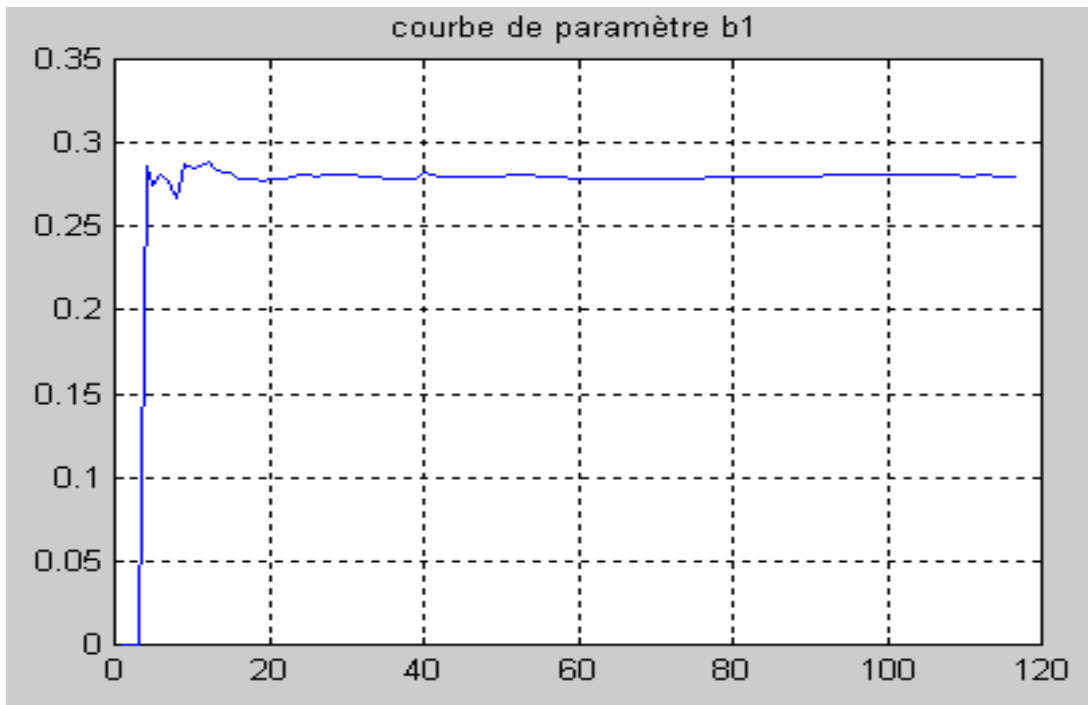


Figure III.5 Réponse de la courbe du paramètre b_1

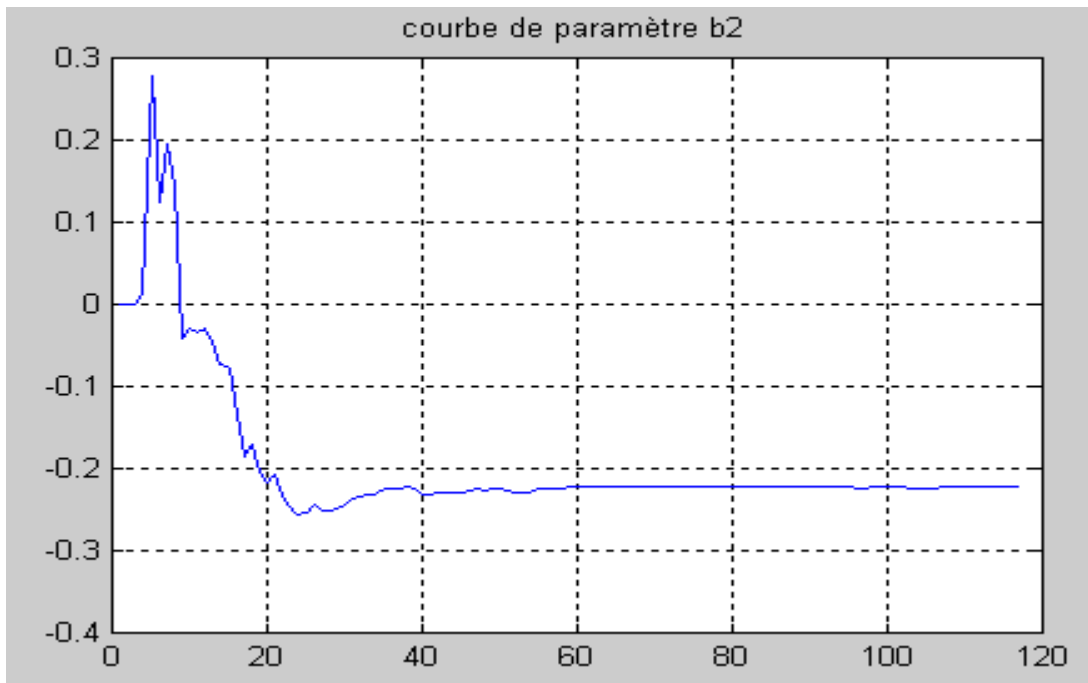


Figure III.6 Réponse de la courbe du paramètre b_2

Les paramètres du modèle obtenus sont donnés par le vecteur des paramètres suivant :

$$\hat{\theta} = \begin{bmatrix} -1.8455 \\ 0.8618 \\ 0.2802 \\ -0.2221 \end{bmatrix} \quad \text{Avec} \quad \begin{cases} a_1 = -1.8455 \\ a_2 = 0.8618 \\ b_1 = 0.2802 \\ b_2 = -0.2221 \end{cases}$$

Le modèle discret du compresseur sera :

$$H(z^{-1}) = \frac{0.2802 z^{-1} - 0.2221 z^{-2}}{1 - 1.845 z^{-1} + 0.8618 z^{-2}}$$

Qui est un modèle du deuxième ordre. Sa réponse indicielle avec une période d'échantillonnage $T_e=2$ est représentée par la figure III.7

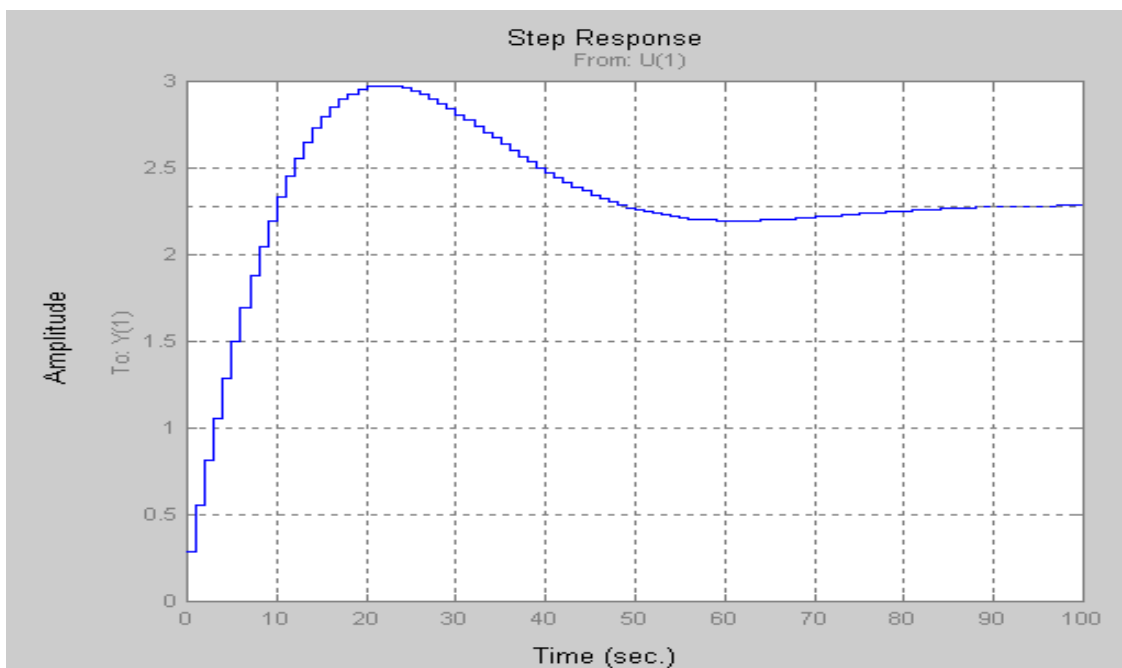


Figure III.7 Réponse indicielle du modèle discret du compresseur

Conclusion :

On peut dire que notre objet (compresseur) est un système du deuxième ordre, et que sa réponse indicielle illustrée par la figure (III.7) n'est pas satisfaisante, car elle possède une erreur statique importante, d'où la nécessité d'une correction pour garantir les meilleures performances.

III.7 Commande numérique :

III.7.1 Introduction :

L'industrie fait de plus en plus appel aux techniques de contrôle et de réglage automatique pour améliorer la qualité de la fabrication des produits, pour assurer une plus grande sécurité aux hommes et au matériel, pour mieux utiliser l'élément humain en laissant les tâches délicates ou monotones à la machine.

L'idée d'exploiter les ordinateurs en automatique remonte au début des années cinquante. L'utilisation d'un calculateur numérique ou d'un microprocesseur dans les boucles de commande avec des performances nettement supérieures à celle du régulateur analogique [1].

La numérisation dans les boucles de régulations offre de nombreux avantages parmi lesquels nous mentionnerons :

- Choix important de stratégie pour la conception des régulateurs
- Possibilité d'utilisation d'algorithmes plus complexes et plus performants que le P.I.D
- Technique bien adaptée pour la commande des procédés avec retard.

III.7.2 structure et principe d'un système de régulation numérique :

Le schéma bloc de la figure III.8 présente la structure d'un système de régulation numérique mono variable.

Comme tout système de régulation automatique, le but de l'installation est d'assurer la correspondance entre le signal de consigne, et la grandeur réglée indépendamment (régulation de correspondance) et des effets des perturbations (régulation de maintien).

Le calculateur numérique échange les informations par l'intermédiaire des organes de mesure et de réglage (ou de commande). Les premiers fournissent l'information au calculateur numérique tandis que les seconds exécutent les commandes. L'ensemble de ces organes sont appelé périphériques.

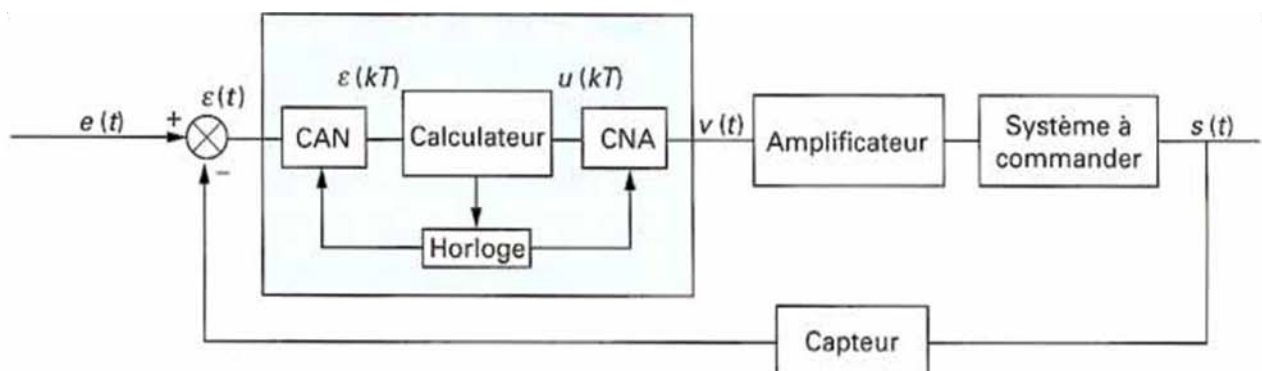


Figure III.8 : Schéma fonctionnel général d'un système de régulation numérique

Le calculateur numérique (CN) traite l'information de façon discrète. Il est donc nécessaire d'insérer, entre le CN et ses périphériques, des organes convertisseurs des signaux analogique digital (CAN) et digital analogique (CNA). Ainsi, un système de réglage automatique à une boucle avec un CN se compose des éléments suivants, à savoir :

- Un échantillonneur idéal transformant le signal continu en un signal digital, appelé convertisseur analogique digital.
- Un échantillonneur à pulsation suivi d'un bloqueur transformant le signal discret à la sortie du CN en un signal continu (cet ensemble constitue le convertisseur digital- analogique),
- Un calculateur qui traite l'algorithme de réglage (ou commande).
- Un amplificateur.
- Un système à régler.
- Des organes de mesure et de réglage.

III.7.3 L'échantillonnage :

Un système échantillonné est en général un système continu pour lequel la transmission de l'information s'effectue en certains points à des instants discrets T_K du temps. L'échantillonnage a une importance essentielle. Il permet d'établir le point entre deux disciplines complémentaires qui sont le traitement numérique et le traitement analogique des signaux, il rend accessible tout l'ensemble des méthodes et des systèmes de traitement numérique pour le traitement des signaux analogique.

La grande souplesse d'emploi et la variété toujours croissante des techniques de traitement numérique, rendent possible des opérations de traitement de plus en plus élaborées, qu'il est difficile, parfois même impossible, d'effectuer par voie analogique.

Cette théorie d'échantillonnage est essentielle dans le domaine de la théorie de signal, elle permet de donner un critère de validité pour l'échantillonnage d'un signal par une série de points discrets.

D'autre part, cette théorie permet de donner une relation mathématique reliant le signal échantillonné au signal réel.

III.7.4 Choix de la Période d'échantillonnage :

Le choix de la période d'échantillonnage T est un élément particulièrement décisif pour le choix d'un système informatique. En effet, si la période d'échantillonnage retenue est

excessivement faible, le calculateur devra effectuer le traitement très rapidement et les problèmes de stockage d'information se produiront très certainement (vitesse, volume). Par ailleurs, l'échantillonnage à une cadence trop rapide pose de nombreux problèmes numériques.

Par conséquent, la période d'échantillonnage doit être choisie en tenant compte de la dynamique du système à commander. Pour pouvoir reconstituer un signal continu à partir de la séquence discrétisée, il faut que la fréquence d'échantillonnage vérifie la condition suivante $T_e > 2 * f_{max}$. (théorème de Shannon, voir annexe C).

III.7.5 Principes des méthodes modernes de calcul des régulateurs numériques:

Les méthodes de calcul des régulateurs numériques concernent la régulation mono variable (mono boucle) en présence des perturbations déterministes. Ces méthodes sont :

- P.I.D numérique.
- Placement des pôles en boucle fermée
- Poursuite et régulation à objectifs indépendants.
- Poursuite et régulation avec pondération de l'entrée.

Tous les régulateurs; quelle que soit la méthode de calcul; auront la même structure à trois branches R-S-T. Seul le nombre de coefficients du régulateur change en fonction de la complexité du procédé.

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

III.7.5.1 Description des régulateurs PID :

Un régulateur PID remplit essentiellement trois fonctions :

1. Il fournit un signal de commande $u(t)$ en tenant compte de l'évolution du signal de sortie $y(t)$ par rapport à la consigne $w(t)$.
2. Il élimine l'erreur statique grâce au terme intégrateur.
3. Il anticipe les variations de la sortie grâce au terme dérivateur.

Le régulateur PID classique relie directement le signal de commande $u(t)$ au signal d'écart $e(t)$. Sa description temporelle est la suivante :

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (\text{III.19})$$

Avec : $e(t) = w(t) - y(t)$ (III.20)

Sa fonction de transfert s'écrit :

$$G_s(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d \right)$$

III.7.5.2 Régulateur numérique PID:

La version de base du régulateur PID numérique résulte de la discrétisation du régulateur PID continu (P, I et D indépendantes).

La méthode de calcul des régulateurs PID numériques ne s'applique rigoureusement qu'aux procédés modélisables par un système continu caractérisé par une fonction de transfert bien définie, avec ou sans retard [2].

III.7.5.3 Structure d'un régulateur numérique PID :

Considérons la fonction de transfert du régulateur continu PID

$$C_{PID} = K \left[1 + \frac{1}{T_i S} + \frac{T_d S}{1 + \frac{T_d}{N} S} \right]$$

Ce régulateur est caractérisé par quatre paramètres de réglage

K: gain proportionnel.

T_i : constante intégrale.

T_d : constante dérivée.

$$\frac{d}{dt} X(t) \Leftrightarrow S.X(S) \Leftrightarrow (1 - z^{-1})X(Z) \quad (\text{III.21})$$

$$\int x(t).dt \Leftrightarrow \left(\frac{1}{S} \right).X(S) \Leftrightarrow \left(\frac{1}{1 - z^{-1}} \right).X(Z) \quad (\text{III.22})$$

T_d/N : filtrage de l'action dérivée.

Pour la discrétisation du régulateur PID, on transforme S (l'opérateur de Laplace) à $(1-Z^{-1})$, on a alors :

Après la discrétisation nous obtenons la fonction de transfert échantillonnée du régulateur numérique PID.

$$C_{PID}(z) = \frac{R(z^{-1})}{S(z^{-1})} = K \left[1 + \frac{Te}{Ti} \cdot \left(\frac{1}{1-z^{-1}} \right) + \frac{N.Td}{Td + N.Te} \frac{(1-z^{-1})}{1 - \frac{Td}{Td + N.Te} z^{-1}} \right] \quad (III.23)$$

L'expression en termes de rapport de deux polynômes s'obtient en faisant la somme des trois termes. Des polynômes $R(z^{-1})$ et $S(z^{-1})$ ont forme :

$$R(z) = r_0 + r_1 z^{-1} + r_2 z^{-2} \quad (III.24)$$

$$S(z) = (1-z^{-1})(1+s_1 z^{-1}) \quad (III.25)$$

Le régulateur numérique PID à quatre paramètres comme le régulateur PID continu.

Le schéma bloc correspondant est donné par la figure (III-9). En prenant $T(Z^{-1}) = R(z^{-1})$, le régulateur numérique peut se mettre sous la forme canonique à trois branches, le schéma bloc correspondant est donné par la figure (III-10).

