

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique



**Mémoire de fin d'étude
pour l'obtention du diplôme de Master Académique**

**Domaine : Sciences et Techniques
Filière : Automatique et Informatique Industriel
Spécialité : Commande et Diagnostic des Systèmes
Industriels**

Commande prédictive à modèle des systèmes

Présenté par : Hennad mohamed yazid

Sous la direction de : Dr. Djalil boudjehem

JUIN 2011



Remerciements

Au nom d'Allah, le Tout - Miséricordieux, le Très - Miséricordieux

La louange est à Allah l'unique et la paix et le salut sur celui qui n'a point de messager après lui et sur sa famille, ses compagnons et tous ceux qui suivent son chemin jusqu'au jour de la résurrection.

En premier, je tiens à remercier Monsieur **Boudjehem Djalil**, Maitre de conférence à l'université 8 mai 1945, et lui exprimer toute ma gratitude pour avoir encadré et dirigé ce travail. Ses conseils, ses orientations et le soutien que, ont permis de terminer ce travail.

Je tiens à remercier également les membres du jury qui accepte de jugé ce travail.

Je tiens, tout particulièrement, à exprimer ma profonde gratitude à miss Kechida Sihem, Maitre de conférence à l'Université de 8 mai 1945 pour ses conseils précieux ainsi que pour la confiance et l'aide qu'il ma accordé pour mener ce travail à terme.

J'aimerais à présent remercier mes proches et en premier lieu mes parents de m'avoir soutenu et d'avoir cru en moi. Je remercie aussi mon frère, mes sœurs, mes tantes et toute ma famille.

Mes remerciements vont également à mes amis, mes collègues et mes enseignants. Enfin, tous ceux et celles qui m'ont aidé et soutenu durant tout mon parcours qu'ils trouvent ici l'expression de mes remerciements les plus sincère



Dedicace

JE DEDIE mon travail :

*A mes parents, en guise de
reconnaissance et de gratitude pour les
Sacrifices qu'ils ont faits.*

A mes chers frères

A mes chères sœurs

*vous êtes dépensés pour moi sans
compter, avec tous mes vœux de les voir
réussir dans leurs vies.*

A mes amis : khaled, mohamed

,soufi, les double hamza

*,sabri, nacer, abdelwaheb, les peuple de
roknia bilal et abousoufieen, farouk et*

Ancestrales abdelrazek.

A imene et sa niece salma

A tous ma famille hennad.

Hennad Mohamed Yazid



Introduction générale.....I

Chapitre I

La commande prédictive

I.1- Introduction.....1

I.2- La commande prédictive.....2

I.3- Aperçu Historique Sur La Commande Prédictive.....2

I.4- Principe et ingrédients Fondamentaux de La Commande Prédictive.....4

I.5- Schéma fonctionnelle de la commande prédictive.....5

I.6- La Stratégie de La Commande Prédictive.....6

I.7- Principe Générale de la Commande Prédictive.....6

I.7.1 Variables de commande et de sortie.....7

I.7.2 Objectif de fonctionnement.....7

I.7.3 Modèle.....8

I.7.4 Problème d'optimisation.....9

I.8- Structure de commande prédictive utilisée.....10

I.9- Les avantages et inconvénients.....11

I.9.1- Les Avantage.....11

I.9.2- Inconvénients.....13

I.10 – Conclusion.....15

Chapitre II

La commande prédictive à modèle

II.1- Introduction	16
II.2-Vue d'ensemble.....	17
II.3- Principe général de fonctionnement.....	19
II.4- Modélisation du système.....	20
II.4.1- Modèle de prédiction.....	21
II.4.1.1- Modèle du processus.....	22
II.4.1- 2 Modèle de perturbation	23
II.5- Fonction objectif et obtention de la loi de commande	23
II.5.1- Paramètres	23
II.5-.2 Trajectoire de référence.....	24
II.6- Problématiques liées à la stratégie de commande prédictive.....	24
II.7- Paramètres de réglage de la commande prédictive.....	25
II.8- Sur les formalismes de représentation des systèmes en commande MPC.....	27
II.9.Le calcul de l'intrant optimal.....	25
II.10- Conclusion.....	29

Chapitre III

Chaudière Modélisation et Identification

III.1-Introduction.....	31
III.2- Chaudière à circulation naturelle.....	31
III.3- Description de la chaudière étudiée	32
III.4 -Principe de fonctionnement.....	32

III.5-Les boucles de régulation de la chaudière	33
III.5.1- Régulation du niveau d'eau du réservoir.....	35
III.6- Modélisation et identification et validation.....	37
III.6.1-Masse global et Equilibres D'énergie.....	38
III.6.1-Equation de l'équilibre de la chaudière.....	39
III.7 Identification du modèle de la chaudière.....	40
III.7.1- Principe de l'identification.....	41
III.7.2-Modèle ARX.....	41
a) Définition.....	41
b) Validation.....	42
III.8- Conclusion.....	43

Chapitre IV

Résultats et discussion

IV.1 introduction 44

IV.2.Régulation prédictive avec contraintes du niveau d'eau la chaudière	44
a) Régulation prédictive sans bruit à l'entrée	45
b) L'Effet de l'horizon de prédiction sur l'MPC.....	45
c) Régulation prédictive avec perturbation sur la commande	46
d) Régulation prédictive de niveau d'eau avec perturbation à la sortie	47
e) Régulation prédictive en cas où le modèle ne respecte pas le processus	48
IV.3.Commande prédictive en poursuite du niveau d'eau	49
a) Commande prédictive en poursuite du niveau d'eau sans bruit à l'entrée ...	49
b) Poursuite de La commande avec un modèle différent du système	50

IV.4- Conclusion50

Conclusion générale.....51

Bibliographie

Table de figure

Figure I.1- Schéma fonctionnelle de la commande prédictive.....	5
Figure 1.2 - Structure de commande prédictive en boucle fermée.....	10
Figure II.1- Schéma de principe d'une commande prédictive.....	18
Figure II.2 - structure de base de la commande prédictive à modèle.....	19
Figure III.1. Schéma simple d'une chaudière à circulation naturelle	32
Figure III.2. Schéma fonctionnelle d'une chaudière.....	34
Figure III.3 Boucle simplifiée de la régulation du niveau de ballon.....	35
Figure III.4 Représentation schématique de la chaudière.....	39
Figure IV.1 Schéma global de l'MPC appliqué	44
Figure IV.2 la réponse indicielle du système	44
Figure IV.3 – Régulation prédictive sans bruit à l'entrée	45
Figure IV.4- L'Effet de l'horizon de prédiction sur l'MPC	46
Figure IV.5- Régulation prédictive avec perturbation sur la commande.....	47
Figure VI.6- Régulation prédictive de niveau d'eau avec perturbation à la sortie.....	48
Figure IV.7- la réponse indiciel du modèle et le processus.....	48
Figure IV.8- La commande du système avec ce modèle.....	49
Figure IV.9- Commande prédictive en poursuite du niveau d'eau sans bruit a l'entrée	49
Figure IV.10- Poursuite de La commande avec un modèle différent du système.....	50

Introduction Générale

Introduction générale

Dans l'industrie des hydrocarbures en Algérie, la production de l'énergie est réalisée de plus en plus, vue l'abondance de la matière première, à partir des générateurs de vapeurs dits aussi chaudières, en exploitant l'énergie calorifique, résultat de la combustion Air /Gaz.

Pour cela, la chaudière est une installation d'une importance stratégique, et un équipement classé très critique. Ainsi pour la faire marcher dans les conditions nominales, et avoir un rendement le plus optimal possible ; il est impératif d'avoir une régulation stricte et rigoureuse de ses différents paramètres clés.

La maîtrise des installations industrielles complexes (cas de la chaudière) pose un problème Stratégique aux responsables d'installations, compte tenu des progrès réalisés dans le domaine des algorithmes de régulation. Faut-il s'engager dans la voie des correcteurs spécifiques, chaque jour plus nombreux et plus sophistiqués, au risque d'observer une adéquation entre le matériel mis en œuvre et le niveau d'intervention des techniciens ? Faut-il conserver le classique régulateur PID, bien connu des agents de conduite et de techniciens de régulation, au risque de subir ses limitations, au détriment des performances exigées par les productions modernes, et les critères de compétitivité ou l'expression (à peu près c'est bon) est bannie. On pense qu'il faut un compromis ; là où les régulateurs PID montrent des faiblesses et des insuffisances (cas de la régulation du niveau d'eau dans le ballon de la chaudière), l'élaboration et la mise en œuvre d'une autre technique de régulation avancé est plus que nécessaire.

Notre travail s'est porté sur l'étude dynamique d'une chaudière au niveau du complexe de Liquéfaction du gaz naturel GNL1/ K, sis à la plate industrielle de Skikda cependant nous nous sommes intéressés plus à l'étude de la variation du niveau d'eau dans le ballon, son comportement aux différentes perturbations de natures diverses, ainsi qu'à la commande correctrice. Le but de l'élaboration d'une telle commande est de maintenir le plan d'eau dans le ballon pour qu'il assure un bon rendement de vaporisation, et garantisse une réserve suffisante en eau.