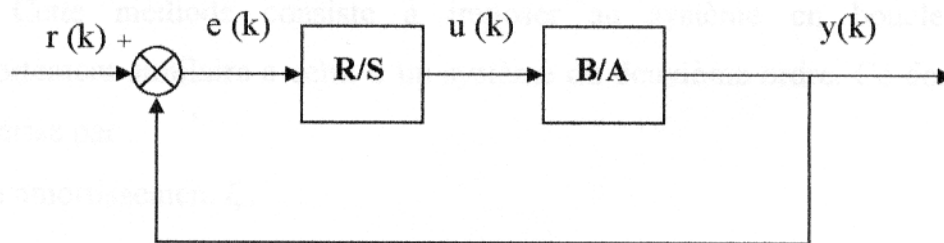


Fig. III.9

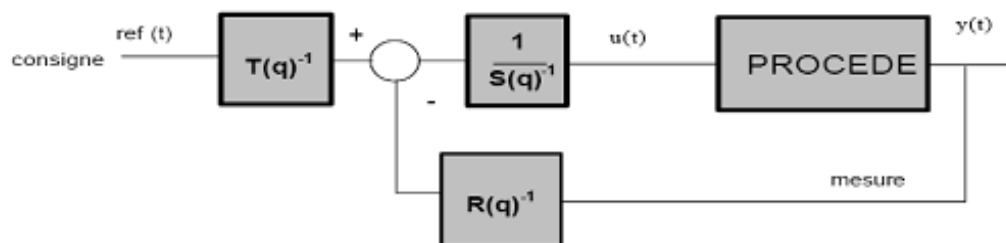


Figure III.10 schéma bloc équivalent d'une boucle de régulation numérique utilisant le régulateur numérique PID

La fonction de transfert en boucle fermée relie la consigne $r(k)$ et la sortie $y(k)$

$$\text{Est } G(Z^{-1}) = \frac{y(z^{-1})}{r(z^{-1})} = \frac{B(z^{-1}).R(z^{-1})}{A(z^{-1}).S(z^{-1}) + B(z^{-1}).R(z^{-1})} = \frac{B(z^{-1}).R(z^{-1})}{P(z^{-1})} \quad (III.26)$$

Où $P(Z^{-1})$ définit les pôles désirés en boucle fermée.

III.7.6 synthèse de la commande et résultat de simulation :

L'objectif de la synthèse du régulateur numérique se traduit par la détermination de la RST, afin d'obtenir des fonctions de transfert en boucle fermée vis-à-vis de la consigne et de la perturbation permettant de satisfaire les performances imposées. C'est pour cela que les performances désirées en boucle fermée seront exprimées en termes de pôles désirées $P(Z^{-1})$ et éventuellement en termes de zéros désirées.

L'application de la loi de commande par calculateur numérique à notre système, nous permet d'avoir les paramètres optimums du calculateur (régulateur) numérique.

Avec :

- La détermination du modèle échantillonné du procédé discrétisé.
- Spécification des performances.
- Le calcul des paramètres du régulateur numérique.

III.7.6.1 Modèle échantillonné du procédé:

La discrétisation des fonctions de transfert continues des procédés avec bloqueur d'ordre zéro conduit aux fonctions de transfert échantillonnées des formes suivantes

Discrétisation du système (compresseur) :

$$H(z) = \frac{0.2802Z - 0.2221}{Z^2 - 1.845Z + 0.8618}$$

III.7.6.2 Choix des pôles en boucle fermée $P(Z^{-1})$:

Les pôles en boucle fermée, qui sont les racines de polynôme $P(Z^{-1})$, définissant en grande partie les performances désirés en régulation, on peut spécifier un polynôme $P(Z^{-1})$ définissant les pôles en boucle fermé à partir d'un modèle du 2ème ordre, ayant la fréquence propre et l'amortissement désiré. En posant :

$$P(Z^{-1}) = 1 + P_1(Z^{-1}) + P_2(Z^{-1}) \quad (\text{III.27})$$

$$P_1 = -2.\alpha.\beta$$

$$P_2 = \alpha^2$$

Avec : $\alpha = e^{-\xi\omega_0.T_e}$, $\beta = \cos(\omega.T_e)$,

$$\omega = \omega_0.\sqrt{1 - \xi^2}.$$

[LANDAU] donne une condition pour le choix de la période d'échantillonnage et la pulsation propre donnée par:

$$0.25 \leq \omega_0.T_e \leq 1.5$$

$$0.7 \leq \xi \leq 1 \quad \text{Erreur statique nulle.}$$

Pour calculer R et S il faut résoudre l'équation polynomiale :

$$H_{BF}(Z^{-1}) = \frac{B(Z^{-1}).T(Z^{-1})}{P(Z^{-1})} \quad \text{Avec :}$$

$$P(Z^{-1}) = A(Z^{-1}).S(Z^{-1}) + B(Z^{-1}).R(Z^{-1})$$

Connue sous le nom d'identité de BEZOUT ou Equation diophantine (voir annexe A).

III.7.6.3 calcul des paramètres du régulateur numérique :

Il s'agit de résoudre l'équation S (z^{-1}) et R (z^{-1}), en comparant les termes de même puissance de l'équation suivante

$$P(Z^{-1}) = A(Z^{-1}).S(Z^{-1}) + B(Z^{-1}).R(Z^{-1}) \quad \text{(III.28)}$$

Le calcul est donné par un programme écrit sous MATLAB (voir annexe D).

$$r0=0.57 ; r1=-0.84 ; r2=0.32 \quad s1=0.7318.$$

En remplaçant (r_0, r_1, r_2, s_1) dans les équations (III-24) et (III-25), on trouve les résultats suivants:

Donc la fonction de transfert du régulateur numérique est :

$$W_R(Z) = \frac{0.57 z^2 - 0.84 z + 0.32}{z^2 - 0.26 z - 0.73}$$

III.7.6.4 Etude du système par rapport à la perturbation :

Pour effectuer l'étude du système par rapport à la perturbation, on a déterminé la fonction de transfert par rapport à la perturbation :

$$W_Z(z^{-1}) = \frac{1}{A(z^{-1})} = \frac{1}{1 - 1.845 z^{-1} + 0.8618 z^{-2}}$$

L'étude par rapport à la perturbation nous donne la réponse à un échelon, qui est illustrée à la figure III.14.

Cette figure, montre bien que la réponse indicielle du système par rapport à la perturbation atteint son amplitude maximale (« 9 %») à l'instant $t=8s$, et après un certain temps l'effet de cette perturbation doit s'annuler sous l'influence du régulateur.

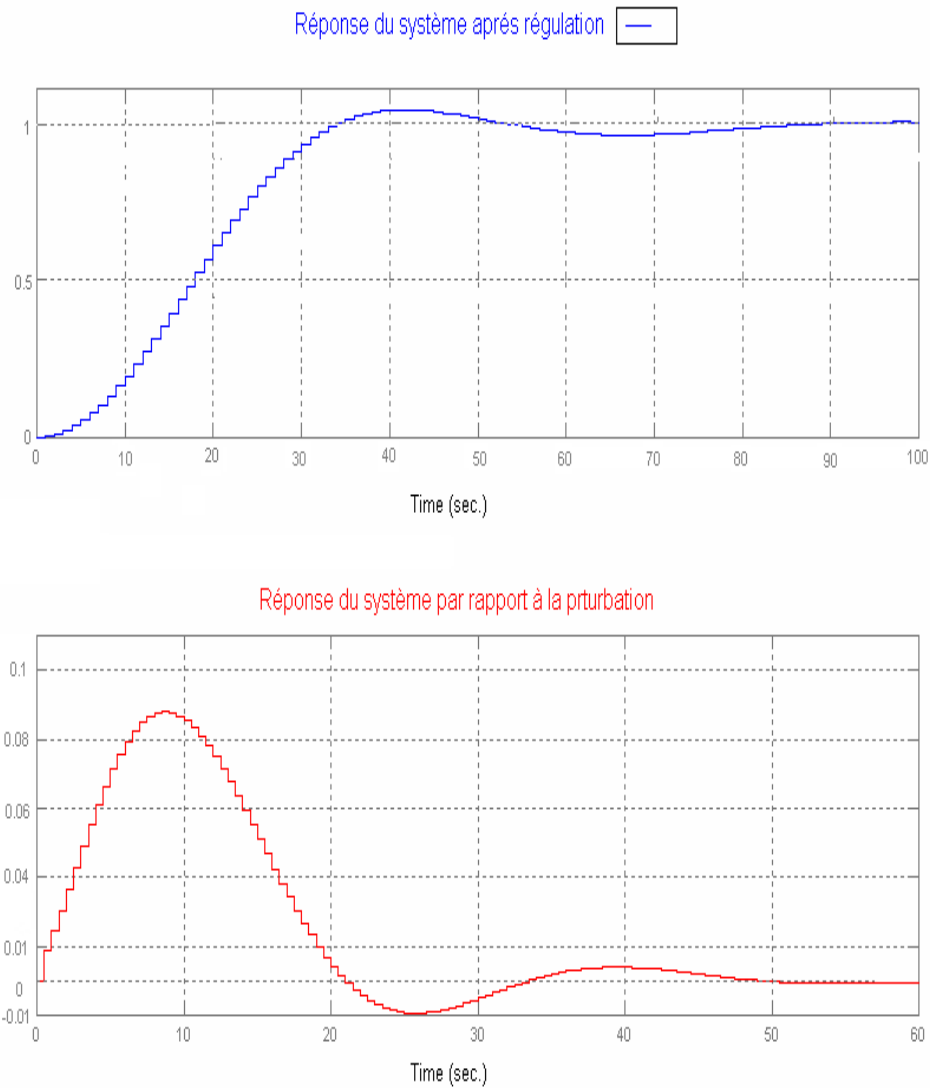


Figure (III.14) : Réponse du système après correction et comportement du système par rapport à la perturbation.

III.7.6.5 Interprétation des résultats :

D'après les résultats du calcul, on voit que le régulateur a corrigé la réponse illustrée dans la figure III-14, avec des performances convenables (temps de réponse de « 35s » dépassement acceptable « $D=4\%$ »).

L'étude du système par rapport à la perturbation, nous indique que cette dernière atteint son amplitude maximale (9%) de la consigne, ensuite va diminuer jusqu'à ce qu'elle soit totalement éliminée par le régulateur, ce qui nous montre que les paramètres du régulateur ont été bien calculés pour l'obtention des performances acceptables du système.

III.8 La commande adaptative :

Un régulateur à paramètres constants appliqué à un processus dynamique non-linéaire n'arrive pas toujours à répondre aux spécifications du cahier des charges. Une structure adaptative peut être une solution très élégante qui éviterait les problèmes rencontrés par les processus difficilement modélisables dont les caractéristiques changent rapidement et en permanence.

Les systèmes actuels de régulation anti-pompage présentent plusieurs inconvénients, à savoir :

- Le gaspillage du gaz à cause de l'ouverture permanente des vannes de recyclage.
- Un temps de réponse assez grand des régulateurs anti-pompage.
- Variation de la masse molaire du gaz provoquant ainsi la variation de la pression dans le temps.

Afin de résoudre ce problème et dans le souci d'améliorer les performances du système, l'utilisation d'une commande qui permettra de faire l'ajustement optimal des paramètres du régulateur en fonction d'éventuels changements dans la dynamique du système s'avère nécessaire. Ceci peut être obtenu par la commande adaptative. Ce qui nous permettra d'assurer de meilleures performances en implantant un correcteur numérique qui permet le décalage de la courbe du système vers la droite (SLL).

Lorsque le système à commander est non linéaire et que les paramètres du modèle de connaissance varient dans de grandes proportions, la commande adaptative est une alternative intéressante qui permet de déterminer les paramètres de réglage en temps réel.

III.9 Principe de la commande adaptative :

Dans l'approche des systèmes adaptatifs, les études développées jusqu'à 1978 ont donné naissance à des applications ayant conduit à des résultats intéressants mais ont aussi soulevé divers problèmes qui n'avaient pas été envisagés dans les premiers travaux. Du point de vue pratique, on regroupe sous les termes de commande adaptative un ensemble de concepts et de techniques utilisées pour l'ajustement automatique en temps réel des régulateurs mis en

œuvre dans des boucles de commande afin de réaliser ou maintenir un certain niveau de performances quand les paramètres du procédé à commander sont variables dans le temps.

La synthèse d'un contrôleur adaptatif impose le plus souvent les étapes suivantes :

- Spécification des performances désirées (temps de réponse, déviation maximale admissible, localisation des pôles, minimisation d'énergie de commande, rentabilité maximum).on recherche, lorsque c'est possible, à les caractériser par indice de performance.
- Définition de la structure de commande ou de type de régulateur qui sera utilisé en vue de réaliser les performances souhaitables.
- Conception du mécanisme d'adaptation qui permettra d'ajuster de façon optimale les paramètres de régulateur utilisée.

Les taches principales de mécanisme d'adaptation sont les suivantes :

- Ajustement automatique des régulateurs et optimisation de leurs paramètres en divers points de fonctionnement du processus.
- Maintien des performances exigées en cas de variation des paramètres du processus.
- Détection des variations anormales des caractéristiques du processus.

Le principe de la commande adaptative est représenté sur la figure (III.15)

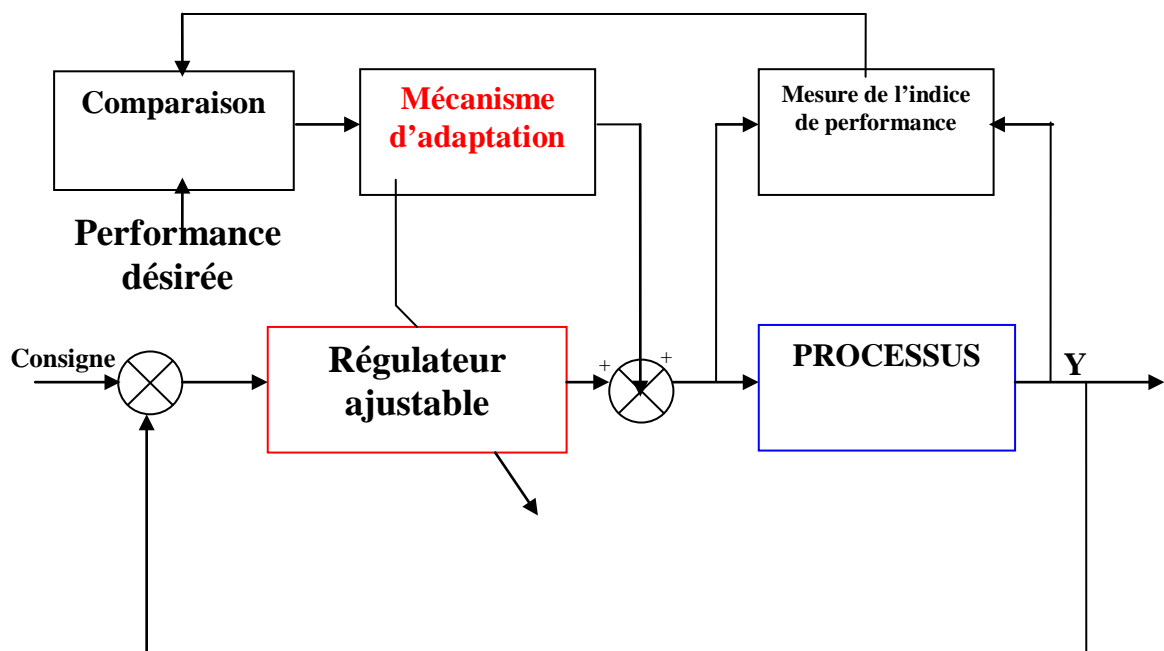


Fig. III.15 : Principe de la commande adaptative.

Selon le caractère des adaptations programmées, on distingue les systèmes de commande adaptative suivants :

- Commande adaptative à gain préprogrammé.
- La commande adaptative directe dont laquelle les paramètres du régulateur sont ajustés directement et en temps réel à partir de la comparaison entre performances réelles et performances désirées (commande adaptative à modèle de référence).
- La commande adaptative indirecte, qui suppose une estimation des paramètres du processus par une procédure d'identification (c'est le cas des régulateurs auto ajustables) [3].

III.9.1 Commande adaptative à gains préprogrammés :

Dans ces systèmes, les adaptations des caractéristiques dynamiques du processus sont déterminées en fonction de l'information à priori disponible, sur les conditions externes et internes de fonctionnement du système.

Ce type de réglage représenté sur la figure (III.16), peut nécessiter la mise en œuvre des capteurs supplémentaires et suppose une grande robustesse du type de commande mise en œuvre [3].

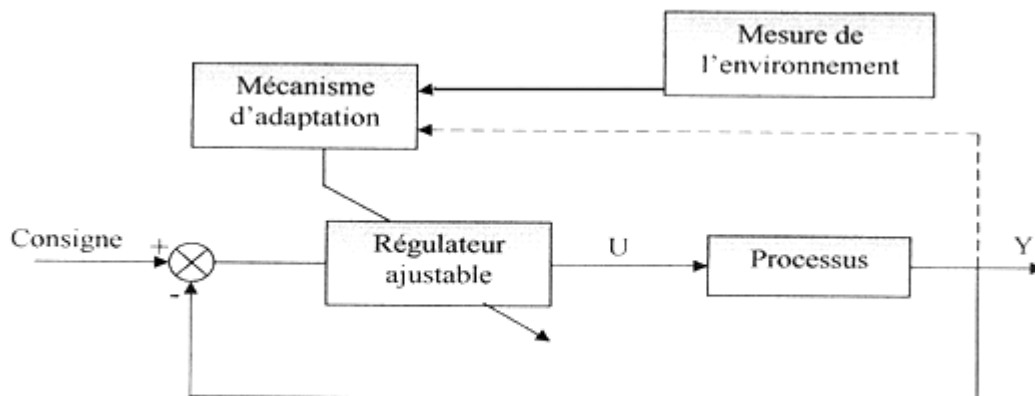


Fig. III.16 : Système de commande à gains préprogrammés

III.9.2 Commande adaptative avec modèle de référence :

Le premier article concernant les systèmes adaptatifs avec modèle de référence a été publié en 1958 par MP.WHITAKER et J. YAMRON & A.KESSER qui a été à l'origine du schéma de base des systèmes de commande à modèle de référence. Depuis plusieurs recherches ont été développées pour aboutir à diverses structures de systèmes adaptatifs à

modèle de référence (abréviations anglaise très utilisée MRAC Model (Référence Adaptif Control).c'est vers les années soixante que furent les premières tentatives de mettre en œuvre ces systèmes et grâce à la mise au point des méthodes de calculs.

La commande adaptative à modèle de référence consiste à adapter l'organe de commande de façon à ce que le processus se comporte comme le modèle de référence. La détermination d'une loi de commande adaptative permet à la réponse du système de suivre celle du modèle même en présence des perturbations en agissant sur les performances dynamiques du système. Le principe de cette commande est illustré dans la figure (III.17).

Il y a plusieurs méthodes pour la synthèse du mécanisme d'adaptation, chacune faisant appel à la théorie de base de l'automatique. Parmi ces méthodes on cite:

- Méthode de gradient.
- Méthode de LYAPUNOV.

Ce type de système de commande adaptative comporte deux étapes à chaque période d'échantillonnage, dans la première phase, on identifie de manière récursive les paramètres du modèle, puis une deuxième phase, on calcul les paramètres du régulateur à partir des paramètres du procédé [3].