En effet le fonctionnement d'une telle chaîne entraîne des difficultés importantes. L'une d'elles résulte du fait que le contrôle d'un niveau de liquide. Avec débit de soutirage fixe, crée un pompage de la mesure autour de la consigne toujours difficile à régler. Cependant, le problème essentiel est dû à deux phénomènes inverses dits (de gonflement et de tassement),

qui apparaissent souvent aux moments des variations importantes de charge, et d'après les statistiques un pourcentage considérable des arrêts d'urgence est dû à ces deux phénomènes. Ce qui engendre d'énormes manque à produire et donc manque à gagner. Pour ces raisons, la régulation du niveau requiert une importance capitale aussi bien pour la bonne marche de la chaudière que pour des raisons de sécurité. L'utilisation actuelle des régulateurs classiques (PID) pour la régulation du niveau s'est avérée insuffisante et peu précise lors des perturbations de grandes amplitudes. La présence d'un temps mort, et l'existence de non linéarités, conduisent à des réglages approximatifs, face à des perturbations importantes, le manque de rapidité de la chaîne fermée aboutit à des écarts transitoires préjudiciables à la qualité exigée.

Pour dépasser les limites de performances des régulateurs PID, et améliorer l'exploitation de la chaudière pour qu'elle fonctionne avec une capacité maximale, nous avons choisi une autre technique de régulation avancée basée sur la commande prédictive à modèle, qui présente des performances nettement supérieures à celles des régulateurs classiques.

Notre mémoire est organisé de la façon suivante :

Dans le chapitre I nous présentons la commande prédictive.

Dans le chapitre II traite la loi de commande prédictive à modèle qui basant sur des équations appliquée aux systèmes mono variables sans contraintes pour la régulation du niveau d'eau en utilisant la fonction de transfert de cette dernière (chaudière)

Le chapitre III décrit sommairement la chaudière, ses différents constituants et les boucles de régulation qui gèrent ses paramètres clés, en suite nous déterminons la fonction de transfert du modèle après modélisation, identification et validation de chaudière.

Le chapitre IV est consacré à la simulation (application) de la MPC pour un système réel non linéaire.

Et enfin une conclusion générale où nous commentons les différents résultats obtenus.

chapitre I

La commande Prédictive

I.1- Introduction

L'essentiels des commandes des systèmes industrielles sera toujours réalise par des systèmes de commandes classiques. Ils ont, quand ils s'appliquent, une remarquable, et un rapport prix/performance avec lequel il est difficile de rivaliser. Ils sont, pour ces raisons, commercialises sur une échelle industrielle mondiale et représentent un outil de base classique de l'industrie.

Mais Ces systèmes de commandes (régulateur, correcteurs,.....) ne couvre pas tous les besoins et ses performances s'essoufflent dans plusieurs cas, citons:

- Les processus "difficiles", non linéaires, instables, non stationnaires, à grand retard pur, et aussi multi variables;

- Lorsque les performances exigées par l'utilisateur sont très tendues: forte atténuation des perturbations, erreur de traînage nulle en poursuite, réponse en temps minimal, ce qui amène a fonctionner sur des contraintes qui affectent soit les variables d'action, soit des variables internes du processus.

Pour la compréhension ultérieure des conditions de mise en œuvre de la commande prédictive, il est important de savoir que l'acceptation industrielle du PID vient du fait qu'un fois le matériel installe "capteur, actionneur" il suffit, sans étude préalable, de fixer quelques valeurs de paramètres, sans grande flexion ou difficulté particulier, et qu'un essai expérimental suffit, l'automatique est alors l'affaire des régleurs. La situation est tout autre avec la commande prédictive.

Si les boucles élémentaires, du type régulation du débit par une vanne, sont très efficacement traitées par le PID, il en est tout autre des boucles difficiles qui, en juste contrepartie, ont généralement un impact économique fort, ce que justifie la démarche.

L'autre composante, en plus de ce besoin de performance, qui a favorise l'éclosion de la commande avancée, se situe sur le plan méthodologique avec l'apparition des méthodes de modélisation et de simulation. Sur le plan technique, l'accessibilité plus aisée aux calculateurs numériques susceptibles de réaliser des traitements algorithmiques, mélangeant calcul et logique, inaccessibles a des organes purement Analogiques, a également considérablement facilite l'introduction de ces méthode de commande a base de modèle

La rupture entre l'automatique classique et la commande prédictive est dans le fait que le régulateur prédictif va être construit sur la base d'un modèle, qu'il va utiliser sur le site, en temps réel.

I.2- La commande prédictive

La commande prédictive (ou composition ou correction anticipatrice) est une technique de commande avancée de l'automatique. Elle a pour objectif de commander des systèmes industriels complexes. Le principe de cette technique est d'utiliser un modèle dynamique du processus à l'intérieur du contrôleur en temps réel afin d'anticiper le futur comportement du procédé. La commande prédictive fait partie des techniques de contrôle à modèle interne (IMC:internal model controller.)

En anglais on utilise le terme MPC ou MBPC pour qualifier la commande prédictive : Model (Based) Predictive control. Cette méthode a été née à fin des années 1970 et s'est considérablement développée depuis, à la fois dans la communauté de la recherche en automatique et dans l'industrie. La raison de ce succès peut être attribuée au fait que la commande prédictive est peut-être la façon la plus générale de poser le problème de la commande de procédés dans le domaine temporel. En effet, sa formulation intègre des concepts tirés de la commande optimale, la commande stochastique, la commande de système à temps morts, la commande avec modèle interne, la commande multi variables et prend en compte les références futures lorsqu'elles sont disponibles. Un avantage de la commande prédictive est que, grâce à l'horizon de commande fini et au modèle du système, des contraintes, et même des processus non linéaires et/ou variant dans le temps, peuvent être considérés en pratique [1].

I.3- Aperçu Historique Sur La Commande Prédicative

Des la fin des années 1970, de nombreux articles montraient déjà l'intérêt de la commande prédictive dans l'industrie. Les publications de [2]. Présentaient la commande prédictive dite heuristique (MPHC ou Model predictive heuristique control en anglais), qui fut connue plus tard sous le nom de commande algorithmique (MPC ou Model Algorithmique control en anglais), les articles de [3] présentaient la commande matricielle dynamique (DMC ou Dynamic Matrix Control en anglais). Les deux algorithmes utilisaient explicitement le modèle de la réponse impulsionnelle du système (MPC) ou de la réponse indicielle (DMC), pour prédire l'effet sur la sortie des commandes futures. Celles c'était calculées par la

La Commande Prédicative

minimisation de l'erreur prédite, qui était répétée à chaque période d'échantillonnage avec les dernières mesures fournies par le processus. Ces formulations étaient heuristiques et algorithmiques et tiraient parti du potentiel croissant des ordinateurs de l'époque. Le principe de l'horizon fuyant, l'une des idées centrales de la commande MPC, fut quant à lui proposé en 1963 par [4] dans le cadre du "retour optimal en boucle ouverte" et a été largement repris ensuite dans les années soixante-dix.

Une autre ligne de travail est apparue autour des idées de la commande adaptative, avec des stratégies qui ont été développées essentiellement pour des Processus monovarié dans le formalisme des fonctions de transfert. On citera entre autres la commande PBSTC (predictor-Based Self-Tuning Control de Peterka); son principe est de minimiser, pour les valeurs prédites les plus récentes, l'espérance mathématique d'un critère quadratique sur un horizon de commande donnée (fini ou asymptotiquement infini). La commande EHAC (Extended Horizon Adaptive Control) de [5] est une méthode dans laquelle on essaie de maintenir les sorties futures (calculées par une équation diophantienne) proches de la référence pendant un certain laps de temps après le retard du système.

La commande EPSAC (Extended Prediction Self Adaptive Control) de [6]. Propose un signal de commande constant à partir de l'instant courant en utilisant un prédicteur sous optimal, au lieu de résoudre une équation diophantienne. La commande GPC développée par [7] est également apparue dans ce contexte. Cette commande applique des idées de la commande GMV (Generalized Minimum Variance) et est sans doute la plus populaire actuellement. On trouve entre autres la commande PFC (Prédicative Functional Control) ou encore la commande UPC (Unified Predictive Control).

La commande MPC a également été formulée dans l'espace d'état. Ceci permet non seulement d'utiliser des théorèmes bien connus de la théorie de la représentation d'état, mais facilite aussi la généralisation de la commande à des cas plus complexes tels que les systèmes avec des perturbations stochastiques et du bruit dans les variables mesurées. Les techniques d'estimation d'état provenant de la commande optimale stochastique peuvent être utilisées pour le calcul des prédictions. Cette perspective aboutit à des règles simples de réglage pour assurer la stabilité et la robustesse du correcteur. On peut interpréter le correcteur MPC comme étant basé sur un observateur d'état: sa stabilité, performance et robustesse sont alors déterminées par les pôles de l'observateur (qui sont directement fixés par des paramètres ajustables) et les pôles du régulateur (qui sont déterminés par les horizons, les pondérations,

...etc.). Une analyse des caractéristiques inhérentes de tous les algorithmes MPC (en particulier de la commande GPC) [8].

I.4- Principe et ingrédients Fondamentaux de La Commande Prédicative

Par expérience, on sait que l'action sur l'accélérateur, sur le frein ou sur le volant modifie, après un certain temps, la vitesse et la position du véhicule. Comme l'on a devant soi un objectif glissant qui change en permanence, on fixe de façon continue un projet de trajectoire à son véhicule, et l'on sait que pour satisfaire cet objectif, malgré toutes sortes de perturbations (pente, vent, état de la route...), il convient d'appliquer telle action.

Connaissant l'inertie du véhicule, on a également appris qu'il fallait anticiper, c'est-à-dire regarder, non pas au niveau du pare-chocs, mais "loin" devant, et qu'il ne fallait pas attendre d'être sur l'obstacle pour freiner. On sait que telle action produit tel effet, et en inversant la proposition On sait quelle action appliquer pour obtenir tel comportement

L'action opportune étant réalisée, on va vérifier son efficacité. Si, de manière systématique, le "réalise" s'éloigne du "prévu", il convient peut-être d'adapter sa connaissance, donc de modifier l'image opératoire que l'on a de son véhicule. En revanche, si dans les mêmes circonstances, "prévu" et "réalise" coïncident, c'est que ce désaccord local n'était du qu'a une perturbation passagère.

Ces constatations de bon sens constituent les principes et ingrédients fondamentaux de la commande prédictive:

- 1- Le modèle mathématique qui représente une formalisation des commandes mémorisées du comportement du processus a piloté en réponse à un stimulus connu.
- 2- La trajectoire de référence qui exprime un projet de comportement désire du processus
- 3- La création du passage de l'effet désiré à l'action à appliquer, à partir de la relation du passage de l'action à l'effet.
- 4- Modification éventuelle du modèle interne du système de commande [9].

I.5- Schéma fonctionnelle de la commande prédictive

Nous présentons ici, pour la commodité de la lecture, le schéma fonctionnel de base d'un système de commande prédictive, ainsi qu'une liste des notations couramment utilisées dans cet mémoire.

Il s'agit de réguler le processus P1 soumis à une perturbation mesurée DV_m et a une perturbation non mesurée DV_{nm} .

Le régulateur R contient les modèles internes M1 et M2 des processus P1 et P2. M1 et M2 sont des modèles identifiés, éventuellement variables dans le temps, implantes et utilisés en temps réel dans le calculateur de commande.

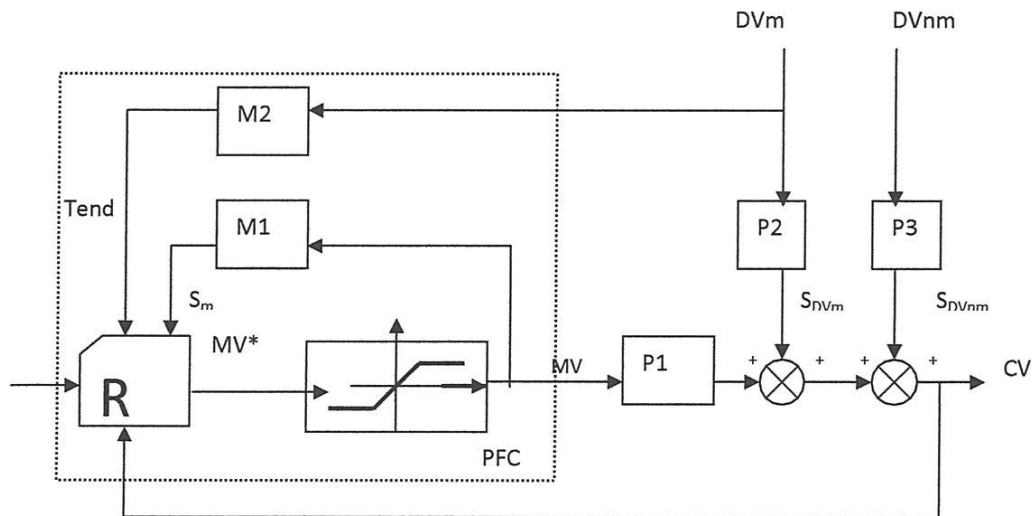


Figure I.1- Schéma fonctionnelle de la commande prédictive

La variable manipulée MV^* , calculée par le régulateur est passée à travers un limiteur dont la sortie physique MV attaque le processus P1 et constitue l'entrée du modèle interne M1 du régulateur.

La consigne à l'entrée du régulateur PFC est Cons. T_{end} est un signal pris en tendance ; alors que les variables S_m et S_{DV_m} sont les sorties mesurées des processus M1 et P2. Tandis que la perturbation DV_{nm} et sa sortie $S_{DV_{nm}}$ ne sont pas mesurées. Nous utiliserons

La Commande Prédicative

en permanence la dénomination internationale MV pour la variable manipulée ; CV pour la variable régulée et DV pour les perturbations.

Nous nous intéressons ici qu'aux processus mono variables (une MV/1CV) qui sont les plus fréquemment rencontrés dans l'industrie [10].

I.6- La Stratégie de La Commande Prédicative

La stratégie de la commande prédictive est très similaire à la stratégie utilisée pour la conduite automobile. Le conducteur connaît la trajectoire de référence désirée (le trace de la route) sur un horizon de commande fini (celui de son champ visuel), et en prenant en compte les caractéristiques de la voiture (model mental du comportement du véhicule) décide quelles actions (accélérer, freiner ou tourner le volant) il faut réaliser afin de suivre la trajectoire désirée. Seule la première action de Conduite est exécutée à chaque instant, et la procédure est répétée a nouveau pour les prochaines actions. Noter que lorsqu'on recourt à des schémas de commande classiques, comme les PID, les commandes sont calculées à partir des erreurs passées et de l'erreur courante. Si l'on étend l'analogie de la conduite automobile, la technique PID serait alors équivalente à conduire une voiture en utilisant seulement ce qui se passe juste devant la voiture (accès à la mesure courante) et le rétroviseur (mesures passées). Mais l'analogie est un peu sévère, car la commande MPC a besoin en réalité de beaucoup plus d'informations que le PID (la trajectoire à suivre par le système, et un modèle de ce système). Et si un point situe dans le futur sur la trajectoire de référence est utilisé comme consigne pour le PID, les différences entre les deux stratégies sont moins grandes [11].

I.7- Principe Générale de la Commande Prédicative

Un objectif général de toute structure de commande est de maintenir les variables de sortie proches de leurs consignes tout en respectant les contraintes opératoires du procédé. La commande prédictive basée sur le modèle a été conçue pour remplir ces buts. Elle a pour idée d'insérer dans la boucle de retour un élément prédictif, constitué par le modèle de procédé à commander. Le calculateur détermine alors, à l'instant d'échantillonnage présent, la séquence de commande à appliquer sur un horizon de prédiction à la prochaine période d'échantillonnage, seule la première composante de cette séquence est réellement appliquée au procédé. La structure de la commande prédictive est basée sur les éléments suivants :

La Commande Prédicative

1. des grandeurs variables du système : variables de commande (à manipuler) et de sortie (à mesurer et/ou à commander),
2. un critère d'optimisation formulant les objectifs du fonctionnement désiré du procédé,
3. un modèle du procédé à commander,
4. une méthode de résolution qui permet de trouver une solution au problème d'optimisation et la séquence de commande à appliquer au procédé.

I.7.1 Variables de commande et de sortie

Les contraintes peuvent concerner les variables de commande, les variables régulées et plus généralement les variables d'état :

- les variables manipulées (les entrées) doivent rester dans une zone de fonctionnement des contraintes physiques, car les actionneurs sont limités en amplitude, voir en vitesse et voir aussi en accélération,
- les grandeurs du système (sortie et état) doivent rester dans une certaine plage de fonctionnement connu par les contraintes d'exploitation. Elles peuvent être liées à la qualité du produit, à la marge de sécurité.

I.7.2 Objectif de fonctionnement

C'est la problématique posée par l'utilisateur du procédé qui doit être traduite en un problème de commande. A partir du cahier des charges, cela permet de spécifier :

- l'objectif qui peut être :
 - ✓ d'optimiser un critère de performance lié à des critères économiques augmenter le rendement, diminuer les pertes de matières premières, etc.
 - ✓ d'assurer la poursuite d'une trajectoire de référence en sortie du procédé. C'est un problème assez répandu et cela traduit les performances souhaitées du procédé en boucle fermée, en termes de rapidité et de précision. L'objectif peut aussi correspondre à un comportement optimal vis-à-vis de la qualité du produit à élaborer.
- les contraintes de fonctionnement que doivent respecter certaines grandeurs physiques :

La Commande Prédicative

- ✓ les actionneurs sont généralement limités en amplitude. Ils peuvent l'être aussi en vitesse et en accélération.
- ✓ certaines grandeurs du procédé, mesurées ou estimées, doivent rester dans une zone de fonctionnement. Elles peuvent être liées à :
 - 1- la qualité du produit (tolérance sur l'épaisseur d'une feuille de papier par exemple),
 - 2- l'environnement (concentration de polluant inférieure à une norme par exemple),
 - 3- la sécurité (température inférieure à un maximum par exemple).

I.7.3 Modèle

C'est la traduction de l'évolution du comportement du procédé. La modélisation peut se faire selon deux méthodes:

1. Modèle' boîte noire: L'établissement du modèle se fait à partir d'un ensemble de couples entrées-sorties. Il s'agit de choisir une représentation (fonction de transfert, réseaux de neurones, etc.) de la sortie en fonction de l'entrée et d'effectuer une identification des paramètres du modèle. Toutefois, pour être exploité en commande, il devra être dynamique pour représenter les variations du procédé au cours du temps. Le modèle obtenu est donc purement mathématique et a priori n'a aucune signification physique. Cette approche s'avère plus simple et plus rapide, mais peut être très difficile voire impossible à la mettre en œuvre dans le cas des systèmes multi variables ou de fortes non-linéarité. Le domaine de validité est plus restreint que celui obtenu avec un modèle de connaissance.