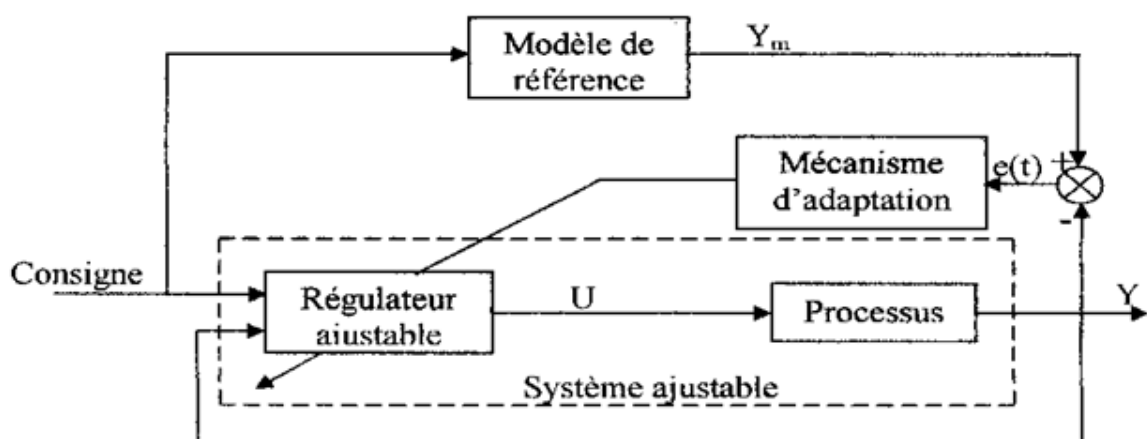


Fig. III.17 : Structure de base de la commande adaptative avec modèle de référence.

III.9.3 Commande adaptative à régulateur auto-ajustable :

En 1958; KALMAN proposa pour la première fois un algorithme auto-ajustable de commande. L'extension et l'implémentation de cet algorithme ont été étudiées par ASTROM et WITTEN MARK. Ce type de commande adaptative consiste à insérer des régulateurs auto-ajustables dans la chaîne d'action de commande. La conception de ces systèmes est basée sur

le principe d'équivalence certaine qui consiste à séparer les problèmes d'identification et de commande. La commande est calculée en utilisant les paramètres estimés du système à régler. La figure (III.18), illustre le schéma bloc du système de commande adaptative avec régulateur auto-ajustable.

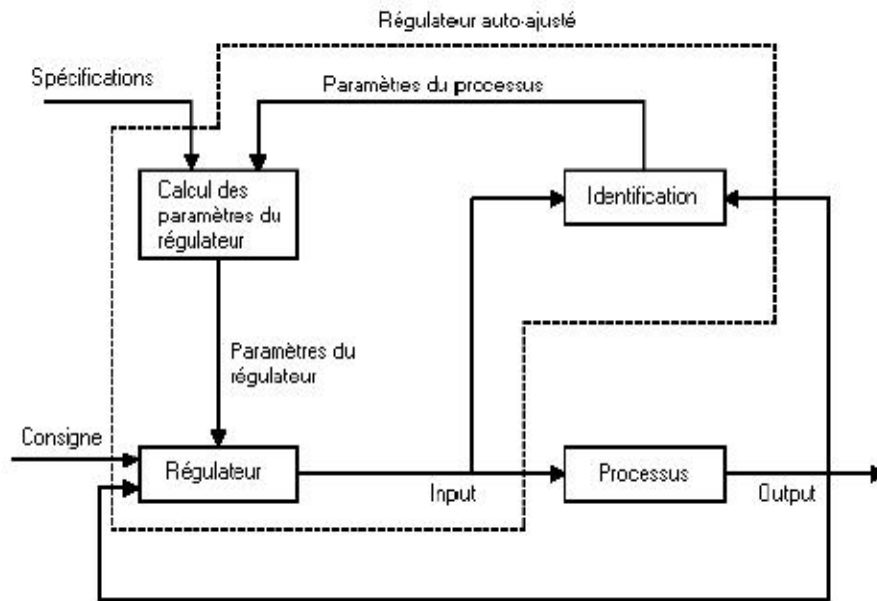


Fig. III.18 : Système de commande avec régulateur auto-ajustable.

Nous pouvons y distinguer 2 boucles :

- une boucle principale, représentant la boucle de réglage conventionnelle.
- une boucle superposée à la boucle principale, composée d'un bloc d'identification du processus et d'un bloc de calcul des paramètres du régulateur.

La réalisation d'une commande adaptative par l'utilisation d'un régulateur auto ajusté se divise ainsi en deux étapes distinctes :

1. Identification du processus
2. Mise à jour des paramètres du régulateur.

Lorsque les paramètres du processus ont été identifiés, ils sont alors transmis au bloc de calcul des paramètres du régulateur. Ce bloc, en fonction des paramètres fournis et de spécifications définies par le cahier des charges (rapidité, amortissement, ...) va calculer les nouveaux paramètres du régulateur et les lui transmettre, permettant ainsi une mise à jour de ce dernier. Le cycle ainsi décrit va se répéter durant tout le temps de fonctionnement de la boucle de réglage.

La fréquence à laquelle l'auto ajustement doit s'effectuer dépend principalement de la non-linéarité du processus. En effet, plus un processus est non-linéaire, plus la fréquence à laquelle les paramètres du ou des régulateurs doivent être modifiés est élevée. Cette fréquence est cependant limitée par le temps nécessaire à l'obtention des échantillons utilisés pour l'identification. Les perturbations modifiant le comportement du processus, ainsi que les changements du point de fonctionnement influencent également, de manière indirecte la fréquence d'auto ajustement [4].

Ces systèmes de commande supposent une estimation des paramètres du système par une procédure d'identification, Les paramètres du régulateur sont ajustés de manière récursive (en temps réel). Les algorithmes d'identification doivent présenter trois caractéristiques :

- ✓ Être simples pour ne pas alourdir le noyau temps réel et rester compatibles avec la période d'échantillonnage.
- ✓ Converger rapidement pour assurer un suivi-correct des paramètres (variant lentement).
- ✓ Être insensibles aux bruits de mesure et en particulier ne pas introduire de biais

$$\left(\lim_{N \rightarrow \infty} \hat{\theta}_N = \theta_{reel} \right)$$

La méthode qui est fréquemment utilisée pour estimer les paramètres est celle des MCR.

Plusieurs méthodes permettant de faire la synthèse des systèmes de commande adaptative ont été proposées. Parmi les méthodes les plus utilisées, on distingue :

- La méthode de commande à réponse pile.
- La méthode de commande basée sur le placement des pôles et des zéros pour imposer un comportement dynamique au système en boucle fermée.
- La méthode de commande à l'aide des régulateurs ajustables à action proportionnelle, intégrale et dérivée (APID)
- La méthode de commande à l'aide de correcteur à variance minimale [3].

III. 10 Choix de la commande adaptative:

On choisit la méthode d'adaptation selon le tableau III-1:

D'après le tableau ci-dessus et d'après notre objet à régler, on choisit la commande adaptative avec régulateur auto-ajustable, en utilisant la méthode de commande basée sur le placement des pôles pour la synthèse de mécanisme d'ajustement des paramètres du régulateur.

Type de méthode	Domaine d'utilisation	Temps de calcul	Mode de traitement	Calcul à effectuer	à modélisation
A gain pré programmé	Changement rapide des paramètres des systèmes	Moyen	Analogique Numérique	Mesure perturbations Calcul de dépendance entre la perturbation et les paramètres du régulateur	Nécessité «un modèle précis et fiable. Domaine de variation des paramètres connus.
Directe	Changement rapide des paramètres du système à commander	Moyen	Analogique Numérique	Loi de commande	Domaine de variation des paramètres du système à régler pour le dimensionnement du régulateur. Modèle plus moins précis.
Indirecte	Changement lent des paramètres du système à commander.	Important	Numérique	Identification calcul des coefficients du régulateur Calcul de la loi de commande	Modèle moins précis. Information sur le modèle nécessaire au début de l'identification

Tableau III.1

III.11 Méthode de commande adaptative basée sur le placement des pôles:

III.11.1 Présentation de la méthode:

Cette méthode de commande a pour objectif d'imposer un comportement dynamique du système en boucle fermée à partir du choix de la localisation de ses pôles et de ses zéros, c'est-à-dire choisir un correcteur tel que la sortie du système suive au mieux la consigne.

Pour que le système en boucle fermée ait des pôles pré assignés et choisis dans le domaine admissible figure (III.19), il convient de prendre en considération les facteurs suivants

a- un amortissement absolu minimal caractérisé par le degré de stabilité.

b- Un amortissement relatif convenable (ξ).

c- Une valeur inférieure limitée du degré d'amortissement absolu en fonction des types d'organes d'exécution.

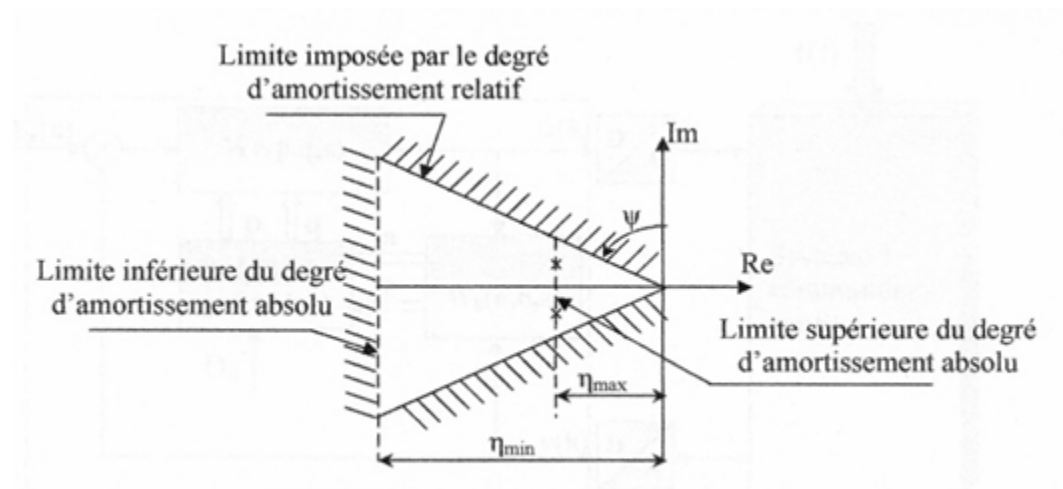


Fig. III.19 : Domaine du choix des pôles.

III. 11.2 Synthèse d'algorithme de commande:

III. 11.2.1 choix du type de régulateur :

Avec l'identification, le dimensionnement des régulateurs est une composante fondamentale de la mise en place d'une commande adaptative. Il s'agit en effet de recalculer les paramètres de régulateur à chaque fois qu'un nouveau modèle est retrouvé pour le processus.

Le régulateur à caractère adaptatif peut être de type :

- ✓ PID
- ✓ RST

Une des méthodes la plus répandue pour dimensionnement des régulateurs PID est celle de placement des pôles' permettant de contrôler simultanément la rapidité ainsi que le dépassement de la grandeur à régler.

De plus en plus d'ouvrages scientifiques spécifiques au domaine de la régulation adaptative présentent des méthodes de dimensionnement relativement simples pour des régulateurs polynomiaux RST à trois branches. Ces méthodes permettent par exemple de générer des commandes prédictives, afin d'anticiper le retard pur du processus et d'éliminer les oscillations de la mesure [4].

La conception d'un régulateur auto-ajustable basée sur le placement des pôles du système en boucle fermée. Dans cette méthode, le régulateur utilisé est un régulateur numérique adaptatif comme l'indique schématiquement la figure (III.20), [3] et [4].

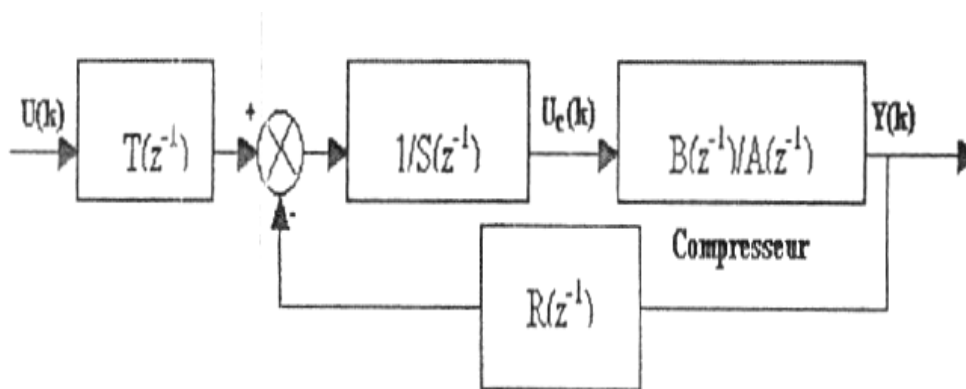


Fig. III.20 : Structure canonique d'un régulateur numérique RST

III. 11.2.2 synthèse des paramètres du régulateur :

La régulation est caractérisée par une dynamique :

$$A_r(Z^{-1})[Y_{MK} - Y_K] = 0 \quad (III.29)$$

Avec : (III.30)

$$A_r(Z^{-1}) = 1 + a_1^r Z^{-1} + a_2^r Z^{-2} + \dots + a_n^r Z^{-n} \quad (III.31)$$

Le système étant modélisé par :

$$Y_{K+1} = -\sum_{i=1}^n a_i Z^{-1} Y(K+1) + \sum_{j=1}^m b_j U_K$$

Les a_i et les b_j sont déterminés par la méthode des MCR. En remplaçant (III.31), on obtient :

$$\begin{aligned}
A_r(Z^{-1})Y_M(k+1) &= A_r(Z^{-1})Y(k+1) \\
&= Y(k+1) + a_1^r Y(k) + \dots + a_n^r Y(k-n+1) \\
&= ((a_1^r - a_1)Y(k) + \dots + (a_n^r - a_n)Y(k-n+1)) + b_1 U(k) + \dots + b_m U(k-m)
\end{aligned} \tag{III.32}$$

On déduit la loi de commande :

$$U(k) = \frac{A_r(Z^{-1})Y_M(k+1) - (a_1^r - a_1)Y(k) - \dots - (a_n^r - a_n)Y(k-n+1) - b_2 U(k-1) - \dots - b_m U(k-m)}{b_1} \tag{III.33}$$

On généralise cette méthode par l'utilisation de techniques du placement de pôles par un régulateur numérique de type RST. Dans cette méthode [LANDAU] donne la structure de la boucle de commande donnée par la figure (III.20), elle permet une meilleure exploitation des possibilités de la commande numérique que l'utilisation d'un simple régulateur, avec une approche permettant une mise en oeuvre aisée sur calculateur numérique.

L'objectif de la synthèse d'un régulateur numérique se traduit alors par la détermination de R, S et T afin d'obtenir des fonctions de transfert en boucle fermée vis-à-vis de la consigne et de la perturbation qui permettent de satisfaire les performances imposé.

La fonction de transfert du compresseur est donnée par :

$$H(Z^{-1}) = \frac{B(Z^{-1})}{A(Z^{-1})} \tag{III.34}$$

Avec :

$$A = [1 \ a_1 \ a_2] = [1 \ -1.84 \ 0.86], \quad B = [b_1 \ b_2] = [0.289 \ -0.2347]$$

La fonction de transfert du système en boucle fermée entre la consigne U (t) et la sortie Y(t), utilisant une structure canonique de régulateur numérique s'écrit

$$\begin{aligned}
H_{BF}(Z^{-1}) &= \frac{B(z^{-1}).T(z^{-1})}{A(z^{-1}).S(z^{-1}) + B(z^{-1}).R(z^{-1})} \\
&= \frac{B(z^{-1}).T(z^{-1})}{P(z^{-1})}
\end{aligned} \tag{III.35}$$

Avec :

$$P(Z^{-1}) = A(Z^{-1}).S(Z^{-1}) + B(Z^{-1}).R(Z^{-1}) \tag{III.36}$$

Les performances désirées en boucle fermée seront exprimées, en terme des pôles désirés, en boucle fermée P (Z⁻¹). Et éventuellement en terme des zéros désirés. Cette stratégie permet de calculer un régulateur numérique RST pour des systèmes stables ou instables.

a) Choix des pôles en boucle fermée P (Z⁻¹) :

Les pôles en boucle fermée, qui sont les racines de polynôme P (Z⁻¹), définissent en grande partie les performances en régulation, on peut spécifier un polynôme P (Z⁻¹). Définissant les pôles en boucle fermée à partir d'un modèle du 2^{ème} ordre, ayant la fréquence propre et l'amortissement désiré.

En posant :

$$P(Z^{-1}) = 1 + P_1(Z^{-1}) + P_2(Z^{-2}) \quad (\text{III.37})$$

Avec :

$$P_1 = -2.\alpha.\beta$$

$$P_2 = \alpha^2$$

$$\alpha = e^{-\xi\omega_0.T_e}, \beta = \cos(\omega.T_e), \omega = \omega_0.\sqrt{1-\xi^2}.$$

Tels que :

ω_0 : est la pulsation propre,

ξ : est le facteur d'amortissement.

T_e : période d'échantillonnage.