2. Modèle de connaissance: La prise en compte des phénomènes en jeu (physiques, chimiques, biologiques, etc.) permet, à partir des bilans (d'énergie, de population, etc.) d'établir un modèle de connaissance. Cette modélisation donne lieu à des équations dynamiques, souvent non linéaires, aux dérivées ordinaires, voir à des équations aux dérivées partielles dès lors que les évolutions spatio-temporelles pour des variables du procédé sont prises en compte. Cette approche permet d'arriver à une représentation plus proche que la réalité. La complexité de cette méthode réside dans la difficulté de simuler le comportement du procédé et à l'analyser formellement.

I.7.4 Problème d'optimisation

Le problème d'optimisation se traduit mathématiquement à une certaine fonction J . Le plus souvent, il s'agit de minimiser ou de maximiser cette fonctionnelle (appelé critère de performances ou fonction coût) qui dépend :

- des variables manipulables de commande représentées par le vecteur $u(t) \in R^m$

-des variables d'état avec le vecteur $x(t) \in R^n$

Cette fonction peut s'écrire sous la forme :

$$J(x(t_i), u(\cdot)) = \int_{t_i}^{t_f} F(x(t), u(t)) dt + E(x(t_f)), t > 0 \quad 1.1$$

Où la fonction coût $F: \mathcal{X} \times \mathcal{U} \rightarrow R^+$ est souvent continue et satisfait $F(0; 0) = 0$.

Souvent, une forme quadratique pour F est employée

$$F(x, u) = x^T Q x + u^T R u \quad 1.2$$

Avec Q et R des matrices de pondération symétriques définie positive. Le terme de pénalité terminal E dépend de la région terminale des contraintes $x(t_f) \in \mathcal{X}$. L'ensemble \mathcal{U} (respectivement \mathcal{X}) est défini par la vérification des contraintes sur les entrées (respectivement sur les variables d'état) du système.

Le problème d'optimisation est ramené, le plus souvent, à la minimisation du critère qui détermine la commande optimale sur l'horizon de prédiction fini

$$\tilde{u} = \arg(\min_{u \in \mathcal{U}} J(x(t_i), u(\cdot))) \quad 1.3$$

La commande prédictive cherche donc à déterminer une séquence de commandes futures $u(t)$ qui permet de minimiser le critère de performance (1.13), tout en assurant la vérification des contraintes. La résolution de ce problème d'optimisation peut être simple et exploitable lorsque l'argument recherché $u(t)$ est ramené à une suite d'arguments $u(k)$ pris à des instants discrets k connus ou à une fonction du temps par a métrisée par un nombre fini n_{pu} de coefficients qui sont alors les arguments à déterminer.

La résolution de ce problème d'optimisation constitue la pièce maîtresse de la commande prédictive. Cependant, il s'appuie sur le principe de base de ce type de commande : la prédiction. Le prédicteur établit un projet de commande sur un horizon futur fini, en

s'efforçant de faire coïncider le comportement prédit à partir du modèle au comportement futur souhaité.

I.8- Structure de commande prédictive utilisée

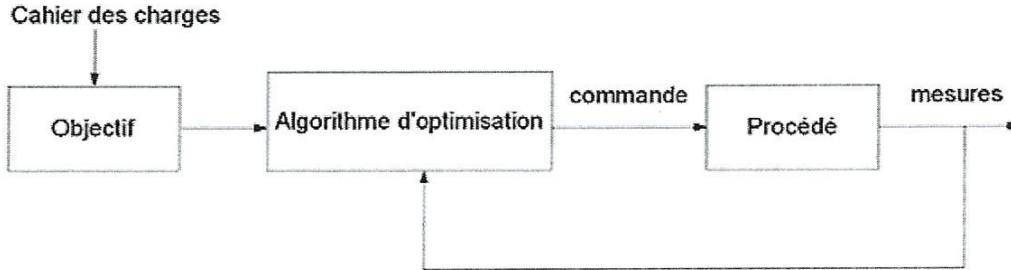


Figure I.2 - Structure de commande prédictive en boucle fermée

La structure de commande prédictive en boucle fermée est présentée par la configuration basique montrée dans la figure I.2. Une fois la problématique de commande posée par l'utilisateur du procédé, un critère de performance est défini traduisant les objectifs issus du cahier des charges. Le problème d'optimisation est alors déterminé et un algorithme numérique est utilisé qui permet de déterminer, à chaque instant k , le projet de commandes à appliquer à chaque période d'échantillonnage sur un horizon de prédiction H_p en minimisant le critère de performance J . A partir de la formulation de commande prédictive établie, ce critère s'écrit :

$$J(\tilde{u}) = \sum_{j=k+1}^{k+H_p} F(y_p(j), u(j-1)) \quad 1.4$$

Où la séquence de commande à déterminer est donnée par :

$$\tilde{u} = \{p_u(1), \dots, p_u(n_{pu})\} \quad 1.5$$

Les commandes à appliquer sur la fin de l'horizon de prédiction étant

$$u(j) = f_u(p_u(1), \dots, p_u(n_{pu})), j \in \{k, \dots, k + H_p - 1\} \quad 1.6$$

Le problème d'optimisation s'écrit alors :

$$P_{Np} : \min_{\tilde{u}} \{J(\tilde{u}) | \tilde{u} \in \mathcal{U}_{H_p}\} \quad 1.7$$

Où \mathcal{U}_{Hp} est l'ensemble des profils de commandes admissibles sur l'horizon de prédiction H_p . Ce problème d'optimisation est résolu, sur l'horizon de prédiction, sous des contraintes sur les variables de commande u et les variables de sortie y_p du procédé :

$$\left\{ \begin{array}{l} c_i (y_p(j), u(j-1)) \leq 0 \\ u \in \mathcal{U} \\ i \in \{1, \dots, n_{con}\} \\ j \in \{k+1, \dots, k+1\} \end{array} \right. \quad 1.30$$

Avec n_{con} le nombre de contraintes sorties.

Hypothèse 1 La fonction F intervenant dans la définition de la fonction coût J est de forme quadratique sur les fonctions de sortie.

Hypothèse 2 Les fonctions de contraintes c_i sont de classe C^1 .

Hypothèse 3 Les variables intervenant dans l'évolution de la fonction coût sont soit directement mesurées, soit estimées.

Le problème d'optimisation sous contraintes, comme il est défini de (1.26) à (1.30), ne peut être résolu car les sorties futures du procédé y_p ne sont pas connues dans le futur. Cependant, l'introduction du modèle dans la structure de commande va permettre de poser un problème résoluble sur l'horizon de prédiction H_p .

I.9- Les avantages et inconvénients

I.9.1- Les Avantages

✓ Puissance

Tout système théoriquement commandable, monovarié, multivarié, linéaire ou non, stationnaire ou non, avec contraintes diverses, peut être piloté par cette technique. Si l'on doit

La Commande Prédicative

toujours exploiter au maximum toutes les particularités de chaque processus, la procédure de mise en œuvre reste la même pour tout processus.

La méthode est générique et permet toutes sortes d'extensions, nous en avons vu quelques-unes (commandes partagées, par exemple).

✓ **Insensibilité**

Fondamentalement, toute commande revient à inverser le processus à réguler, ce qui amène à introduire des « zéros » dans le régulateur, source d'une grande sensibilité aux bruits divers qui affectent les mesures. La spécification d'erreur nulle en régime permanent impose également d'avoir un intégrateur dans ce régulateur, source de problèmes de commutation et de dénaturation. Si implicitement ces fonctions sont satisfaites, elles ne le sont pas explicitement, ce qui élimine ainsi une grande sensibilité aux bruits et les problèmes de gestion de l'intégrateur.

✓ **Contraintes (entrée-sortie)**

C'est la caractéristique fondamentale et unique, qui en fait tout l'intérêt industriel. La prise en compte des contraintes peut se faire de façon complète ou approchée suivant l'optimalité recherchée et les moyens de calculs disponibles.

✓ **Tendance**

La prise en tendance d'une perturbation mesurée ne peut se faire que si l'on se donne un rendez-vous dans le futur, ce qui impose en fait le schéma prédictif. Facile à mettre en œuvre, stable car en boucle ouverte, cette possibilité est à utiliser dès qu'elle est possible. Elle permet de diminuer les écarts de régulation tout en ne compromettant pas la robustesse.

✓ **Précision**

La projection de la commande sur une base future permet de ne pas avoir d'erreur de traînage sur une consigne quelconque connue ou estimée sur l'horizon de coïncidence : propriété très appréciée des équipements réalisant des asservissements de poursuite.

✓ **Compromis dynamique - stabilité**

Aucune commande n'est robuste par nature. Cette propriété s'oppose aux performances dynamiques et le but est de « casser » le caractère fatal de cette opposition. La démarche professionnelle honnête est de laisser le concepteur choisir entre ces deux exigences en lui présentant les termes du compromis.

✓ **Professionalisme**

Étant systématique et rationnelle, la commande prédictive est susceptible de rentrer dans le cadre d'une démarche de CAO, capable d'attaquer des problèmes industriels de grande dimension. Documentée à toutes les étapes, car partant d'un modèle, elle est donc transférable et facile à maintenir par la justification explicite de ces choix. Cependant, elle laisse la porte ouverte à toutes « astuces » spécifiques qui vont valoriser l'auteur.

✓ **Diagnostic**

Le modèle est disponible en ligne. La comparaison entre les sorties ou états du modèle et du processus permet d'aller plus loin que la simple auto compensateur ici exposé. Une analyse poussée peut conduire aux techniques de diagnostic, de maintenance prédictive selon état, etc., qui contribue fort à la diminution du démerite.

I.9.2- Inconvénients

Ils sont la contrepartie normale des avantages, deux aspects opposés de la même caractéristique fondamentale issue de la modélisation.

✓ **Nécessité d'un modèle : difficulté scientifique**

Il faut faire explicitement une réflexion de modélisation. Celle-ci peut être complète et déboucher sur un modèle de connaissance, ou rapide et se contenter d'un modèle de représentation (boîte noire).

Elle est le plus souvent intermédiaire et nécessite de mettre en œuvre des outils de simulation et d'identification.

Modéliser présente toujours un risque puisque le produit final (équations mathématiques) est par nature hétérogène avec les données de base.

✓ **Puissance de calcul : difficulté technique**

Par rapport à un PID classique, il est clair que, s'il peut s'appliquer, son rapport « puissance de calcul/performance » est bien supérieur.

Même dans le cas de régulateur mis sous forme compacte, le nombre d'opérations augmente avec l'ordre du processus et la prise en compte des contraintes.

L'optimalité a un coût, interdisant l'emploi de la méthode dans des organes frustrés de calcul, pour certains processus très rapides.

L'espoir que les progrès de la technologie électronique permettent de disposer de calculateurs de plus en plus performants est à modérer par les exigences de plus en plus grandes demandées aux systèmes de commande qui satureront éternellement les possibilités offertes. L'utilisation en temps réel de modèle de connaissance (déjà possible dans certains cas), qui apportera une robustesse active remarquable tant en état qu'en structure par une adaptation naturelle à l'environnement, est très exigeante en puissance de traitement (mémoire, temps de cycle).

✓ **Nouvelle démarche : difficulté industrielle**

Après les inconvénients scientifiques et technologiques, voyons maintenant les modalités industrielles de mise en œuvre, liées aux structures de l'entreprise.

Les répartitions de responsabilité étaient auparavant bien clairement distribuées dans l'entreprise. L'automatique était l'affaire des régulateurs : instrumentation, actionneurs, capteurs, maintenance et calculateurs, fonction essentiellement perçue par le reste de l'entreprise par sa partie matérielle visible.

Le producteur, spécialiste du processus, connaît son système dans ses aspects matériels, fonctionnels, logiques, etc., et utilise, en tant que de besoin, les services du « régulateur ». Il est plus soucieux d'optimalité de marche que de régulation dynamique, alors que l'automaticien, fonction horizontale de l'entreprise, n'a pas à connaître tous les processus.

La Commande Prédicative

L'automatique à base de modèle nécessite, par contre, une coopération certaine entre ces deux acteurs, qui peut, pour toutes sortes de raisons dépassant le cadre technique qui est ici le nôtre, se mettre en place ou non.

L'automatique avancée est un projet de l'entreprise et qui ne peut être entrepris sans prise de conscience et désir de travailler dans ce nouvel environnement culturel.

Le personnel doit alors avoir une formation complémentaire portant sur la modélisation, l'identification, la simulation et la commande avancée, dont certains décideurs auront peut-être encore, pendant un certain temps, des difficultés à en apprécier l'utilité.

I.10 - Conclusion

Ce qui a été présenté ici n'a d'autre prétention que d'être une simple introduction aux concepts de la commande prédictive, car beaucoup reste à dire tant au niveau des développements et justifications théoriques que de l'implantation informatique des régulateurs. Il ne s'agissait que de présenter les principes, qui nécessitent un effort certain de compréhension. Cette commande n'est pas à ajouter à la liste des commandes proposées par ailleurs, car elle est plus une démarche qu'une proposition spécifique, comme ont pu l'être, dans le passé, le PID, la commande quadratique ou le placement des pôles, etc. C'est une démarche ouverte, qui, si l'on respecte ses principes fondamentaux, est capable d'intégrer précisément tous les résultats de ces méthodes. Mises à part les commandes de niveau 0 : manuel, tout ou rien, logique, PID, etc., commandes sans modèle qui en nombre couvriront toujours l'essentiel des besoins alimentaires, l'avenir appartient, lorsqu'il s'agit de piloter des unités économiquement significatives, aux commandes avec modèle interne. Qu'elles soient prédictives ne complique pas le travail de l'automaticien mais lui donne la possibilité technique, et la rentabilité économique attachée, de prendre en compte les contraintes, porte ouverte vers l'optimalité à horizon fini, qui est le véritable problème industriel à résoudre. La difficulté, éternelle, reste donc la modélisation, investissement premier fondamental, qui fait sortir du domaine strict de la commande. L'automaticien industriel qui était un « régleur », car il adaptait les paramètres de réglage d'un régulateur préexistant, devient en partie un modéliste, et cette fonction rencontre celle du « spécialiste processus », avec tout l'intérêt que cela entraîne et toutes les difficultés organisationnelles attachées.

chapitre II

La commande Prédictive à modèle

II.1- Introduction

Commande prédictive modèle, ou MPC, est une méthode avancée de contrôle du processus de cycle c'a été en service dans processus industries comme usines chimiques et raffineries de pétrole depuis les années 80. Les contrôleurs prédictifs à modèles se fondent sur les modèles dynamiques du processus, les modèles empiriques les plus souvent linéaires de l'identification de système.

II.2-Vue d'ensemble

Les modèles sont employés pour prévoir le comportement de variables dépendantes (c.-à-d. sorties) de système dynamique en ce qui concerne des changements de variables indépendants (c.-à-d. entrées) du processus. Dans des processus chimiques, les variables indépendantes sont le plus souvent de l'ensemble des contrôleurs de normalisation qui régissent le mouvement de valve (par exemple. les positionneurs de valve des cascades de contrôleur coulent avec ou sans, des températures ou de pression), alors que les variables dépendantes sont le plus souvent des contraintes dans le processus (par exemple. pureté de produit, limites fonctionnâtes sûres d'équipement). La commande prédictive à modèle emploie les modèles et les mesures courantes pour calculer les mouvements futurs dans les variables indépendantes qui résulteront en fonction qui honore toutes les contraintes de variable indépendante et dépendant. L'MPC envoie alors cet ensemble de mouvements variables indépendants à l'ensemble des contrôleurs correspondants d'être mis en application dans le processus.

Malgré le fait que la plupart des vrais processus sont approximativement linéaires dans seulement une fenêtre de fonctionnement limitée, des approches linéaires de l'MPC sont employées dans la majorité d'applications avec le mécanisme de rétroaction des erreurs composantes de prévision de l'MPC dues à la disparité structurale entre le modèle et processus. Les commandes prédictives à modèle consistent seulement en modèles linéaires. Ceci simplifie le problème de commande à une série de calculs directs d'algèbre de matrice qui sont rapides et robustes.

Quand les modèles linéaires ne sont pas suffisamment précis en raison des non-linéarités de processus, le processus peut être commandé avec l'MPC non-linéaire. L'MPC non-linéaire utilise un modèle non-linéaire directement dans l'application de commande. Le modèle non-linéaire peut être sous forme de données empiriques adaptées (par exemple. réseaux neurologiques artificiels) ou un modèle de fidélité élevée basé sur des principes fondamentaux

tels que la masse, des espèces, et des bilans énergétiques. Le modèle non-linéaire peut être linéarisé pour dériver un filtre de Kalman ou pour indiquer un modèle pour MPC linéaire. Les dérivés de temps peuvent être placés à zéro (état d'équilibre) pour des applications de la réconciliation en temps réel d'optimisation ou de données. Alternativement, le modèle non-linéaire peut être employé directement dans la commande prédictive modèle non-linéaire et l'évaluation non-linéaire (par exemple. évaluation mobile d'horizon). Un modèle non-linéaire fiable est un composant de noyau de la simulation, de l'évaluation, et des applications de commande [12].

II.3- Principe général de fonctionnement

La figure II.1 illustre une formulation générale de l'approche utilisée par la commande prédictive dans le cas d'une poursuite de trajectoire :

1. Premier étape : prédiction de sortie : le contrôleur calcule la sortie prédite \hat{y} du procédé sur l'horizon de prédiction H_p en se basant sur le modèle du procédé.

2. Deuxième étape : projet de commande : les signaux de commandes futures $u(k+j|k)$, $j = 1, \dots, H_p$ sont déterminés en minimisant la fonction de coût et en respectant les contraintes qui portent sur les commandes et sorties du procédé.

3. Troisième étape : envoi de la première composante du projet de commande : le premier élément de la séquence de commande, $u(k|k)$ est appliquée au procédé, par contre les autres valeurs de la séquence de commande sont abandonnées. L'étape 1 est répétée avec des nouvelles mesures connues $y(k+1)$, une nouvelle séquence de commande $u(k+1+j|k+1)$, $j = 0, \dots, H_p-1$ est élaborée.