[LANDAU] donne une condition pour le choix de la période d'échantillonnage et la pulsation propre donnée par:

$$0.25 \leq \omega_0.T_e \leq 1.5$$

$$0.7 \leq \xi \leq 1$$

Pour calculer R et S il faut résoudre l'équation polynomiale (III.36), connue sous le nom d'identité de **BEZOUT** ou équation **DIOPHANTINE**. (Voir annexe B)

La résolution d'identité de **BEZOUT** donne les degrés de R, S et P:

$$P(Z^{-1}) = 1 - 1.37Z^{-1} + 0.468Z^{-2} \quad (\text{III.38})$$

$$R(Z^{-1}) = 2.032 - 0.421Z^{-1}. \quad (\text{III.39})$$

$$S(Z^{-1}) = 1 - 0.122Z^{-1} \quad (\text{III.40})$$

b) calcul de T (Z⁻¹) poursuite :

Dans le cas d'un changement de la consigne, on souhaite faire suivre à la sortie du procédé Y (t) une trajectoire Y*(t), cette trajectoire peut être mémorisée ou engendrée à chaque changement de consigne à l'aide d'un modèle de référence donnée par H_m (Z⁻¹) d'où :

$$H_m(Z^{-1}) = \frac{B_m(Z^{-1})}{A_m(Z^{-1})} = \frac{Y^*(t)}{r(t)} \quad (\text{III.41})$$

Avec :

$$A_m(Z^{-1}) = 1 - 1.36Z^{-1} + 0.47Z^{-2} \quad (\text{III.42})$$

$$B_m(Z^{-1}) = 0.0658Z^{-1} + 0.0514Z^{-2} \quad (\text{III.43})$$

Et on choisit T (Z⁻¹) pour assurer :

- ✓ Un gain statique unitaire entre Y*(t) et Y (t)
- ✓ La compensation de la dynamique de régulation P (Z⁻¹)

Ceci conduit à poser :

$$T(Z^{-1}) = GP(Z^{-1})$$

Où

$$\begin{cases} G = \frac{1}{B(1)} & \text{si } B(1) \neq 0 \\ G = 1 & \text{si } B(1) = 0 \end{cases}$$

Donc :

$$T(Z^{-1}) = 3.45 - 4.74 Z^{-1} + 1.67 Z^{-2}$$

La structure réalisant ce type de commande est donnée par (figure III.21) suivante :

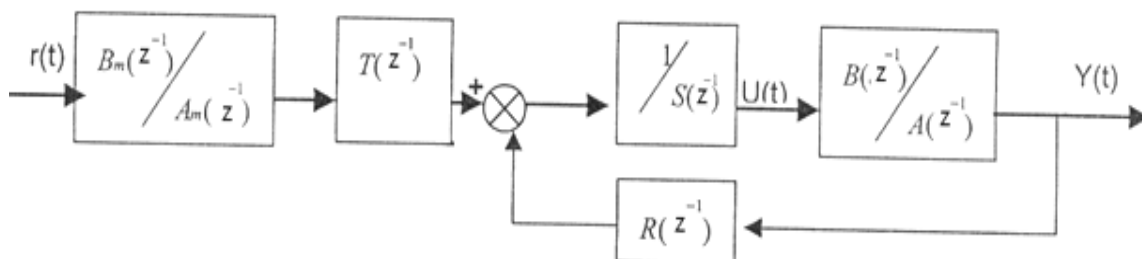


Fig. III.21 : Structure canonique d'un régulateur RST (Régulation et poursuite)

L'équation de la loi de commande devient alors :

$$S(Z^{-1})U(t) + R(Z^{-1})Y(t) = T(Z^{-1})Y^*(t+1) \quad (\text{III.44})$$

$$U(t) = \frac{T(Z^{-1})Y^*(t+1) - R(Z^{-1})Y(t)}{S(Z^{-1})} \quad (\text{III.45})$$

c) Algorithme de commande adaptative avec placement de pôles explicite :

Initialisation des données : $P(Z^{-1})$, $G(Z^{-1})$, d , n , m , et $Y^*(t)$

Etape 1 : Estimation de $A(Z^{-1})$ et $B(Z^{-1})$ en utilisant l'algorithme

MCR à trace constante (voir annexe c).

Avec $\theta^T(t) = [a_1, \dots, a_n, b_1, \dots, b_m]$

$\phi^T(t) = [-y(t-1), \dots, -y(t-n), U(t-d-1), \dots, U(t-d-m)]$.

Etape 2 : Résolution de l'équation DIOPHANTINE, et calcul de $T(q^{-1})$ à partir de (III.39).

Etape 3 : calcul de la commande donnée par (III.45)

$t=t+1$ revenir à étape 1.

III.12 Résultats de simulation :

Régulation (calcul de $R(Z^{-1})$ et $S(Z^{-1})$) :

On spécifie le polynôme donné par la relation (III.37) :

$$P(Z^{-1}) = 1 + P_1(Z^{-1}) + P_2(Z^{-2})$$

$$P_1 = -2.\alpha.\beta$$

$$P_2 = \alpha^2$$

Avec :

$$\alpha = e^{-\xi\omega_0.T_e}, \beta = \cos(\omega.T_e), \omega = \omega_0.\sqrt{1-\xi^2}.$$

$$0.25 \leq \omega_0.T_e \leq 1.5 \quad (\text{III.46})$$

$$0.7 \leq \xi \leq 1$$

Assurant que la période d'échantillonnage et la pulsation propre vérifient la condition (III.46).

Pour avoir un système amorti et un meilleur temps de réponse. Donc on a choisi :

$$P(Z^{-1}) = 1 - 1.37Z^{-1} + 0.468Z^{-2} \quad (\text{III.47})$$

Les paramètres de régulateur sont donnés par :

$$\begin{cases} R(Z^{-1}) = 2.032 - 0.421Z^{-1} \\ S(Z^{-1}) = 1 - 0.122Z^{-1} \\ T(Z^{-1}) = 3.46 - 4.75Z^{-1} + 1.6Z^{-2} \end{cases} \quad (\text{III.48})$$

La réponse du système à régler est représentée par la figure (III.22), la figure (III.23) représente la réponse de la commande.

L'erreur de prédiction est donnée par la figure (III.24)

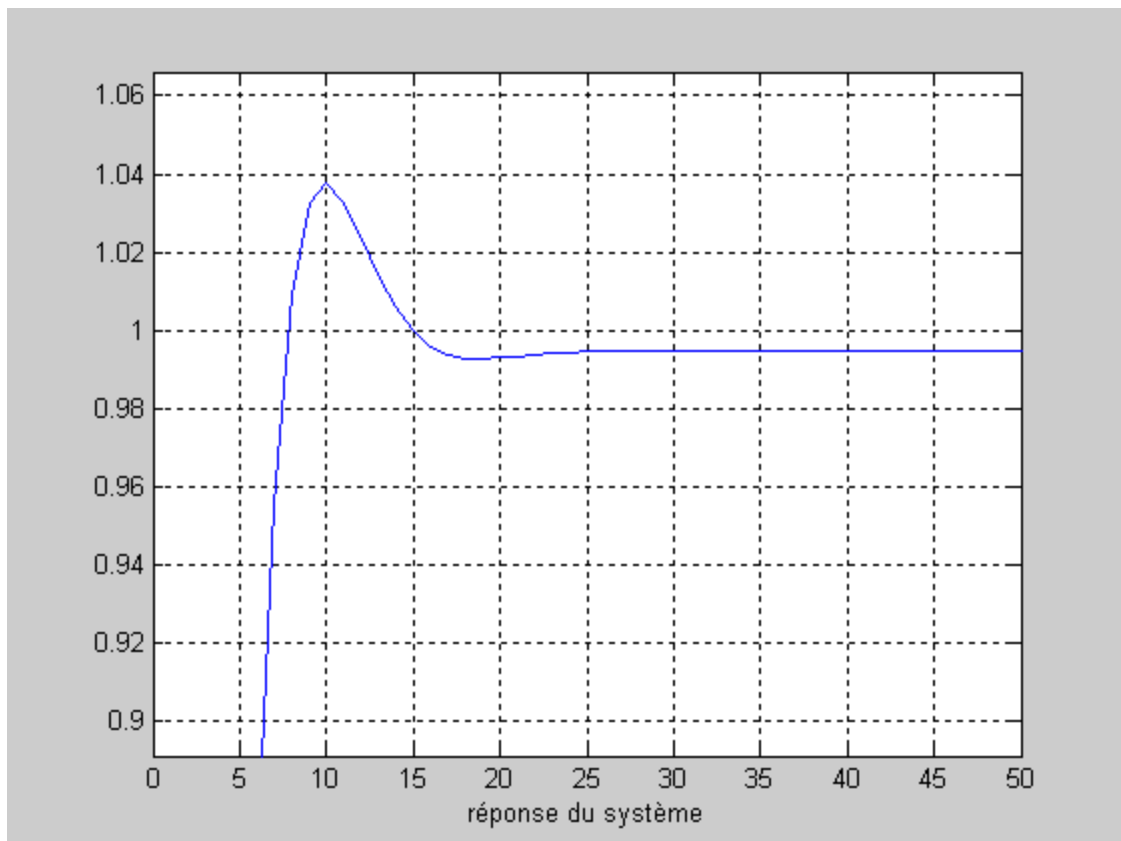


Figure (III.22) : La réponse du système après correction

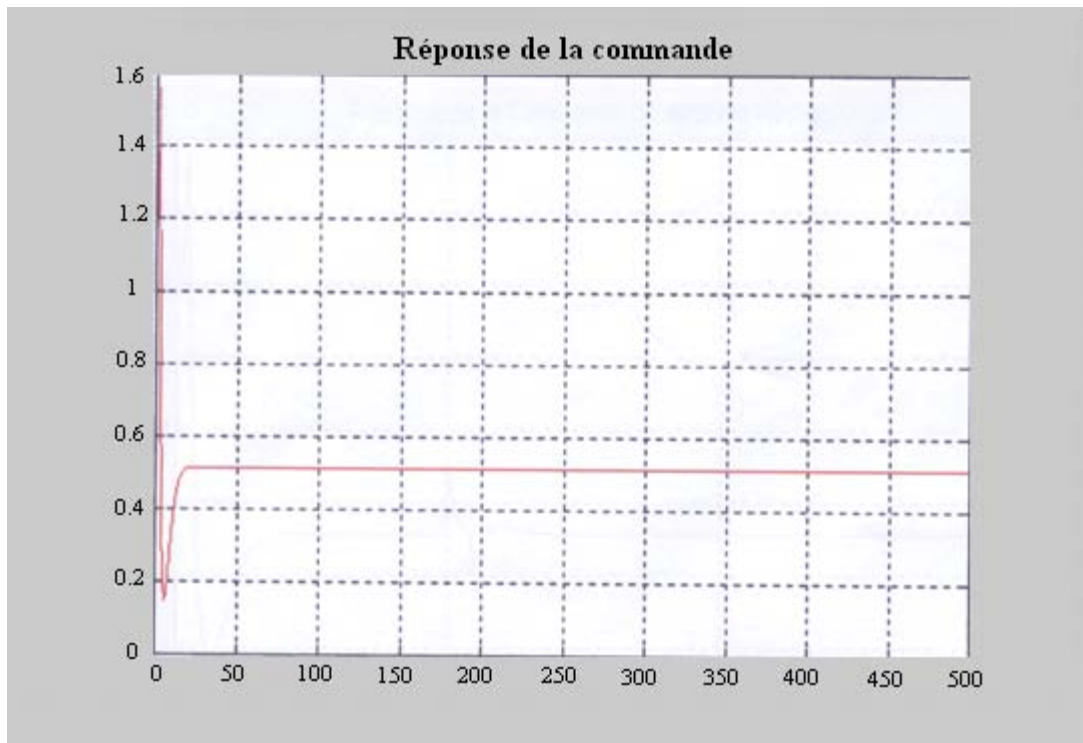


Figure (III.23) : La réponse de la commande

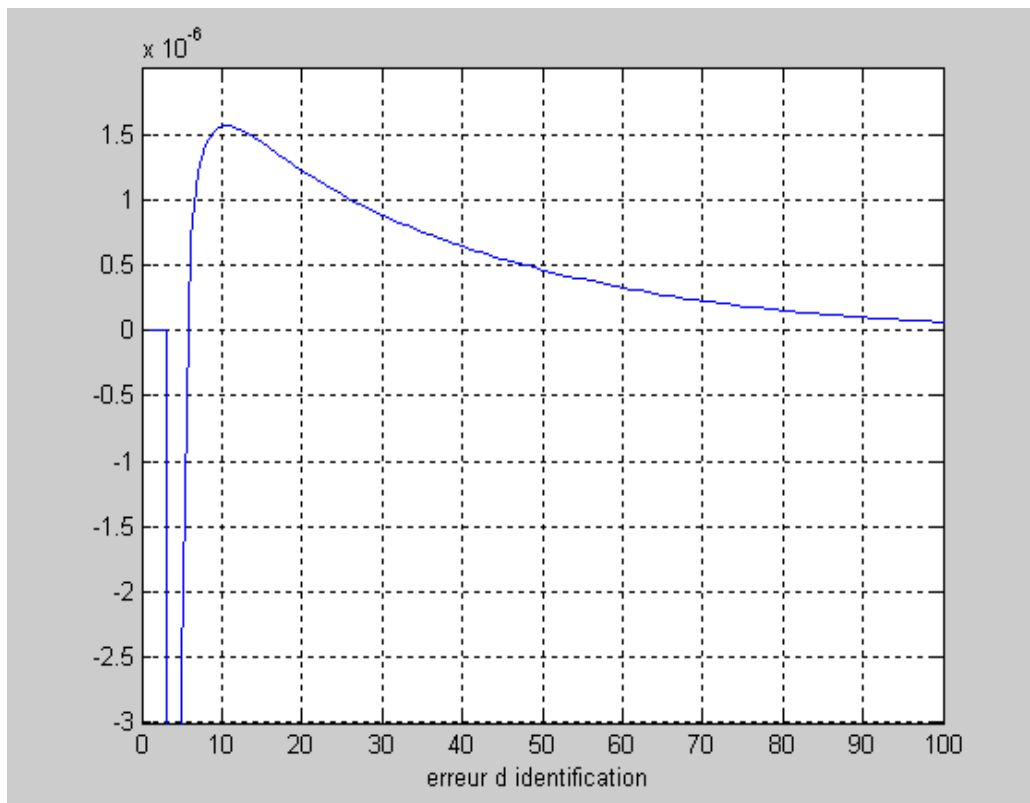


Figure (III.24) : l'erreur de prédiction

Pour avoir la robustesse de cette stratégie de commande, on applique une perturbation dans le régime établi, la réponse du système réglé avec une perturbation est représentée par la figure(III.25), et la réponse de la commande est représentée par la figure(III.26).

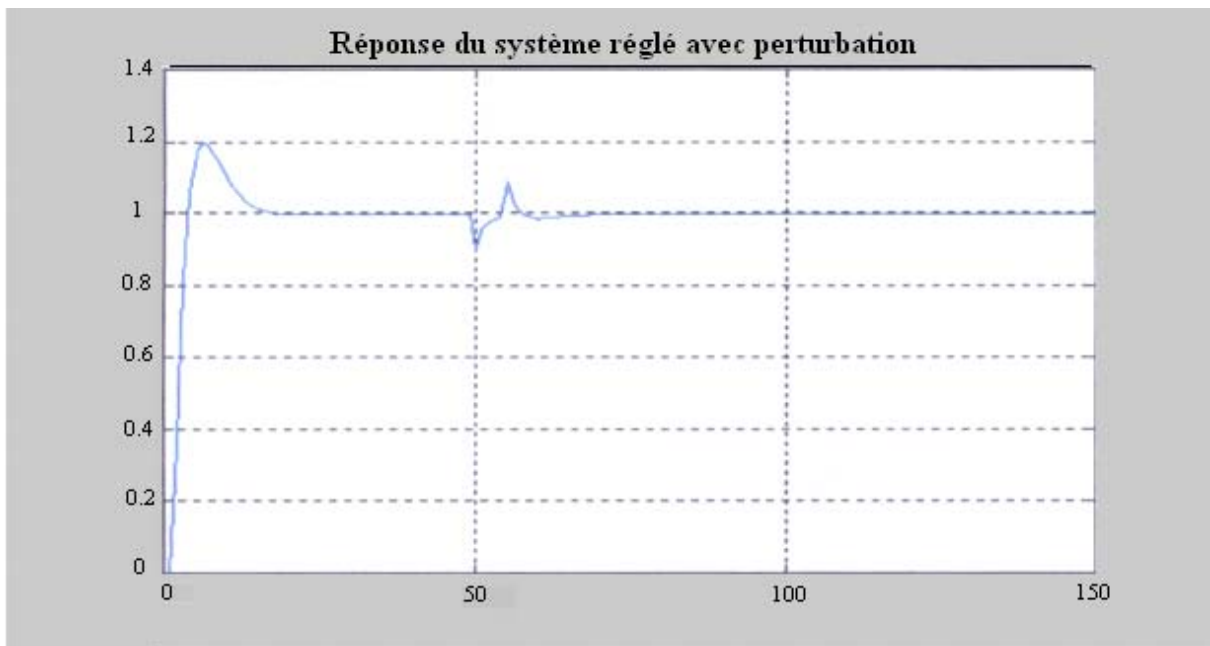


Figure (III.25) : La réponse du système réglé avec perturbation

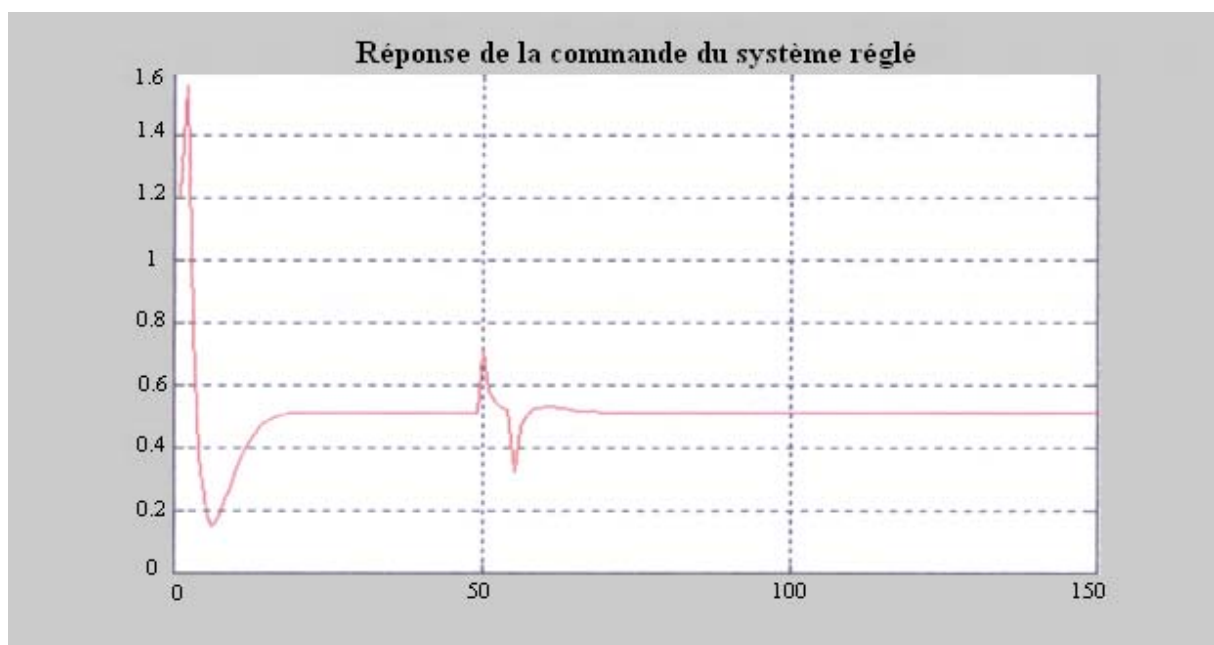


Figure (III.26) : Réponse de la commande du Système Réglé

III.13 Interprétation des résultats :

L'allure du graphe de l'erreur de prédiction obtenue est satisfaisante, elle atteint sa valeur maximale ($18 \cdot 10^{-4}$) au début de l'estimation, ensuite va diminuer jusqu'à ce qu'elle soit totalement nulle.

Malgré la variation des paramètres du système à commander le régulateur auto ajustable donne de bons résultats.

D'après la réponse indicielle du système en boucle fermée figure (III.22) on remarque que la sortie du système suit la consigne, avec des performances convenables (temps de réponse $T_r=10s$, dépassement $D= (5\%)$).

D'après la réponse indicielle du système réglé avec perturbation figure (III.23) on remarque que son allure atteint sa valeur maximale (5%). Pendant les premiers instants d'échantillonnages, ensuite elle est éliminée rapidement par le régulateur adaptatif.

III.14 Conclusion :

L'application de la commande adaptative avec régulateur auto-ajustable pour la régulation anti-pompage du compresseur nous a permis d'obtenir de bons résultats.

Dans ce chapitre, on a montré que lorsqu'il y a une variation des paramètres du modèle, une adaptation de la commande assure largement la stabilité et la convergence, on remarque aussi qu'en commande adaptative, la réalisation d'une bonne commande ne nécessite pas une bonne réalisation de l'identification et surtout dans le cas de la régulation où la commande varie continuellement.

Du point de vue économique, l'application de la commande adaptative diminue les pertes de la production, et résout le problème de l'ouverture permanente de la vanne de recyclage, ce qui implique l'obtention d'un rendement maximal.

Chapitre IV

*Système de contrôle par automate
programmable*

IV.1 Introduction :

Le progrès technologique dans le monde de l'électronique et de l'informatique a permis une évolution considérable dans le domaine du contrôle des procédés industriels. Cette évolution est traduite par un changement dans les techniques de contrôle : Passage des systèmes pneumatiques aux systèmes électroniques analogiques puis numériques, du contrôle centralisé au contrôle distribué qui est le DCS et des systèmes à relais aux systèmes à base d'Automates Programmables.

IV.2 Définition d'un automate programmable :

L'automate programmable industriel API (Programmable logic Controller PLC) est un appareil électronique programmable destiné, à l'aide d'un langage adapté, pour piloter en ambiance industrielle et en temps réel des procédés ou des systèmes automatisés.

En fonction du programme chargé en mémoire, l'automate reçoit des informations logiques, analogiques ou numériques à partir des dispositifs d'entrées et ordonne des données pour la commande des dispositifs de sortie. Le programme de fonctionnement est effectué à partir d'instructions établies en fonction du processus à réaliser.

IV.3 Présentation de l'automate programmable S7-300 :

L'automate programmable industriel SIMATIC S7-300 est un appareil électronique destiné à la commande et à la surveillance en temps réel des processus industriels. Le S7-300 est un automate modulaire de moyenne gamme SIMATIC S7 fabriqué par la firme SIEMENS.

Ces modules sont simplement accrochés sur un profilé-support et vissés pour former un ensemble robuste.

La riche gamme de modules de l'automate S7-300 permet la réalisation d'extensions centralisées et de structures décentralisées. [6]

IV.4 Caractéristiques de l'automate programmable S7-300 :

L'automate S7-300 présente les caractéristiques suivantes :

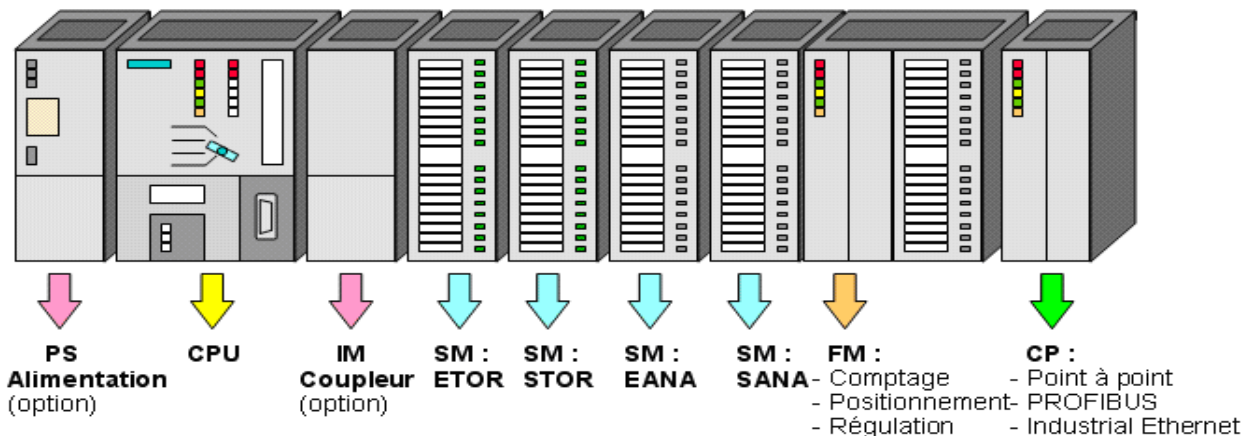
- Automate très performant, adapté à la résolution des problèmes.
- Gamme diversifiée de module avec possibilité d'extension jusqu'à 32 modules.
- Bus de fond de panier intégré aux modules et les liaisons entre les modules sont assurées par des connecteurs enfichés aux dos des modules.
- Liberté de montage aux différents emplacements.

- Configuration et paramétrage à l'aide de l'outil de configuration matérielle.
- Raccordement central de la console de programmation PG avec accès à tous les modules.
- Possibilité de mise en réseau avec l'interface multipoint MPI, l'interface AS-i, le PROFIBUS ou l'Industriel Ethernet. [6]

IV.5 Constitution de l'automate programmable S7-300 :

L'automate S7-300 est un système d'automatisation disposant d'une vaste gamme de modules qui sont représentés dans la figure suivante :

Figure 37 : Disposition des modules de l'automate S7 300



IV.5.1 Modules d'alimentation (PS) :

Ces modules permettent de fournir à l'automate l'énergie nécessaire à sa mise en marche, ils transforment la tension secteur 220/380V à une tension continue de service de 5V, 12V, 24V et assurent ainsi l'alimentation des circuits internes de l'automate ainsi que les différents circuits des capteurs et des actionneurs.

Le tableau suivant représente les différents modules d'alimentation de l'automate S7-300 :

REFERENCE	COURANT DE SORTIE	TENSION A L'ENTREE	TENSION A LA SORTIE
PS 307	2A	120V/230V AC	24V DC
PS 307	5A	120V/230V AC	24V DC
PS 307	10A	120V/230V AC	24V DC

Tableau 1 : Différents modules d'alimentation de l'automate S7-300

L'automate est mis sous tension à l'aide d'un commutateur qui se trouve sur le module d'alimentation. Des voyants sont utilisés pour l'indication de mise sous tension de l'automate.



Figure 38 : Module d'alimentation de l'automate S7 300

IV.5.2 Unité Centrale (CPU) :

La CPU est le cerveau de l'automate, elle lit les états des entrées, ensuite, elle exécute le programme utilisateur qui se trouve en mémoire et enfin, elle commande les sorties.

Elle comporte une unité de commande et de calcul, des mémoires, un programme système et des interfaces de communication. Elle réalise toutes les fonctions logiques, arithmétiques et de traitement numérique (transfert, comptage, temporisation ...etc.).

L'automate S7 300 dispose d'une large gamme de CPU tel que la CPU 315-2 DP qui permet la mise en place jusqu'à 32 modules. Elle possède une grande puissance de traitement en arithmétique binaire et à virgule flottante et génère grâce à sa vitesse de traitement élevée des temps de cycle machine courts. La petite largeur des modules permet de réaliser des constructions compactes et des armoires électriques à encombrement réduit.



Figure 39 : CPU 315-2 DP de l'automate S7 300

La CPU est constituée des éléments importants suivant :

a) Processeur :

Le processeur est l'élément qui exécute les instructions, c'est l'ensemble fonctionnel chargé d'assurer le contrôle de l'ensemble de la machine et d'effectuer les traitements demandés par les instructions des programmes. Il est composé des éléments suivants :

- Une unité logique (UL) : traite les opérations logiques telles que les fonctions ET, OU, ...etc.
- Unité arithmétique et logique (UAL) : traite les opérations de calcul, temporisations et comptages.
- Un registre d'instructions : contient les instructions à exécuter.
- Un accumulateur : considéré comme un registre dans lequel se range une donnée ou un résultat.
- Un décodeur d'instructions : détermine l'instruction qui doit être exécutée.
- Un compteur programme ou compteur ordinal : contient l'adresse mémoire de la prochaine instruction à exécuter et gère la chronologie de l'exécution des instructions du programme.

b) Mémoire :

La mémoire est conçue pour contenir toutes les informations nécessaires pour le fonctionnement du système et mémorise les données qui sont utilisés ou produites par les programmes d'applications. On distingue :

- Mémoires vives RAM : elles contiennent le programme et les données utilisateur.
- Mémoires mortes ROM : elles contiennent les données propres à l'automate (système d'exploitation) et que l'utilisateur ne peut que lire le contenu stocké.
- Mémoires programmables (PROM) : elles sont programmables à l'aide d'outils spéciaux, elles contiennent les données propres à l'automate.
- Mémoires programmables effaçables (EPROM) : elles stockent les programmes au point et utilisables avec un matériel spécifique.

c) Signalisations d'état et de défaut :

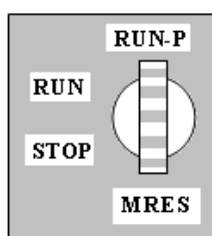
Certains états et défauts de l'automate sont signalés par des LEDS sur la CPU :

Indicateurs	Signification	Explication
SF (rouge)	Liste d'erreurs	Les modules capables de diagnostiquer affichent ici une liste d'erreurs.
BAF (rouge)	Erreur de batterie	Indique si la batterie mémoire tampon ne délivre pas assez de tension ou carrément pas du tout
DC5V (vert)	Alimentation DC5V pour la CPU et le bus panneau arrière	Indicateur pour l'alimentation interne fonctionnelle 5V de la CPU
FRCE (vert)	Forçages	Indicateurs d'état de la CPU, dans les entrées et les sorties par une fonction de test de forçage de commande
RUN (vert)	Etat de fonctionnement RUN	Clignote lors du démarrage de la CPU – Fixe lorsque la CPU est dans l'état Run
STOP (orange)	Etat de fonctionnement STOP	Clignote lorsque le formatage est demandé – Fixe lorsque la CPU est à l'état arrêt

Tableau 2 : Indicateurs de statut et d'erreur de la CPU

d) Commutateur de mode de fonctionnement :

Chaque CPU possède un commutateur de mode de fonctionnement pour commuter entre les différentes catégories de fonctionnement. Celui-ci est la plupart du temps conçu sous la forme d'un commutateur à clé, qui peut être placé sur les modes de fonctionnement RUN et STOP. Les modes de fonctionnement suivants sont possibles :



- RUN-P** : Le programme est traité, toutes les fonctions PG sont autorisées.
- RUN** : Le programme est traité, seules les fonctions PG en lectures sont autorisées.
- STOP** : Le programme n'est pas traité ; toutes les fonctions PG sont autorisées.
- MRES** : Dans cette position, on peut procéder à un formatage.

e) Carte mémoire et pile :

Elles permettent de sauvegarder le contenu du programme en cas de coupure de courant.

f) Bornes pour l'alimentation et la terre fonctionnelle :

Elles sont communes pour la majorité des CPU de l'automate S7-300, on distingue les bornes d'alimentation suivantes :

- Le cavalier amovible pour le montage sans liaison à la terre.
- La terre.

g) Interface multipoint MPI :

Un port pour l'interface multipoint ; pour la connexion avec la console de programmation (PG) ou un autre périphérique.

h) PROFIBUS DP (Process Field BUS) :

- L'interface PROFIBUS DP est le profil de protocole pour la connexion de périphérique décentralisé ou d'appareils à champs à temps de réaction très rapides. [6]

IV.5.3 Modules de coupleurs (IM) :

Les coupleurs sont des modules d'extensions ; ils permettent de configurer l'automate sur plusieurs rangées et assurent la communication entre la CPU et les entrées /sorties par l'intermédiaire d'un bus interne, il faut aussi prévoir un module d'alimentation courant supplémentaire pour chaque nouveau châssis.

IV.5.4 Modules de signaux (SM) :

Ces modules établissent la liaison entre la CPU de l'automate S7 300 et le processus commandé. On distingue plusieurs modules de signaux :

a) Modules d'entrées / sorties TOR :

Ils assurent le rôle d'interface entre l'automate et la partie commande.

Les modules d'entrées TOR permettent le raccordement de l'automate aux différents capteurs logiques tels que les fins de course, les boutons poussoirs, les pressostats, les thermostats, les capteurs de niveaux, ...etc.

Les modules de sortie TOR assurent le raccordement de l'automate aux différents actionneurs tels que les vérins, les moteurs, les pompes, les lampes, ...etc.

Les tensions d'entrées et de sorties TOR sont de 24 V, 48 V, 110 V, 220 V en DC et en AC.

b) Modules d'entrées / sorties analogiques :

Ils sont des interfaces entre l'automate et le processus commandé.

Les modules d'entrées analogiques convertissent les signaux analogiques mesurés (courant, tension, pression, température, ...etc.) en signaux numériques à l'aide des convertisseurs CAN pour être traités par l'automate.

Les modules de sorties analogiques convertissent les signaux numériques en signaux analogiques destinés au processus à l'aide des convertisseurs CNA.

IV.5.5 Modules de fonction (FM) :

Ils ont pour rôle l'exécution des tâches de processus spécifiques. Ils sont utilisés pour soulager la CPU dans le traitement des informations et améliorent les performances du travail.

Ces modules se divisent en trois modules spéciaux programmables : le comptage, le positionnement et la régulation.

IV.5.6 Modules de communication (CP) :

Ces modules permettent d'établir les différentes tâches de communication entre plusieurs automates à l'aide des systèmes de bus de terrain industriels.

Dans le domaine des systèmes à bus, on trouve l'interface multipoint MPI, l'interface AS-i, le PROFIBUS (Process Field Bus) et l'Industriel Ethernet.

IV.5.7 Châssis d'extension (UR : Universal Rack) :

Il est constitué d'un profilé support en aluminium et bus de fond de panier avec connecteur.

Il assure le montage et le raccordement électrique des différents modules de l'automate. Il est possible d'utiliser plusieurs châssis en fonction du nombre d'entrées / sorties.

IV.5.8 Console de programmation (PG) ou PC avec le logiciel STEP7 :

Cette console a pour fonction la réalisation, la compilation et le transfert du programme dans l'automate S7-300, la visualisation et le test du programme, la modification et l'archivage des données, la maintenance et le diagnostic.

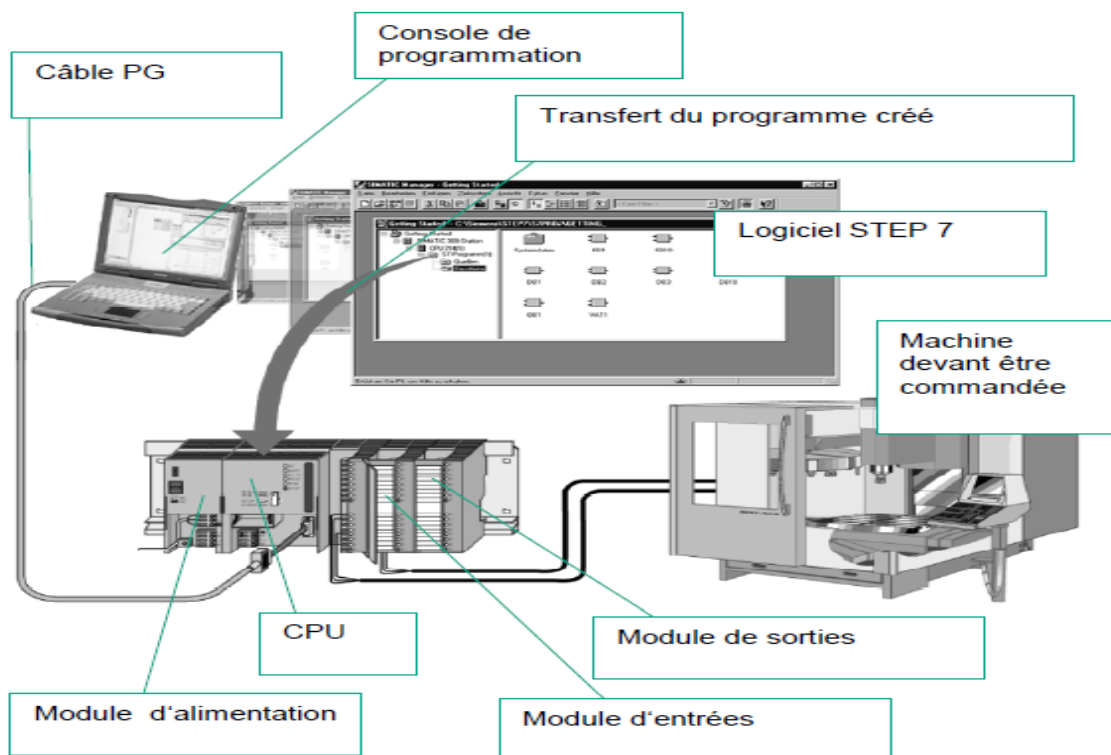
IV.6 Programmation du S7-300 avec le Langage STEP 7 :

Le système d'automatisation SIMATIC S7-300 est un automate modulaire compact constitué principalement d'une alimentation, d'une CPU et de modules d'entrées ou de sorties.

L'automate programmable contrôle et commande un processus suivant un programme réalisé à l'aide du logiciel STEP 7 et chargé dans la CPU à travers l'interface de chargement.

Le logiciel STEP7 est l'outil de base pour la configuration et la programmation de systèmes d'automatisation SIMATIC, il présente diverses caractéristiques qui offrent une grande

flexibilité lors de la programmation et permet l'utilisation d'autres logiciels optionnels tels que



S7-GRAPH ou S7-PLCSIM.

Figure 40 : Vue d'ensemble de l'automatisme.

IV.6.1 Représentation de programme :

Pour créer des programmes S7, Le logiciel STEP 7 dispose de trois langages de programmation : langage à contact (CONT), logigramme (LOG) et liste d'instructions (LIST).

La compilation du programme est possible dans les trois modes de représentation. Les programmes en CONT et en LOG peuvent systématiquement être traduits en langage LIST et stockés ainsi dans la mémoire de programmation de l'automate.