Les imperfections du modèle sont corrigées avec la réactualisation des erreurs entre les objectifs et les mesures. Le projet de commande est amélioré à chaque échantillon de temps et par conséquent la séquence $u(k+1+j|k+1)$, $j = 0, \dots, H_p-1$ différera très certainement de $u(k+j|k)$, $j = 1, \dots, H_p$.

Commande prédictive à modèle

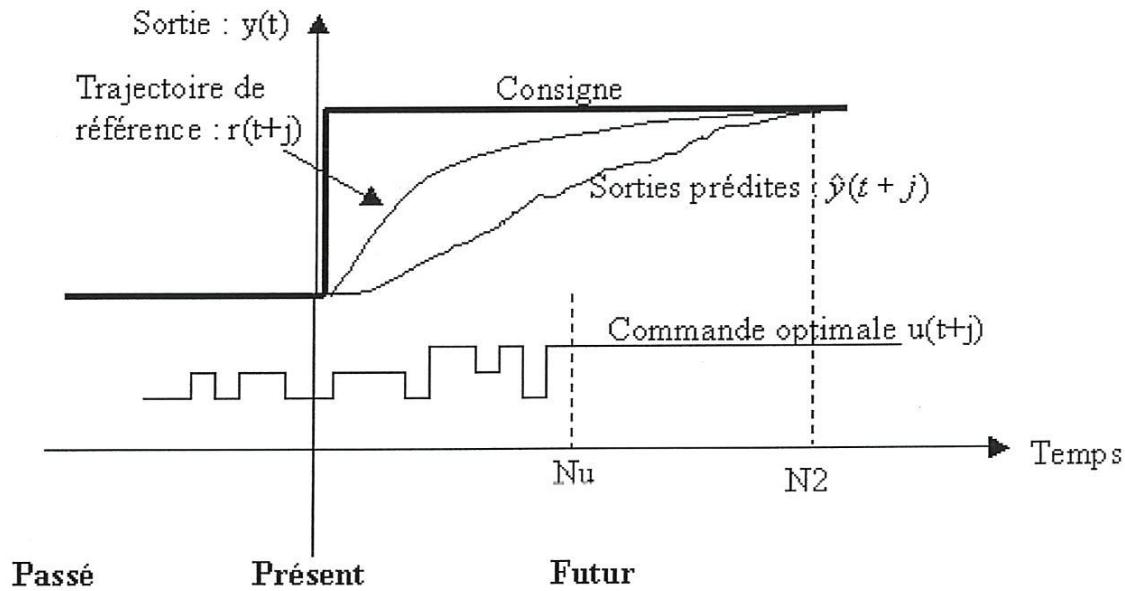


Figure II.1- Schéma de principe d'une commande prédictive

On comprend que la tâche d'optimisation occupe une place primordiale dans la stratégie de commande et sa résolution va grandement dépendre de la complexité du modèle. Dans le cas d'un modèle linéaire et d'une fonction de coût quadratique, la solution du problème d'optimisation est simplement une fonction explicite des entrées futures et des sorties prédites. La complexité du problème d'optimisation dépend du nombre de variables, de la valeur des différents horizons mais également de la présence de contraintes sur les commandes et/ou sur les sorties. Pour ces raisons, la résolution en ligne à l'aide d'algorithmes coûteux en temps de calcul s'avère parfois compliquée et ce malgré la constante évolution de la puissance des calculateurs.

II.4- Modélisation du système

Pour l'implémentation de la stratégie, la structure de base de la Figure II.2 est mise en œuvre. Un modèle sert à prédire les futures sorties du système.

Commande prédictive à modèle

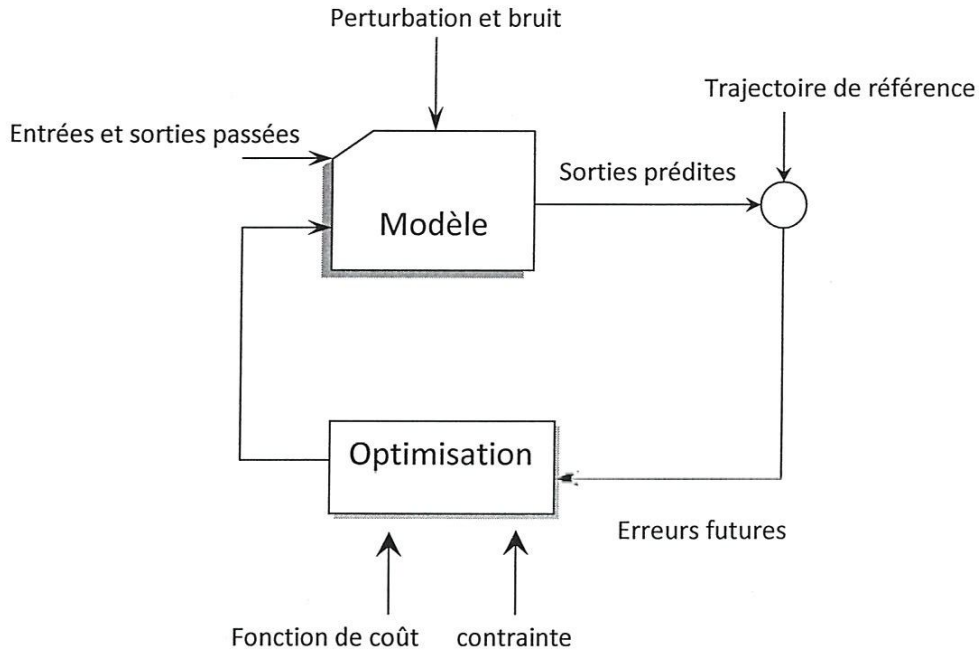


Figure II.2 - structure de base de la commande prédictive à modèle

Grâce aux valeurs courantes et passées de la commande et aux commandes optimales futures. Ces dernières sont calculées par une méthode d'optimisation, qui prend en compte la fonction de coût (qui dépend aussi des consignes futures), et éventuellement des contraintes.

Le modèle du système joue donc un rôle central dans le correcteur. Le modèle choisi doit être capable de rendre compte de la dynamique du processus pour prédire précisément les sorties futures et aussi doit être simple à implémenter et à comprendre. Tous les algorithmes de commande MPC ne diffèrent entre deux que par le modèle utilisé pour représenter le processus et les bruits, et par la fonction de coût à minimiser.

Les modèles les plus souvent considérés, particulièrement dans l'industrie chimique, sont ceux qui utilisent les réponses impulsionnelles ou indicielles. La réponse impulsionnelle du système est relativement simple à obtenir car elle nécessite uniquement la mesure de la sortie lorsque le système est excité par une impulsion.

L'autre modèle, qui se base sur la réponse indicielle du système, est obtenu à l'aide des sorties du système lorsque l'entrée excitante est un échelon. Mais les limitations résident dans le fait que seuls des systèmes stables en boucle ouverte sont identifiables de cette façon.

Commande prédictive à modèle

La description du procédé sous forme de fonction de transfert est la plus répandue, car elle permet de décrire un grand nombre de systèmes. On trouve également des formulations de la commande prédictive utilisant la représentation d'espace d'état, qui décrit facilement les systèmes multi variables. D'autres modalisations existent encore, qui incluent un modèle du bruit et des perturbations (modèle stochastiques).

Dans ce travail nous intéressons aux modèles des systèmes non linéaires à présence des perturbations ou des bruits.

Les différentes approches de la commande prédictive se différencient par le type de modèle qu'elles utilisent, ainsi que pour la forme de la fonction de coût et la prise en compte ou non de contraintes [8].

II.4.1- Modèle de prédiction

Le modèle joue un rôle décisif dans le calcul de la commande. Il doit reproduire avec une exactitude suffisante les caractéristiques dynamiques du processus à de futurs moments du temps $\{y(k + i | k)\}$ en se servant des valeurs passées de la commande, de la sortie et des valeurs optimales de la commande future $\{u(k + i | k)\}$.

Les différentes stratégies du MPC emploient différents modèles pour représenter la relation entre la sortie et l'entrée du système. Parmi les signaux d'entrée sont les variables manipulées (ou commande) et des perturbations mesurables qui peuvent être "traitées" par compensation par «avance» ("feedforward"). De plus, doivent être pris en considération les composantes non considérées par le modèle du système, ce qui inclut l'effet des entrées non mesurables, des bruits et des erreurs de modélisation. Ainsi, le modèle peut être divisé en deux parties: le modèle du processus et le modèle des perturbations (exogènes ou endogènes). Les prédictions de la sortie seront fonction des deux.

II.4.1.1- Modèle du processus

Dans l'approche classique de la commande prédictive toute forme de modélisation, et le plus souvent linéaire, est utilisée. La réponse impulsionnelle ou celle à un échelon, sont les plus usitées, mais existent aussi les représentations par fonction de transfert et par formalisme d'état. Donnons une vision rapide de ces types de modélisation.

Réponse impulsionnelle: elle apparaît dans l'algorithme MAC et dans les cas spéciaux de GPC et d'EPSAC, notamment pour les systèmes stables. Le modèle (tronqué) à utiliser pour la prédiction, est celui obtenu de la réponse impulsionnelle du système:

$$y(k+i|k) = \sum_{j=0}^{n_h} h_j u(k+i-j|k) \quad 2.1$$

$y(k+i|k)$ est la prédiction de la sortie en $k+i$ étant donnée sa connaissance en k , $u(k+i-j|k)$ est l'entrée en $k+i-j$, h_j sont les valeurs de la sortie à chaque période d'échantillonnage quand on met à l'entrée un signal impulsionnelle d'amplitude 1.

Un Inconvénient de ce type de modélisation est le nombre élevé de paramètres nécessaires pour une précision appropriée. Habituellement N a une valeur comprise entre 40 et 50. Néanmoins c'est le modèle le plus appliqué dans l'industrie peut être parce qu'il est tout à fait intuitif et compréhensible. Un grand avantage pour utiliser ce modèle est qu'il n'est pas besoin d'information à priori et que l'identification est simple. De plus des dynamiques complexes telles que celles à phase non minimale ou en présence de retards considérables, sont facilement pris en compte.

Réponse indicielle: elle est utilisée dans l'algorithme DMC, et ce cas est assez semblable au précédent à la différence près que le signal d'entrée est un échelon. A nouveau, le modèle tronqué, pour les systèmes stables, est utilisé pour la prédiction de la sortie. Il se présente sous la forme:

$$y(k) = \sum_{j=1}^N g_j \Delta u(k+i-j|k) \quad 2.2$$

$y(k+i|k)$ est la prédiction de la sortie en $k+i$ étant donnée sa connaissance en k , les g_j sont es paramètres obtenus à la sortie du système lorsqu'on applique un échelon à l'entrée, et $u(k) \{u(k) - u(k-1)\}$ les changements de l'entrée du système.

Le modèle a les mêmes avantages et inconvénients que ceux expliqués précédemment.

Fonction de transfert: utilisé dans GPC, UPC, EPSAC, EHAC, MUSMAR et MURHAC entre autres. Le modèle de prédiction est:

$$y(k+ik) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} u(k+ik) \quad 2.3$$

Où

Commande prédictive à modèle

$$A(Z^{-1}) = 1 + a_1 Z^{-1} + a_2 Z^{-2} + \dots + a_{na} Z^{-na} \quad 2.4$$

$$B(Z^{-1}) = b_1 Z^{-1} + b_2 Z^{-2} + \dots + b_{nb} Z^{-nb} \quad 2.5$$

Cette représentation est valide également pour des processus instables et elle a l'avantage d'avoir besoin de peu de paramètres, néanmoins il est nécessaire une connaissance a priori du processus, particulièrement pour déterminer l'ordre des polynômes $A(Z^{-1})$ et $B(Z^{-1})$.

L'espace des états: utilisé dans PFC, elle a la représentation suivante:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad 2.5$$

$$y(k) = Cx(k) \quad 2.6$$

Où $x(k)$ est le vecteur d'état, $u(k)$ le vecteur des entrées et $y(k)$ des sorties, A, B, et C sont les matrices du système, de l'entrée et de la sortie respectivement. Alors la prédiction de la sortie s'écrit:

$$y(k+i|k) = C[A^i x(k) + \sum_{j=1}^i A^{i-j} B u(k+j-1|k)] \quad 2.7$$

Ce modèle a l'avantage de pouvoir être utilisé pour les systèmes multivariés. Son utilisation présuppose la mesure de l'état global ce qui n'est pas toujours possible, dans ce cas un observateur des états doit être envisagé.

II.4.1- 2 Modèle de perturbation

La sélection du modèle à utiliser pour représenter les perturbations affectant le système est aussi important que la sélection du modèle du processus. Le modèle le plus utilisé est le modèle auto-régressif de moyenne mobile intégré CARIMA (Controlled Auto-Regressive Integrated Moving Average), où les perturbations qui sont la différence entre la sortie mesurée et calculée par le modèle, sont données par:

$$\eta(t) = \frac{C(Z^{-1})}{D(Z^{-1})} e(k) \quad 2.8$$

Où le polynôme $C(Z^{-1})$ peut être égal à un, le polynôme $D(Z^{-1})$ est un intégrateur $D = 1 - Z^{-1}$ et $e(t)$ est un bruit blanc de moyenne nulle, ce modèle est utilisé dans GPC, EPSAC, EHAC et UPC, et avec de petites variations dans les autres méthodes. Il est possible de noter que l'inclusion de l'intégrateur élimine l'erreur stationnaire. Le filtre $C(Z^{-1}) / D(Z^{-1})$ peut également être choisi de sorte à

éliminer les perturbations de fréquence définie.

II.5- Fonction objectif et obtention de la loi de commande

Les divers algorithmes MPC proposent différentes fonctions de coût pour obtenir la loi de commande. L'objectif principal consiste à faire en sorte que la sortie future pour l'horizon de prédiction considéré s'approche de la meilleure façon possible de la trajectoire de référence $\{w(k)\}$ tout, en même temps, pénalisant l'effort de commande $\Delta u(k)$ nécessaire. Une expression générale de fonction objective adaptée à cette tâche est donnée

Par:

$$J(N_1, N_2, N_U) = E\{\sum_{i=N_1}^{N_2} \sigma(i)[y(k+i|k) - w(k+1|k)]^2 + \sum_{i=1}^{N_U} \lambda(i)[\Delta u(k+i-1|k)]^2 \quad 2.9$$

Dans quelques méthodes le deuxième terme, relatif à l'effort de commande, n'est pas pris en compte. Une comparaison de différents types de fonction objective, peut être trouvée dans [19].

II.5.1- Paramètres

N_1 et N_2 définissent l'intervalle de temps où l'on désire que la sortie se rapproche de la référence. Si est prise une valeur élevée de N_1 c'est parce qu'il n'est pas important d'observer une erreur aux premiers instants. Dans les processus avec retard d , il n'existe pas de raison pour que N_1 soit plus petit que ce temps puisque la sortie ne commencera pas à réagir à la commande appliquée en k avant le moment $k + d$. De même si le processus est de phase non minimale, ce paramètre permet d'éliminer de la fonction objective, les moments du temps où la réponse est inverse, N_U est l'horizon de commande. Les coefficients σ et λ sont des valeurs qui pénalisent le comportement futur, habituellement sont utilisées des valeurs constantes ou des valeurs exponentielles. Par exemple, il est possible d'obtenir un poids exponentiel pour σ

$$\sigma(j) = \alpha^{N_2-j} \quad 2.10$$

Si σ a une valeur entre 0 et 1, alors cela signifie que les erreurs les plus éloignées du moment k sont pénalisées plus que les valeurs proches, favorisant l'obtention d'une réponse douce associé à un plus petit effort de commande. Si au contraire, $\alpha > 1$, Les premières erreurs sont plus pénalisées, ce qui cause une commande plus

forte.

II.5-2 Trajectoire de référence

Un des grands avantages des commandes prédictives est que, si l'on connaît l'évolution future de la trajectoire de référence, le système peut commencer à répondre avant que le changement ne soit détecté. L'évolution future de la référence est bien connue dans beaucoup d'applications, comme en robotique, ou les processus batch. Dans la plupart des méthodes habituelles, utilisation est faite d'une trajectoire de référence qui n'est pas nécessairement égale à la vraie référence. Par exemple, on peut approcher celle-ci au moyen d'un système du premier ordre:

$$r(k+i) = r(k+i-1) + (1-\alpha)r(k+i) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad 2.11$$

Où α est un paramètre contenu entre 0 et 1 qui constitue une valeur réglable qui influencera la réponse dynamique du système (ainsi, α proche de 1 conduira à une réponse "douce").

II.6- Problématiques liées à la stratégie de commande prédictive à modèle

La stratégie de commande prédictive à modèle, telle qu'elle vient d'être exposée, semble bien séduisante. Mais en revanche certains problèmes d'analyse peuvent surgir. Cela peut se résumer à deux points : la faisabilité et la stabilité. Généralement, la faisabilité est un terme spécifique associé aux problèmes d'optimisation, désignant l'existence d'une solution qui respecte toutes les conditions imposées. Si l'on transpose ce concept au cas de la commande MPC avec contraintes (dans la plupart des cas), un problème (avec contraintes sur la sortie, la commande,...) est faisable si, en utilisant tous les degrés de liberté disponibles, il existe une solution qui satisfait à toutes les contraintes imposées. Parmi les éléments induisant un fort risque d'infaisabilité, on peut

citer

- ✓ les incertitudes de modèle ;
- ✓ les perturbations qui agissent sur le procédé ;
- ✓ les demandes de performances trop strictes ;
- ✓ les contraintes sur les commandes, les états, les sorties ;
- ✓ les changements trop importants de consigne ou trop brusques ;
- ✓ les procédés instables en boucle ouverte.

Quant à la stabilité, quelle que soit la stratégie de commande utilisée, une étude de cette propriété est toujours nécessaire. Dans le cadre de la stratégie de commande prédictive, elle dépend fortement des comportements futurs souhaités du procédé, c'est-à-dire du critère de performance et des contraintes. Il s'agit alors de vérifier que la commande permet d'assurer la stabilité du procédé en boucle fermée. Cette étude dépend notamment de la valeur prise par l'horizon de prédiction p et l'horizon de commande m . Les résultats les plus simples à obtenir en théorie sont obtenus avec $p = m = \infty$ [13].

Cependant, ce cas n'étant pas réalisable pratiquement, la troncature des horizons amène à différentes approches [14], [15].