Nous avons opté pour le langage à contact (CONT) pour l'implémentation sur l'automate S7/300.

a) Liste d'instruction (LIST) :

Le langage LIST est un langage textuel, qui est très proche du langage assembleur employé pour la programmation des microprocesseurs, ce mode de programmation utilise de différentes instructions qui comportent des opérateurs et des opérands, ainsi on peut introduire des étiquettes et des commentaires.

b) Logigramme (LOG) :

Ce mode de programmation utilise les boîtes fonctionnelles graphiques de l'algèbre booléenne pour représenter des éléments logiques. Les différentes fonctions sont représentées par des symboles avec indicateurs de fonction, les entrées sont écrites à gauche du symbole et les sorties à droite de ce dernier.

c) Schéma à contact (CONT) :

Ce langage qui s'inspire des schémas de circuits est connu aussi sous le nom (LADDER), est une représentation graphique d'équations booléennes combinant des contacts fermés ou bien ouverts en entrées et des relais en sorties. Il est limité de droite et de gauche par des barres d'alimentation. Le LADDER est le langage le plus fréquent en industrie.

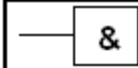
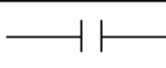
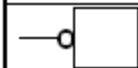
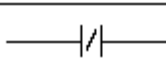
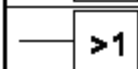
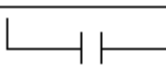
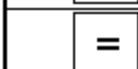
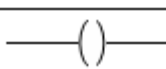
LOG	CONT	LIST	
		U	ET
		N	NON
		O	OU
		=	ATTRIBUTION

Figure 41 : Représentation d'opérations binaires avec les langages de programmation

IV.6.2 Les blocs STEP7 :

Le logiciel STEP7 dans ces différents langages de programmation dispose de deux types de blocs : les blocs utilisateur et les blocs système.

IV.6.2.1 Les blocs utilisateur :

Ces blocs destinés à structurer le programme utilisateur dont on peut citer les blocs importants suivants :

a) Blocs d'organisations (OB) :

Les blocs d'organisations constituent l'interface entre le système d'exploitation et le programme utilisateur. Ces blocs remplissent des tâches différentes : ils gèrent le traitement de programme cyclique et déclenchement par alarme, ainsi que le comportement à la mise en route de l'automate programmable et le traitement des erreurs.

Ils définissent l'ordre dans lequel les différentes parties du programme seront traitées. L'exécution d'un OB peut être interrompue par l'appel d'un autre OB selon la priorité. L'OB1 est le bloc prioritaire.

Le bloc d'organisation pour le traitement de programme cyclique (OB1) constitue le traitement normal pour les automates programmables.

b) Blocs fonctionnels (FB) :

Un bloc fonctionnel est un bloc avec mémoire. Les paramètres transmis au FB ainsi que les variables statiques sont sauvegardés dans le bloc de données d'instance qui lui est associé. Les variables temporaires sont rangées dans la pile des données locales. Ces blocs sont par exemple utilisés lorsqu'il s'agit de programmer des régulateurs.

c) Fonction (FC) :

Une fonction (FC) est un bloc de code sans mémoire. Les variables temporaires d'une fonction sont sauvegardées dans la pile des données locales. Ces données sont perdues à l'achèvement de la fonction. Les fonctions peuvent faire appel à des blocs de données globaux pour la sauvegarde des données.

d) Blocs de données (DB) :

Ces blocs servent à stocker les données du programme utilisateur. On distingue deux types : les blocs de données globaux affectés à n'importe quel bloc utilisateur et les blocs de données d'instance qui sont associés à un bloc fonctionnel et peuvent contenir en plus des données de multi-instances que l'on aura éventuellement définies.

IV.6.2.2 Les blocs système :

Ils sont des blocs prédéfinis et intégrés dans le système d'exploitation de la CPU, ces blocs peuvent être appelés par le bloc utilisateur et utilisés dans le programme.

Il s'agit des blocs suivants:

Les blocs fonctionnels systèmes (FSB), les fonctions systèmes (SFC) et les blocs de données système (SDB).

IV.6.3 Structure d'une programmation :

a) Programme linéaire :

Il est utilisé pour des commandes simples et de volumes moins importants. Les multiples opérations et instructions de différentes fonctions sont stockées dans un seul bloc d'organisation (OB1) qui traite cycliquement le programme.

b) Programme structuré :

Pour les automatismes complexes, le programme utilisateur est subdivisé en fonctions principales que l'on programme à l'aide des blocs de codes (OB, FB, FC), l'OB1 contient le programme principal qui sera exécuté par la CPU puis il fait appel aux autres blocs quand il le faut pour délivrer les données correspondantes, et dès que la CPU termine l'exécution du programme stocké dans le bloc appelé, elle reviendra pour suivre l'exécution du programme du bloc appelant. Ce genre de traitement de programme est utilisé lorsque le procédé à automatiser est complexe car il permet de simplifier l'organisation, la gestion et le test du programme.

c) Programme segmenté :

Les différentes fonctions du programme sont stockées dans des blocs isolés, l'OB1 qui contient le programme principal appelle ces blocs l'un après l'autre.

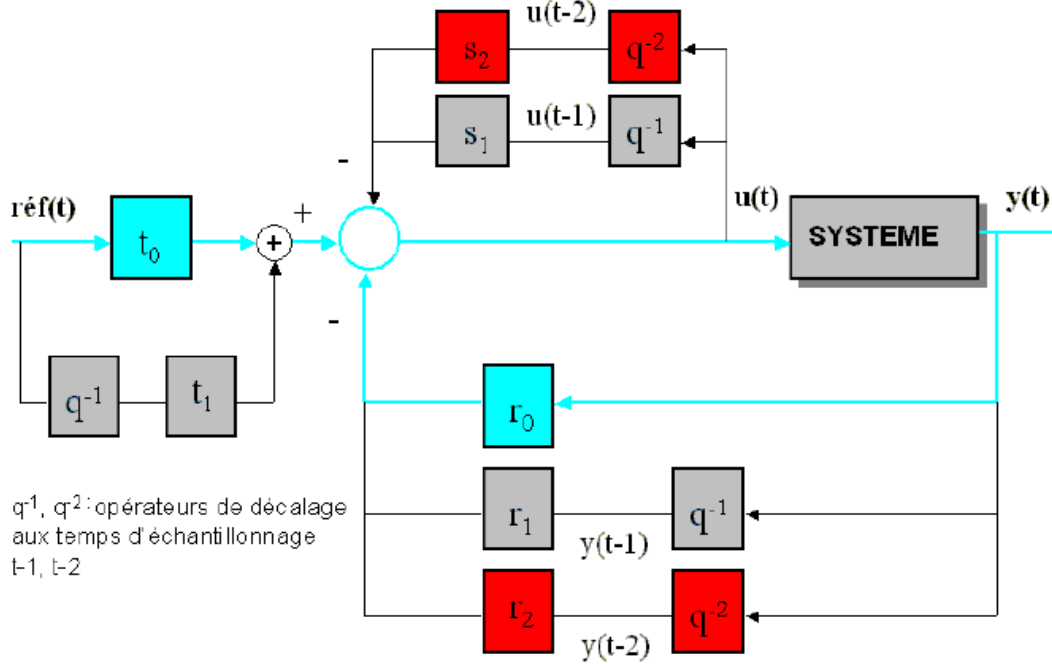
Le programme subdivisé en bloc, chacun d'entre eux contenant uniquement le programme nécessaire pour réaliser la tâche qui lui est assignée. Un bloc peut à son tour se subdiviser en plusieurs réseaux. Lorsque l'on utilise des réseaux similaires, on peut créer des modèles.

Le bloc d'organisation OB1 contient des opérations qui appellent d'autres blocs dans un ordre défini.

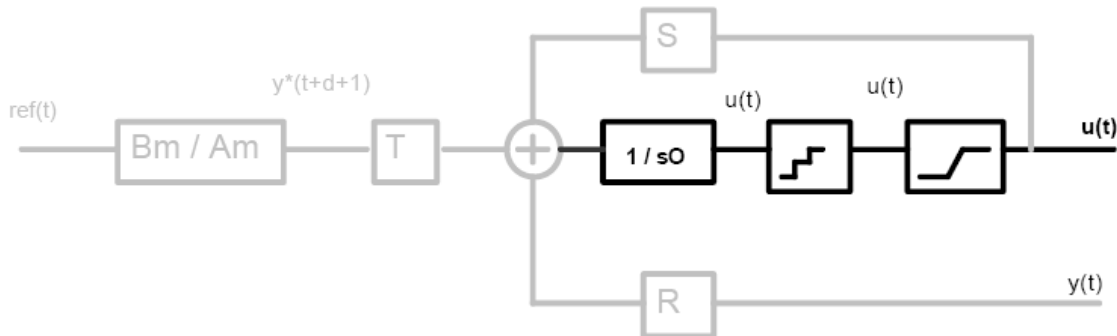
IV.7 L'algorithme du régulateur RST :

Structure détaillée d'un correcteur RST

$$u(t) = -S_1^m s_1 u(t-1) - S_2^m s_2 u(t-2) + S_0^p r_0 y(t) + S_1^p r_1 y(t-1) + S_2^p r_2 y(t-2)$$



Sa structure résulte directement de la structure RST détaillée présentée ci-dessous :



Avec :

$ref(t)$: consigne.

$y^*(t)$: trajectoire de référence

$y(t)$: mesure.



: Bloc limiteur d'action entre **umin** et **umax**



: Bloc « arrondi » à la précision **upre**

$u(t)$: commande

La commande calculée est la somme des sorties des blocs R, S et T divisée par le coefficient S0.

La commande réellement appliquée est la sortie des blocs arrondis et limiteur d'action.

· Les blocs R, S, T et le filtre B_m/A_m sont décrits en détail ci-après. L'exemple est donné pour 7 coefficients par polynômes mais le nombre peut être étendu suivant la complexité du régulateur.

Les blocs repérés « **S&H** » sont les registres à décalage qui, à chaque impulsion d'horloge T_e , font passer en sortie la valeur présente sur leur entrée.

Les blocs repérés « **X** » sont les multiplicateurs.

Les blocs repérés « + » sont les sommateurs.

Bm0, Bm1, Am1, Am2. id ($A_{m0}=1$)

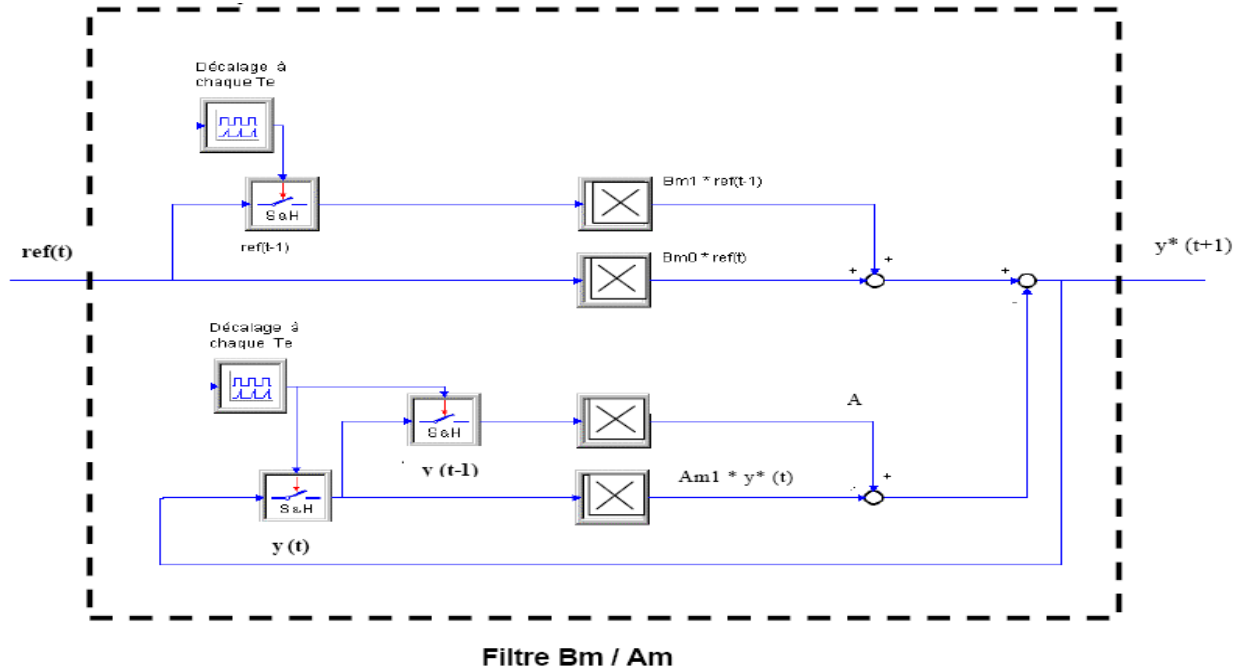
upre, umin , umax. (Fonction de l'équipement)

Te (fonction du process)

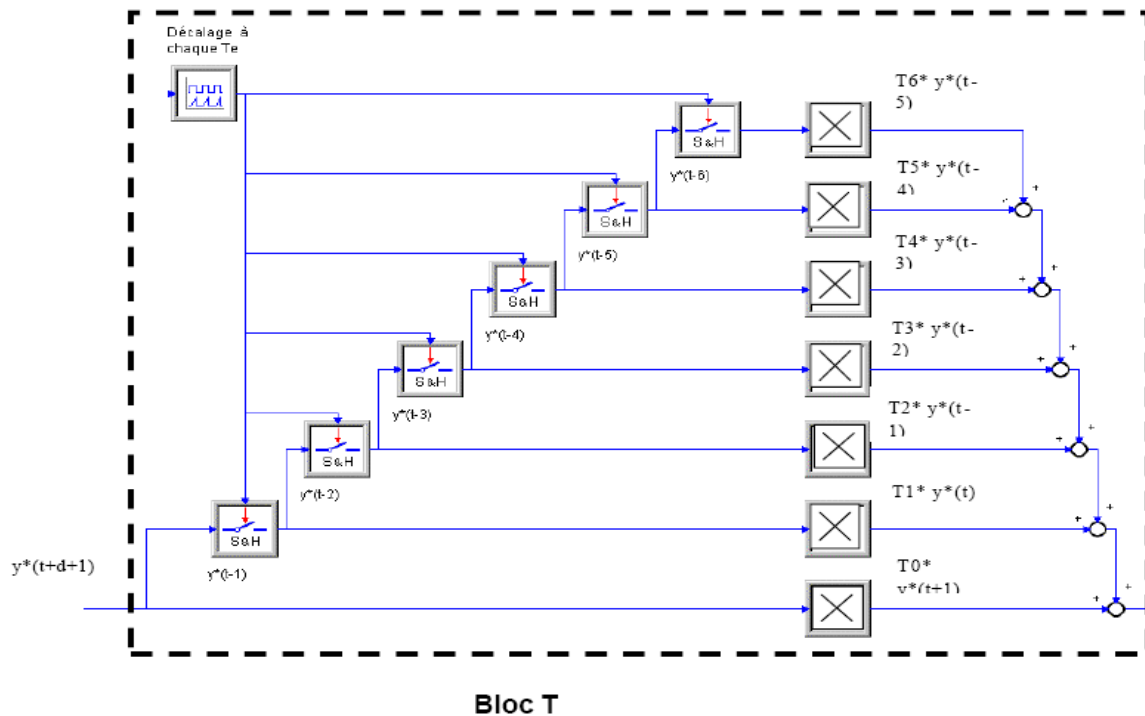
d (retard pur)

Pour gérer la commutation Manu/Auto, le régulateur devra tourner pendant n itérations avant de basculer en auto et d'appliquer la commande calculée, afin d'initialiser les registres de calcul.

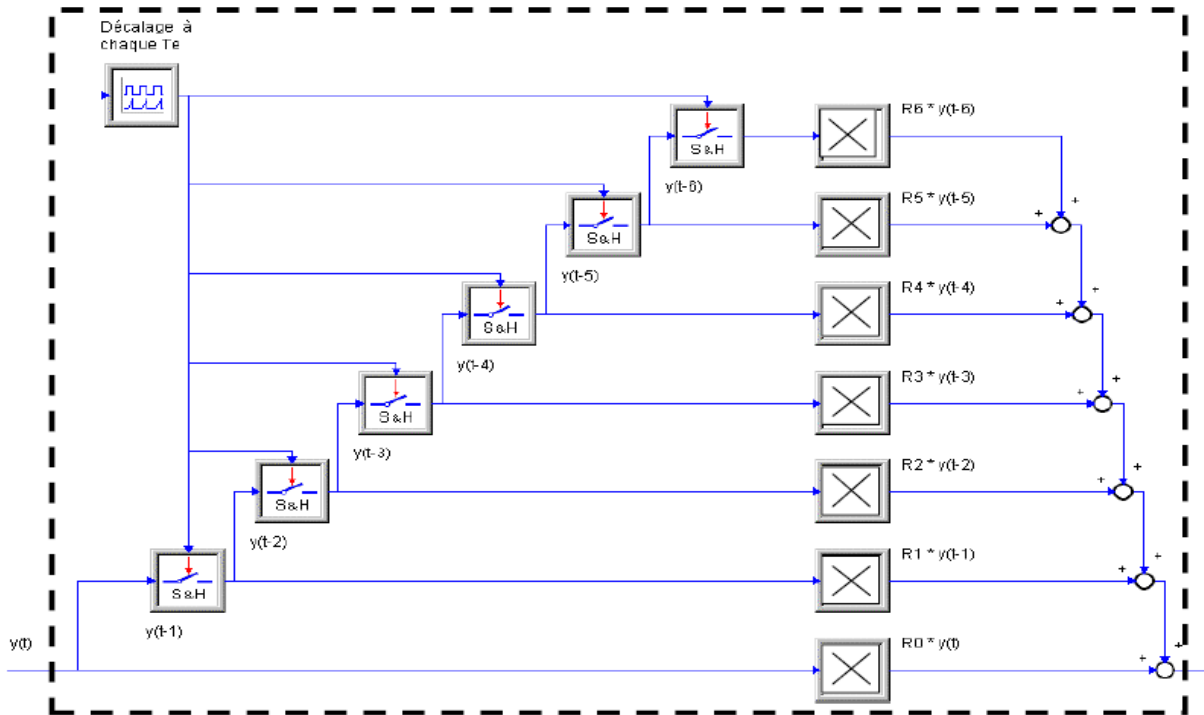
a) Description du filtre Bm/Am



b) Description du bloc T

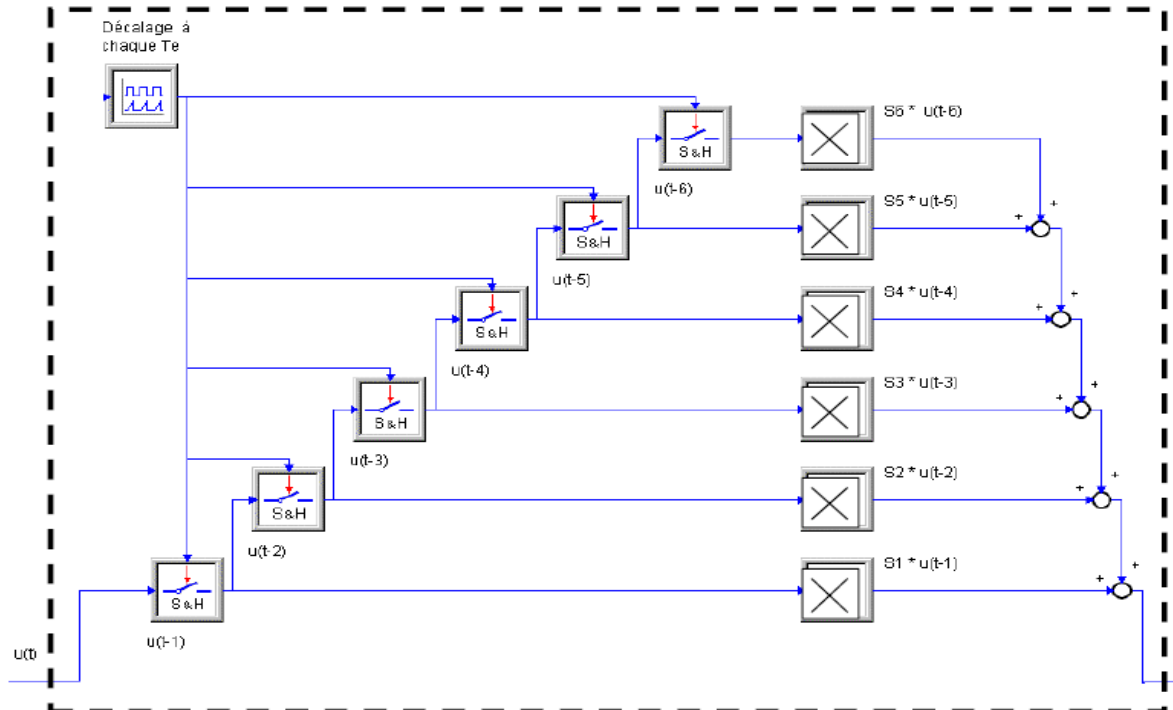


c) Description du bloc R



Bloc R

d) Description du bloc S



Bloc S

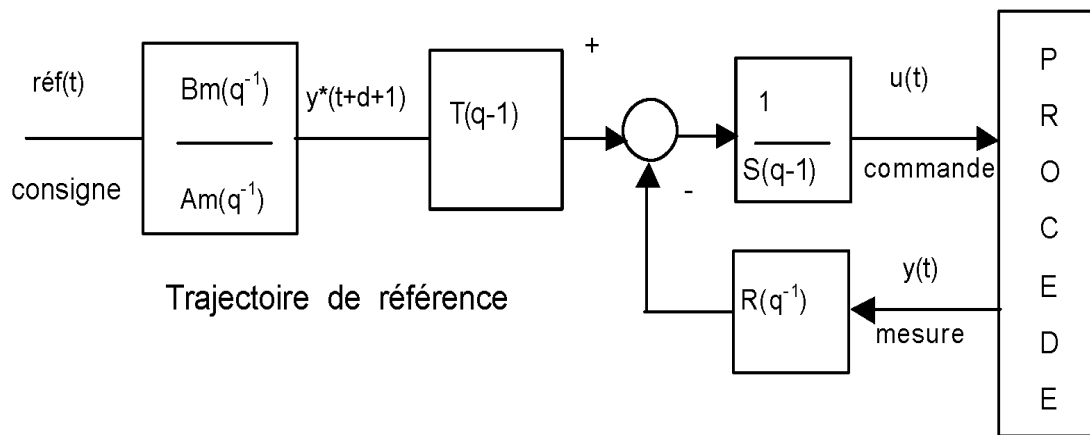
IV.8 Prise en compte de la trajectoire de poursuite :

Au moment du calcul des coefficients du RST, l'utilisateur peut définir le comportement désiré en poursuite (changement de consigne), indépendamment du comportement désiré en régulation (rejet d'une perturbation).

La dynamique de poursuite est alors généralement définie sous la forme d'un modèle du 2nd ordre noté $B_m(q^{-1}) / A_m(q^{-1})$.

La trajectoire de référence en poursuite $y^*(t+d+1)$ correspond à la valeur souhaitée pour la mesure avec $(d+1)$ périodes d'échantillonnage d'avance.

La structure RST enrichie de cette fonctionnalité, devient alors :



$$y^*(t+d+1) = B_m(q^{-1}) \cdot \text{ref}(t) - A_m^*(q^{-1}) \cdot y(t+d)$$

Avec :

$$B_m(q^{-1}) = b_{m0} + b_{m1} q^{-1}$$

$$A_m(q^{-1}) = 1 + a_{m1}q^{-1} + a_{m2}q^{-2} = 1 + q^{-1} \cdot A_m^*(q^{-1})$$

d = retard pur du procédé (unité = périodes d'échantillonnage)

q^{-1} = opérateur de décalage = $q^{-1} \text{ref}(t) = \text{ref}(t-1)$

La trajectoire de référence en poursuite y^* qui correspond à la valeur souhaitée pour la mesure

Avec $(d+1) T_e$ d'avance est alors :

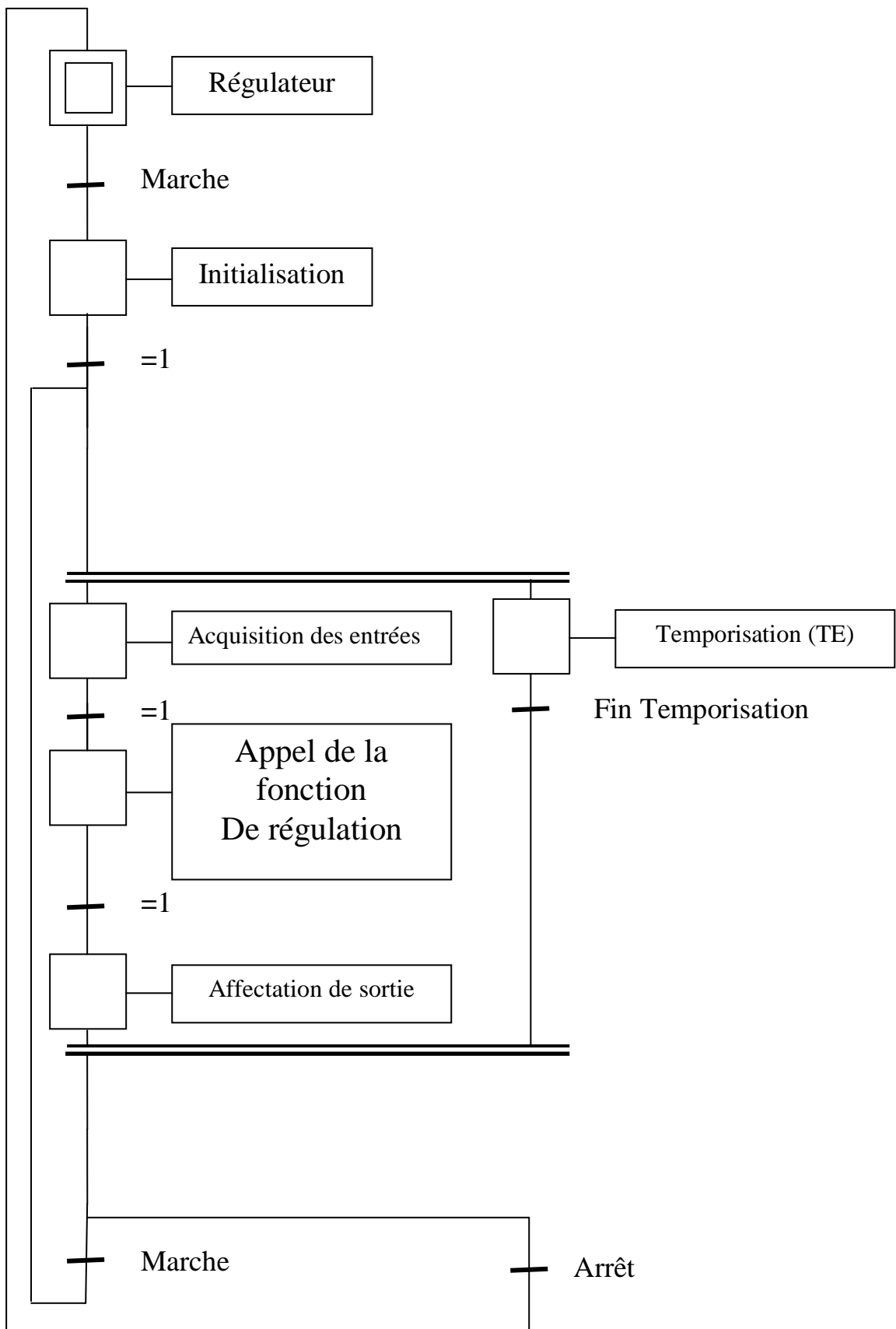
$$y^*(t+d+1) = \sum_{i=0}^1 b_{mi} \text{ref}(t-i) - \sum_{i=1}^2 a_{mi} y^*(t+d+1+i)$$

La loi de commande, sous forme d'équation récurrente, avec prise en compte de la trajectoire de poursuite s'écrit :

$$u(t) = \frac{1}{S_0} \left[\sum_{i=0}^p t_i y^*(t+d+1-i) - \sum_{i=0}^n n_i y(t-i) - \sum_{i=1}^m s_i u(t-i) \right]$$

IV.8.1 GRAFCET d'évolution du régulateur :

Le GRAFCET réalisé est un GRAFCET de niveau 1. A ce niveau, on ne définit pas les actionneurs ni les capteurs mais uniquement les actions à effectuer et leur enchaînement pour permettre de comprendre l'évolution de l'asservissement.



IV.8.2 Algorithmes RST sous forme de programmes informatique :

L'algorithme utilisé doit être appelé à chaque période d'échantillonnage juste après la mesure de la sortie du processus.

Cet algorithme reçoit en entrée :

- la valeur de la mesure actuelle (au temps t) : Y MESURE
- la valeur actuelle de la consigne : REFERENCE

Il fournit en sortie :

- la commande calculée à appliquer (au temps t): COMMANDE

Donc l'algorithme de base est :

```
FOR J = DegMax TO 1 STEP -1
```

```
Y[J] = Y[J-1]
```

```
REF[J] = REF[J-1]
```

```
YSTAR[J] = YSTAR[J-1]
```

```
U[J] = U[J-1]
```

```
NEXT J
```

```
Y[0]=YMESURE
```

```
REF[0] = REFERENCE
```

```
NUM = BM[0] * REF[0]
```

```
DEN = 0
```

```
FOR I = 1 TO DegMax
```

```
NUM = NUM + BM[I]*REF[I]
```

```
DEN = DEN + AM[I] * YSTAR[I]
```

```
NEXT I
```

```
YSTAR[0] = NUM - DEN
```

```
SIGMAR = R[0] * Y[0]
```

```
SIGMAS = 0
```

```
SIGMAT = T[0] * YSTAR[0]
```

```

FOR I = 1 TO DegMax

SIGMAR = SIGMAR + R[I] * Y[I]

SIGMAS = SIGMAS + S[I] * Y[I]

SIGMAT = SIGMAT + T[I] * YSTAR[I]

NEXT I

U[0] = (SIGMAT – SIGMAR – SIGMAS) / S[0]

COMMANDE = U[0]

END.

```

IV .8.3 Programme en C :

```

//=====
// rst.H
// Programme du Régulateur RST
//=====
// Fonction : init_stockage
// Variables d'entrée : yinit = valeur initiale de la mesure
// uinit = valeur initiale de la commande
// cinit = valeur initiale de la consigne
//-----
void init_stockage( float yinit, float uinit, float cinit);
//-----
// Fonction : execute_rst
// Variables d'entrée : consigne = consigne à l'instant t
// mesure = sortie du procédé à l'instant t
// Variable de sortie : commande à appliquer à l'instant t
//-----
float execute_rst(float consigne, float mesure);
//=====
// Dans le cas où il est nécessaire de minimiser le temps entre
// l'acquisition de la mesure et l'envoi de la commande, on peut
// utiliser la décomposition en 3 fonctions présentée ci-dessous:
//=====
void precalcul_rst(void);
float execalcul_rst(float consigne, float mesure);
void postcalcul_rst(float commande);

//=====
//=====
// rst.c
// Equations de base:  $yrt = Bm(q^{-1}) * ur(t) - Am(q^{-1}) * yrt(t-1)$ 
//  $S(q^{-1}) * u(t) = T(q^{-1}) * yr(t) - R(q^{-1}) * y(t)$ 
//=====
#include "rst.H"
#define Rdeg 2
float R[Rdeg+1] = { 1.332245, -1.905430, 0.781800 };
#define Sdeg 3

```

```

float S[Sdeg+1] = { 1.000000, 0.511808, -0.904179, -0.607629 };
#define Tdeg 2
float T[Tdeg+1] = { 0.666840, -0.659073, 0.200848 };
#define Amdeg 2
float Am[Amdeg+1] = { 1., -0.988352, 0.301194 };
#define Bmdeg 1
float Bm[Bmdeg+1] = { 0.187539, 0.125304 };
// Vecteurs utilisés pour le stockage des signaux :
float yt[Rdeg+1], ut[Sdeg+1], yrefT[Tdeg+1];
float yrt[Amdeg+1], urt[Bmdeg+1];
float compo_continu;
float prepa_cmde;
//-----
// Fonction: init_stockage
// appelée une fois en début de programme afin d'initialiser
// les vecteurs de stockage et la composante continue du régulateur
//-----
void init_stockage( float yinit, float uinit, float cinit)
{
int j;
float sigmaR, sigmaT, sigmaS;
sigmaR = 0.;
for (j = 0; j <= Rdeg; j++)
{
yt[j] = yinit;
sigmaR += R[j];
}
sigmaS = 0.;
for (j = 0; j <= Sdeg; j++)
{
ut[j] = uinit;
sigmaS += S[j];
}
sigmaT = 0.;
for (j = 0; j <= Tdeg; j++)
{
yrefT[j] = cinit;
sigmaT += T[j];
}
compo_continu = (sigmaR-sigmaT) * yinit + sigmaS * uinit;
//-----
// Fonction execute_rst
// appelée à chaque période d'échantillonnage
//-----
float execute_rst(float consigne, float mesure)
{
float commande;
float yref;
precalcul_rst();
yref = calc_ref(consigne);
commande = calc_cmde(yref, mesure);
decal_trajref(consigne, yref);
}

```

```

decal_obser(yref, mesure, commande);
return commande;
}
//-----
// Fonction: precalcul_rst
// appelée à chaque période d'échantillonnage
//-----
void precalcul_rst(void)
{
float somme;
int j;
somme = compo_continu;
for (j=1; j<=Tdeg; j++)
{ somme += T[j]*yref[j]; }
for (j=1; j<=Rdeg; j++)
{ somme -= R[j]*yt[j]; }
for (j=1; j<=Sdeg; j++)
{ somme -= S[j]*ut[j]; }
prepa_cmde = somme;
return;
}
//-----
// Fonction execalcul_rst
// appelée à chaque période d'échantillonnage
// après l'acquisition des mesures et avant l'envoi de la commande
//-----
float execalcul_rst(float consigne, float mesure)
{
float commande;
yt[0] = mesure;
urt[0] = consigne;
yref[0] = calc_ref(consigne);
commande = calc_cmde(yref[0], mesure);
return commande;
}
//-----
// Fonction: calc_ref
// utilisée par la fonction execalcul_rst
//-----
float calc_ref(float nvcons)
{
int j;
float somme;
somme = Bm[0] * nvcons;
for (j = 1; j <=Bmdeg; j++)
{
somme += Bm[j] * urt[j];
}
for (j = 1; j <=Amdeg; j++)
{
somme -= Am[j] * yrt[j];
}
}

```

```

return(somme);
}
//-----
// Fonction: calc_cmde
// utilisée par la fonction execalcul_rst
//-----
float calc_cmde(float yref, float mesure)
{
float somme;
somme = prepa_cmde;
somme -= R[0]*mesure;
somme += T[0]*yref;
somme = somme / S[0];
return somme;
}
//-----
// Fonction postcalcul_rst
// appelée à chaque période d'échantillonnage
// après l'envoi de la commande
//-----
void postcalcul_rst(float commande)
{
decal_trajref(urt[0], yref[0]);
decal_obser(yref[0], yt[0], commande);
return;
}

//-----
// Fonction: decal_trajref
// utilisée par la fonction postcalcul_rst
//-----
void decal_trajref(float consigne, float yref)
{
int j;
for (j=Bmdeg; j>1; j--)
{ urt[j] = urt[j-1]; }
for (j=Amdeg; j>1; j--)
{ yrt[j] = yrt[j-1]; }
urt[1] = consigne;
yrt[1] = yref;
}
//-----
// Fonction: decal_obser
// utilisée par la fonction postcalcul_rst
//-----
void decal_obser(float yref, float mesure, float commande)
{
int j;
for (j=Rdeg; j>1; j--)
{ yt[j] = yt[j-1]; }
for (j=Sdeg; j>1; j--)
{ ut[j] = ut[j-1]; }
}

```

```
for (j=Tdeg; j>1; j--)  
{ yref[j] = yref[j-1]; }  
yt[1] = mesure;  
ut[1] = commande;  
yref[1] = yref;  
}
```

IV.9 Conclusion :

Nous avons vu, que la l'algorithme RST développé a cette étude est une solution informatique (programmation de l'algorithme en langage C), sachant que l'automate S7/300 offre la possibilité de Programmation en langage automate, mais cette dernière reste fastidieuse :

- Fonctions annexes (passage manuel / auto, contrôle terme intégral, régulateurs en cascade, contrôle de l'erreur...) difficiles à programmer.

✓ Mise en œuvre informatique :

- Programmation du régulateur en langage informatique.
- Charge exagérée du processeur :

-Solution multiprocesseur.

Après cette étude, on peut intégrer l'algorithme anti-pompage utilisant le régulateur RST dans le système de contrôle par automate S7/300, avec l'utilisation d'un compilateur approprié et passant par les différentes étapes d'implémentation de l'algorithme en utilisant les outils permis par ce dernier.

Annexe

ANNEXE A

Lemme Inversion Matricielle

Soit F une matrice régulière de dimension (N*N) et ϕ un vecteur de dimension N, alors :

$$(F^{-1} + \phi\phi^T)^{-1} = F^{-1} - \frac{F\phi\phi^T F^{-1}}{1 + \phi^T F^{-1} \phi}$$

Résolution de l'équation diophantine

La fonction de transfert du système en boucle fermée s'écrit :

$$H_{BF} = \frac{B(q^{-1}) \cdot T(q^{-1})}{A(q^{-1}) \cdot S(q^{-1}) + B(q^{-1}) \cdot R(q^{-1})} \quad \text{-----(A.1)}$$

Et on peut écrire :
$$H_{BF} = \frac{B(q^{-1}) \cdot T(q^{-1})}{P(q^{-1})} \quad \text{-----(A.2)}$$

Avec :
$$P(q^{-1}) = A(q^{-1}) \cdot S(q^{-1}) + B(q^{-1}) \cdot R(q^{-1}). \quad \text{-----(A.3)}$$

Les performances désirées en boucle fermée, seront exprimées en terme de pôles désirés en boucle fermée, et éventuellement en terme de zéros désirés.

Cette stratégie permet de calculer un régulateur numérique **RST**.

On spécifie un polynôme $P(q^{-1})$ définissant les pôles en boucle fermée à partir d'un modèle du deuxième ordre ayant la pulsation (fréquence) et l'amortissement désiré.

Pour calculer R et S il faut résoudre l'équation polynomiale (A.3), connue sous le nom d'identité de **BEZOUT** ou équation de **DIOPHANTINE**, la résolution de cette identité donne les degrés de R, S, et P.

$A(q^{-1})$ et $B(q^{-1})$ soit premier entre eux, l'équation (A.3) admet une solution si :

$$\deg[P(q^{-1})] = \text{Max} \left\{ \deg[A(q^{-1}) \cdot (1-q^{-1}) \cdot S(q^{-1})]; \deg[q^{-1} \cdot B(q^{-1}) \cdot R(q^{-1})] \right\}. \quad \text{-----(A.4)}$$

$$\deg[P(q^{-1})] = \text{Max}[n+p+1; m+q+d]. \quad \text{-----(A.5)}$$

De plus, pour avoir une solution minimale on pose : $n+p+1=m+q+d$. --(A.6)

Soit R et S les vecteurs des paramètres à déterminer. Où :

$$S = [s_0 \ s_1 \ \dots \ s_p]^T. \quad R = [r_0 \ r_1 \ \dots \ r_q]^T. \quad \text{-----(A.7)}$$

Soit P le vecteur des coefficients du polynôme caractéristique, donné par la formule suivantes :
$$P = [p_0 \ p_1 \ \dots \ p_x]. \quad \text{-----(A.8)}$$

Posant :
$$C(q^{-1}) = A(q^{-1}) \cdot (1-q^{-1}) = C_0 + C_1 \cdot q^{-1} + \dots + C_{n+1} \cdot q^{-(n+1)}. \quad \text{-----(A.9)}$$

La résolution de l'équation de DIOPHANTINE revient à résoudre le système suivant :

$$[MAT] \begin{bmatrix} S \\ R \end{bmatrix} = P \quad \text{-----(A.10)}$$

La matrice[MAT] est construit comme suit :

$$[MAT] = \begin{bmatrix} c_0 & 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 & 0 & 0 \\ c_1 & c_0 & 0 & \cdot & 0 & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & c_1 & c_0 & \cdot & b_1 & 0 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & b_2 & b_1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & c_0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ c_{n+1} & \cdot & \cdot & c_1 & \cdot & \cdot & \cdot & b_1 \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & b_m & \cdot & \cdot & b_2 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & 0 & c_{n+1} & 0 & \cdot & \cdot & b_m \end{bmatrix} \quad \text{-----(A.11)}$$

En utilisant les équations (A.5), (A.6) et (A.12) on trouve les degrés de R,S, et P.

$$\begin{cases} p=m+d-1. \\ q=n \quad . \\ q=n \quad x=p+q+1. \end{cases} \quad \text{-----(A.12)}$$

ANNEXE B

Algorithme des moindres carrés récursifs

L'algorithme des MCR est basé sur la minimisation d'un critère quadratique en terme de l'erreur de prédiction donnée par la formule suivante :

$$J(t) = \sum_{i=1}^t \left[Y(i) - \hat{\theta}^T \cdot \phi^T(i-1) \right]^2 \quad \text{-----(B.1)}$$

Le modèle du procédé est donnée sous la forme suivante :

$$Y(t) = -a_1 \cdot Y(t-1) - a_2 \cdot Y(t-2) + b_1 \cdot U(t-1) + b_2 \cdot U(t-2) = \theta^T(t) \cdot \phi^T(t) \quad \text{-----(B.2)}$$

$$\theta : \text{ est le vecteur paramètres avec : } \theta = [a_1; a_2; b_1; b_2] \quad \text{-----(B.3)}$$

$$\Phi : \text{ est le vecteur d'observation, avec : } \Phi^T(t) = [-Y(t); -Y(t-1); U(t); U(t-1)] \quad \text{--(B.4)}$$

$$\text{On a : } \frac{\partial J(t)}{\partial \theta(t)} = -2 \cdot \sum_{i=1}^t \left[Y(i) - \theta^T \cdot \Phi(i-1) \right] \Phi(i-1) = 0 \quad \text{-----(B.5)}$$

$$\text{On a aussi : } \left[\theta^T(t) \cdot \Phi(t-1) \right] \cdot \Phi(t-1) = \Phi(t-1) \cdot \Phi^T(t-1) \cdot \alpha(t) \quad \text{-----(B.6)}$$

Des équations (B.5), et (B.6) on obtient :

$$\left[\sum \Phi(i-1) \cdot \Phi^T(i-1) \right] \cdot \theta^T(t) = \sum Y(i) \cdot \Phi(i-1) \quad \text{-----(B.7)}$$

En multipliant à gauche les termes de l'équation (B.7) avec : $\left[\sum \Phi(i-1) \cdot \Phi^T(i-1) \right]^{-1}$.

on trouve :

$$\alpha(t) = \left[\sum_{i=1}^t \Phi(i-1) \cdot \Phi^T(i-1) \right]^{-1} \cdot \sum Y(i) \cdot \Phi(i-1) \quad \text{-----(B.8)}$$

$$\text{Donc en écrit : } \alpha(t) = F(t) \cdot \sum_{i=1}^t Y(i) \cdot \Phi(i-1) \quad \text{-----(B.9)}$$

$$\text{Où : } F(t)^{-1} = \sum \Phi(i-1) \cdot \Phi^T(i-1) \quad \text{-----(B.10)}$$

Et l'expression de : $\alpha(t+1)$ en fonction de : $\alpha(t)$, corrigé de la relation (B.8), en utilisant la mesure $\Phi(t)$ de l'instant 't', conduit à l'algorithme récursif :

$$\alpha(t+1) = \alpha(t) + F(t+1) \cdot \Phi(t) \cdot \alpha(t) \quad \text{-----(B.11)}$$

$$\text{Dans lequel : } F(t+1)^{-1} = F(t)^{-1} + \Phi(t) \cdot \Phi(t)^T \quad \text{-----(B.12)}$$

Le calcul de $F(t+1)$ peut être simplifié en utilisant le lemme matriciel, il vient en effet :

$$(F(t+1) + \Phi(t) \cdot \Phi(t)^T)^{-1} = F(t) \frac{F(t) \cdot \Phi(t) \cdot \Phi(t)^T \cdot F(t)}{1 + \Phi(t)^T \cdot F(t) \cdot \Phi(t)} \quad \text{-----(B.13)}$$

soit l'algorithme d'adaptation :

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha(t+1) = \alpha(t) + F(t+1) \cdot \Phi(t) \cdot \varepsilon(t+1) \\ F(t+1) = F(t) \frac{F(t) \cdot \Phi(t) \cdot \Phi(t)^T \cdot F(t)}{1 + \Phi(t)^T \cdot F(t) \cdot \Phi(t)} \\ \varepsilon(t+1) = \frac{Y(t+1) - \theta(t)^T \cdot \Phi(t)}{1 + \Phi(t)^T \cdot F(t) \cdot \Phi(t)} \end{array} \right. \quad \text{-----(B.14)}$$

Pour l'algorithme des moindres carrée à trace constante en a :

$$F(t+1) = \frac{1}{\lambda_1(t)} \left[F(t) - \frac{F(t) \cdot \Phi(t) \cdot \Phi(t)^T \cdot F(t)}{\frac{\lambda_1(t)}{\lambda_2(t)} + \Phi(t)^T \cdot F(t) \cdot \Phi(t)} \right] \quad \text{-----(B.15)}$$

On choisit un gain d'adaptation à trace constante, dans ce choix : $\lambda_1(t)$ et $\lambda_2(t)$ sont choisis automatiquement à chaque pas pour assurer une trace constante de la matrice du gain donnée par l'équation suivante :

$$\text{trace}(F(t+1)) = \text{trace}(F(t)) = \text{trace}(F(0)) = G \cdot I \quad \text{-----(B.16)}$$

avec : G : facteur de gain initial, $G \gg 1$. I : la matrice identité.

$$\text{Et : } \lambda_1(t) = \frac{\text{trace}(F(t)) - \text{trace}\left(\frac{F(t) \cdot \Phi(t) \cdot \Phi(t)^T \cdot F(t)}{c_1 + \Phi(t)^T \cdot F(t) \cdot \Phi(t)}\right)}{\text{trace}(F(0))} \quad \text{-----(B.17)}$$

ANNEXE C

Théorème de Shannon :

Toute fonction du temps $f(t)$ possédant un spectre de fréquence limitée à $\pm 1/T_c$ peut être transformé par échantillonnage périodique, de période T inférieure ou égale à $T_c/2$, sans aucune perte d'information.

La fréquence d'échantillonnage doit être au moins égale au double de la Fréquence du signal analogique. En deçà de cette limite *théorique*, il n'est pas possible de reconstituer un signal à partir de ses échantillons.

Dans la pratique, on choisit :

- en instrumentation : $n \geq 4$, soit $p \leq 1/15$, donc $F \leq Fe / 30$.
- en audio : pour $F \leq 20$ kHz (son Hi-Fi), $Fe = 44,1$ kHz
- en téléphonie : pour $F \leq 3400$ Hz (voix humaine), $Fe = 8$ kHz.

Le tableau (annexe c) donne les périodes d'échantillonnages T_e utilisées pour la régulation numérique de différent types de procédés.

Type de variable (ou procédé)	Période d'échantillonnage (s)
Débit	1- 3
Niveau	5-10
Pression	1-5
Température	10- 120
Distillation	10- 180
Asservissement	0.001-0.1
Réacteurs Catalytiques	10-45
Cimenterie	20- 45
Séchage	20- 45

Choix de la période d'échantillonnage pour la régulation numérique de procédés

ANNEXE D

%Programme de calcul de la commande adaptative auto ajustable par placement des pôles

```

clc
%*****INITIALISATION DES VECTEURS*****
Y1=[];f1=[];a11=[];a12=[];b11=[];b12=[];e=[];u1=[];y1=[];th1=[];ph1=[];h=[];eps=[];y11=[];
%.....
t= (0:0.1:50); num=[0.02802 -0.2221];
den=[1 1.845 0.8618];
y1=step(num,den,t);
%.....
rand('state'); u1=1.5*sign(rand(500,1));
%.....
c1=0.25;ln2=0.97; l=diag([1 1 1 1]);f1=100000000*f1;f2=f1;ln2=0.97;Q=110.7;
%.....
a11=[0.95 0.95 0.95]; a12=[-1.95 -1.95 -1.95];
b11=[0.005 0.005 0.005]; b12=[0.005 0.005 0.005];h=[0 0 0];eps=[0 0];Y=[0 0 0];
%.....
s0=[1 1 1];s1=[1 1 1];r1=[1 1 1];r2=[1 1 1];Y11=[0 0];U1=[1 1 1];Y1=[0 0];y11=[0 0];
%*****Calcul du polynôme P=1+p1+p2*****
Te=input ('la période d échantillonnage Te=') %2
w0=input ('la pulsation propre w0=') %5 sec
E=input ('le facteur d amortissement E=') %0.707
%.....
alpha=exp(-E*w0*Te);W=w0*sqrt(1-E^2);beta=cos(W*Te);
%.....
p1=-2*exp(-E*w0*Te)*cos(W*Te);p2=alpha^2;
%...Génération du modèle de référence....
t=(0:0.1:50);num1=[w0^2];den1=[1 2*E*w0 w0^2];y12=step(num1,den1,t);
%***** Identification du modèle de compresseur *****
for k=3:400
    %.....
    th1=[a11(k) a12(k) b11(k) b12(k) h(k)];
    ph1=[-y1(k-1) -y1(k-2) u1(k-1) u1(k-2) 1]'; ep=y1(k)-th1'*ph1;
    A=1+a11(k-1)+a12(k-2); B=b11(k)+b12(k-1);
    y11=th1'*ph1; Y1=[Y1 y11];
    ln1=(trace(f1)-trace(f1*ph1*ph1'*f1/(c1+ph1'*f1*ph1)))/trace(f2);
    F1=(1/ln1)*(f1-(f1*ph1*ph1'*f1)/((ln1/ln2)+ph1'*f1*ph1));
    ep1=ep/(c1+ph1'*f1*ph1); eps=[eps ep1];
    th1=th1+f1*ph1*ep1; f1=F1;
    a11(k+1)=th1(1); a12(k+1)=th1(2); b11(k+1)=th1(3);b12(k+1)=th1(4); h(k+1)=th1(5);
    %.....
    x=[s0(k) s1(k) r1(k) r2(k)]; Bp=[1;p1;p2;0];
    M=[1 0 0 0;a11(k) 1 b11(k+1) 0;a12(k) a11(k) b12(k+1) b11(k+1);0 a12(k) 0 b12(k+1)];
    x= (inv (M))*Bp;
    s0(k+1)=x(1);s1(k+1)=x(2); r1(k+1)=x(3);r2(k+1)=x(4);
    G=1/B (1); P=1+p1+p2;
    S=s0 (k) +s1 (k-1); R=r1 (k-1) +r1 (k-2); T=G*P;
    ww=G*B; Y=ww*y12(k)+(S/P)*h(k);Y11=[Y11 Y];

```

```
%*****CALCUL DE LA COMMANDE*****
```

```
U=(P*y12(k)-R*Y11(k))/(S+Q);U1=[U1 U];  
k;  
end  
figure(1)  
plot(Y11),grid;xlabel('réponse du système')  
figure(2)  
plot(U1),grid;xlabel('la commande du système')  
figure(3)  
plot(a11,'g'),grid; xlabel('a11')  
figure(4)  
plot(a12),grid; xlabel('a12')  
figure(5)  
plot(b11),grid; xlabel('b11')  
plot(b12,'g'),grid; xlabel('b12')  
figure(6)  
plot(eps),grid;xlabel('erreur d identification ')  
figure(7)  
plot(y12),grid;xlabel('modèle de référence')
```

Annexe E

```
%%%%%%%%%%CALCUL DES PARAMETRES DU
REGULATEUR%%%%%%%%%%
b0=input('le coefficient de numérateur b0=');
b1=input('le coefficient de numérateur b1=');
a1=input('le coefficient de dénominateur a1=');
a2=input('le coefficient de dénominateur a2=');
te=input('la période d échantillonnage te=');
f=input('l amortissement f=');
w=input('pulsation w=');
disp('la fonction de transfert échantillonnée du compresseur')
sys2=tf([0 b0 b1],[1 a1 a2],1)
disp('la fonction de transfert continue du compresseur')
sys2c=d2c(sys2)
figure(1)
step(sys2)
hold on
step(sys2c)
%%%%%%%%%%CALCUL DES COEFFICIENTS DU
POLYNOME P(Z)
p1=-2*exp(-f*w*te)*(cos(te*w*(1-f^2)^0.5));
p2=exp(-2*f*w*te);
%%%%%%%%%%CALCUL DES PARAMETRES DU
REGULATEUR
s1=p1-a1+1
r2=(a2*s1)/b0
r1=(s1*a1-a2*s1+a2)/b0
r0=(p2+s1-a1*s1+a1-a2)/b0
%%%%%%%%%%LA FONCTION DE TRANSFERT DU
REGULATEUR
reg=tf([r0 r1 r2],[1 s1-1 -s1],te)
%%%%%%%%%%LA FONCTION DE TRANSFERT DU
SYSTEME EN BF
p=series(reg,sys2);
sbf=feedback(p,1)
figure(2)
step(sbf,25)
%%%%%%%%%%LA FONCTION DE TRANSFERT PAR
RAPPORT LA PERTURBATION
pf=feedback(1,p);
wb=tf(1,[1 -1.845 0.8618]);
wbd=c2d(wb,1);
wbf=series(wbd,pf);
wbfc=d2c(wbf);
figure(3)
step(wbfc)
hold on
step(wbf)
```

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

[1]: **Longchamp R**, « Commande numérique de systèmes dynamiques », Polytechniques et universitaire romandes, Lausanne, 1995

[2]: **Landau Ioré.D**. « Identification et commande des systèmes », Hermès, Paris, 1991.

[3]. **Zelmat M**. « Commande modale et adaptative », OPU, Alger, 2001.

[4]: **Astrôm Karl Johan**. « Adaptive control », edition Wesley, 1990

[5] : **Technique de l'ingénieur**.

[6] : F.MESSAILI – K.MESSAI – N.YADEL, Mémoire de fin d'étude d'ingénieur, Développement d'une solution décentralisée à base d'un automate programmable industriel S7-300 pour une station de déshydratation du gaz GPL située à Hassi Messaoud, UMMTO, promotion 2007.

Autres :

Bidard R. « pompage des compresseurs centrifuge et axiaux », centre d'études supérieurs de mécanique des fluides, 1993.

Borne P, Dauphin G.Richard J.P « Modélisation et identification des processus », Technip, 1993.

society of petroleum Engineering Richardson, TX, USA, 1992 **Howard B. Bradley**. « Petroleum engineering handbook ».

RUA, December, 1996 **Total Train control**. « Antisurge controller».

GENERAL ELECTRIC, 1997 « Manuel du compresseur centrifuge BCL 405/C ».

N.Pignone document « Turbocompresseurs ».

Guide RST, fichier Pdf.

Laboratoire de régulation numérique Programmation d'un régulateur PID numérique.

Fichier Pdf.

Technique de l'ingénieur, TI-s7090.