II.7- Paramètres de réglage de la commande prédictive

Choisir le bon modèle du système et un contrôleur MPC comme stratégie de commande ne résout pas encore le problème. Il reste à déterminer les paramètres de réglage spécifiques à la commande prédictive, qui interviennent généralement dans le critère de minimisation. Ces paramètres sont en fait assez semblables d'une structure prédictive à une autre, se composant d'horizons de prédiction et de pondérations. Si l'on se base sur une stratégie prédictive de type GPC (Generalized Predictive Control), ces paramètres de réglage sont les suivants :

- les horizons inférieur (N_1) et supérieur (H_p) de prédiction sur la sortie ;
- l'horizon de prédiction sur la commande (H_u) ;
- les matrices de pondérations sur l'erreur de poursuite (Q) et sur la commande (R).

Le critère d'optimisation peut englober aussi des coûts terminaux qui doivent être bien choisis surtout pour la stabilité du procédé. Il faut noter que non seulement ces paramètres de réglage, mais aussi la structure du critère quadratique, jouent un rôle fondamental sur les performances de la commande résultante. Dans la pratique, la période d'échantillonnage a aussi un rôle essentiel.

Choix des horizons

Comme décrit précédemment, la difficulté du temps continu a été contournée par une discrétisation du temps et de l'argument commande sur un temps fini. Cela a introduit les horizons de prédiction H_p et de commande H_u .

Dans le cas général, cela reste un problème ouvert puisqu'un horizon optimal dépend de la dynamique de la consigne à poursuivre par exemple, mais aussi de la dureté des contraintes par rapport aux possibilités du procédé.

• Choix de l'horizon de prédiction H_p

Le choix de l'horizon de prédiction H_p joue un rôle important tant par la quantité d'informations fournie à l'algorithme, que du point de vue de la faisabilité numérique du problème d'optimisation. Sa détermination est basée sur des considérations physiques ayant trait au comportement du modèle en boucle ouverte, à l'objectif à atteindre ainsi que dans la prise en compte des contraintes. Cependant, s'il n'existe pas encore de méthode permettant de choisir l'horizon de prédiction optimal vis-à-vis du problème posé. Dans ce cas, le choix d'un horizon de prédiction variable dans le temps peut être judicieux car il permet a priori une meilleure poursuite par rapport au choix d'un horizon H_p constant [16]. Plusieurs stratégies de choix de ces paramètres existent, voir par exemple [17], [18]. Ainsi, si l'on se réfère au cas GPC, on notera que pour un système à retard, l'horizon inférieur de prédiction sur la sortie peut être choisi égal à la valeur du retard pur divisé par la période d'échantillonnage ; pour les autres systèmes il peut être égal à 1. L'horizon supérieur de prédiction sur la sortie peut être choisi approximativement égal au temps de réponse du procédé divisé par la période d'échantillonnage.

• Choix de l'horizon de commande H_u

Si H_p augmente, les performances nominales sont améliorées si toutefois H_u est suffisamment grand. Pourtant dans la pratique, pour beaucoup de systèmes, on constate qu'une valeur de H_u supérieure à 3 n'apporte pas de différences significatives. Une autre règle générale est de choisir $H_p - H_u$ supérieur au temps de réponse. L'horizon de prédiction

Commande prédictive à modèle

sur la commande doit être augmenté en fonction de la complexité du système à commander.

• Choix des matrices de pondérations Q et R

Généralement la pondération sur l'erreur de poursuite Q est considérée comme unitaire, dans ce cas seule la pondération sur l'effort de commande R intervient et est choisie conformément au critère suivant : une valeur élevée dans les éléments de la matrice R conduit à une réponse plus lente du système bouclé.

II.8- Sur les formalismes de représentation des systèmes en commande MPC

Plusieurs représentations linéaires d'un système physique sont utilisées pour la modélisation : formulation entrée/sortie par fonction de transfert (équivalent à une implantation par équations aux différences ou encore représentation par convolution discrète), approche par représentation d'état discrète. La représentation polynomiale entrée/sortie possède l'avantage de pouvoir utiliser directement des fonctions de transfert issues de techniques d'identification « boîte noire », ce qui est mieux adapté au milieu industriel. Cependant, elle devient très fastidieuse à manipuler dans un contexte de commande multivariable. De fait, la représentation d'état discrète est le formalisme privilégié dans le cadre multivariable.

Partant de ce constat, la commande MPC s'avère être une loi de commande très intéressante offrant la possibilité d'analyser de manière relativement simple la stabilité du système. Par rapport aux représentations dites « polynomiales » (comme la formulation de la commande GPC [17]), la commande MPC utilisant le formalisme d'état permet de traiter naturellement sous une forme unifiée le cas des systèmes monovariables et multivariables. Il est clair que l'interaction entre les différentes voies entrée/sortie des systèmes multivariables suggère l'utilisation de la technique MPC dans le formalisme de représentation d'état qui considère explicitement le système avec ses couplages, plutôt qu'une loi de commande prédictive conçue pour système scalaire obtenu en découplant le système initial. En effet, dans ce dernier cas, les performances obtenues peuvent être médiocres ou peu satisfaisantes, le système couplé risquant même de devenir instable. Un autre avantage de la commande MPC dans le formalisme de la représentation de l'état réside dans le fait que cette technique peut s'appliquer aussi à des systèmes non carrés (possédant un nombre d'entrées différent du

nombre de sorties).

II.9. Le calcul de l'intrant optimal

Dans le cas le plus simple considérée ci-dessus, quand il ya un seul point de coïncidence et un seul paramètre à choisir pour la trajectoire d'entrée avenir, il existe une solution unique, comme cela a déjà été à déclaré .plus souvent, il ya des points coïncidence de plusieurs à l'horizon de prévision peut-être même tous les points $k + 1, k + 2, \dots, k + Hp$ sont des points de coïncidence. Même s'il ya plus d'un paramètre d'être choisi pour la trajectoire d'entrée avenir, dans la situation habituelle il ya des points coïncidence plus paramètres. Dans ce cas, il ya plus d'équations d'être satisfaits que le nombre de variables disponibles et il est en général impossible de les résoudre exactement. C'est, il est impossible de choisir la trajectoire d'entrée future de telle sorte que la sortie prévue coïncide avec l'entrée de référence à tous les points de coïncidence, dans ce cas, une sorte de solution approximative est nécessaire. Le plus souvent, une solution des moindres carrés est trouvé, à savoir un de telle sorte que la somme des carrés des erreurs, $\sum_{i \in P} [r(k + i | k) - \hat{y}(k + i | k)]^2$, est minimiser , où P désigne l'ensemble des indices i qui correspondent au point un hasard

peu de temps, si le modèle interne est linéaire, la solution des moindres carrés est facile à trouver, et des rendements fait une loi de commande linéaire.

Encore une fois, nous permet d'examiner les cas le plus simple d'abord, avec un point k coïncidence $k + hp$, et un paramètre permet de choisir, $\hat{u}(k | k)$, sur le plan conceptuel, on peut procéder comme suit. Le modèle interne peut d'abord être utilisée pour prédire la réponse devient sans $\hat{y}_f(k + Hp | k)$ de la plante, à savoir la réponse qui serait obtenu au point un hasard si la trajectoire d'entrée future est resté à l'u dernière valeur $u(k - 1)$ détaillées de la façon dont cela est obtenu dépendra du modèle de la disposition, parce que les «conditions initiales» dépendra de la de la modèle .si une réponse à un échelon ou à impulsions est disponible en tant que modèle, puis toutes les entrées disponibles sont passées entrées sont modèle d'équation needed.for une fonction de transfert ou de la différence, n entrées et sorties dernières sont nécessaires, où n est l'ordre de la fonction de transfert. Devant un modèle state_space, l'état actuel est nécessaire, ou une estimation de l'il. Maintenant Soit $S(Hp)$ est la réponse du modèle à une entrée échelon unité, Hp étapes après l'étape de l'unité est prévu une production appliquées pour l'instant $k + Hp$ est

chapitre III

Chaudière Modélisation et Identification

III.1-Introduction

On appelle chaudière, tout générateur de vapeur ou appareil évaporatoire, un équipement dont le but est d'élever la température de l'eau, jusqu'à l'état de vaporisation, puis l'amener à une température et à une pression bien déterminées.

La chaudière ainsi définie peut être considérée comme un transformateur d'eau en vapeur par le débit de chaleur résultant de la combustion d'un débit du combustible et le débit d'air en proportions déterminées.

La vapeur produite a pour rôle d'utiliser son énergie calorifique à des fins motrices (entraînement des turbines à vapeur), d'échauffement (produits chimiques...etc.), de nettoyage et d'interagit.

Pour des raisons économiques, sécuritaires, et de rentabilité, ainsi que pour des meilleurs rendements et souplesse d'exploitation, les chaudières occupent une place très importante dans l'industrie de l'énergie.

Généralement, une chaudière peut être définie comme, un système permettant d'augmenter la température d'un fluide en vue de transporter de l'énergie thermique. Le fluide est qualifié de caloporteur.

III.2- Chaudière à circulation naturelle

Ce type de chaudière où les tubes sont verticaux donne l'avantage d'un taux de vaporisation particulièrement élevé. Dans cette chaudière il y a des tubes exposés au gaz de combustion (le faisceau de vaporisation) voir Figure III.1, et des tubes à l'extérieur de la chambre de combustion, qui donnent une différence de température, donc une différence de densité de l'eau des tubes à l'intérieure et à l'extérieure de la chambre de combustion, ce qui fait une circulation naturelle [20].

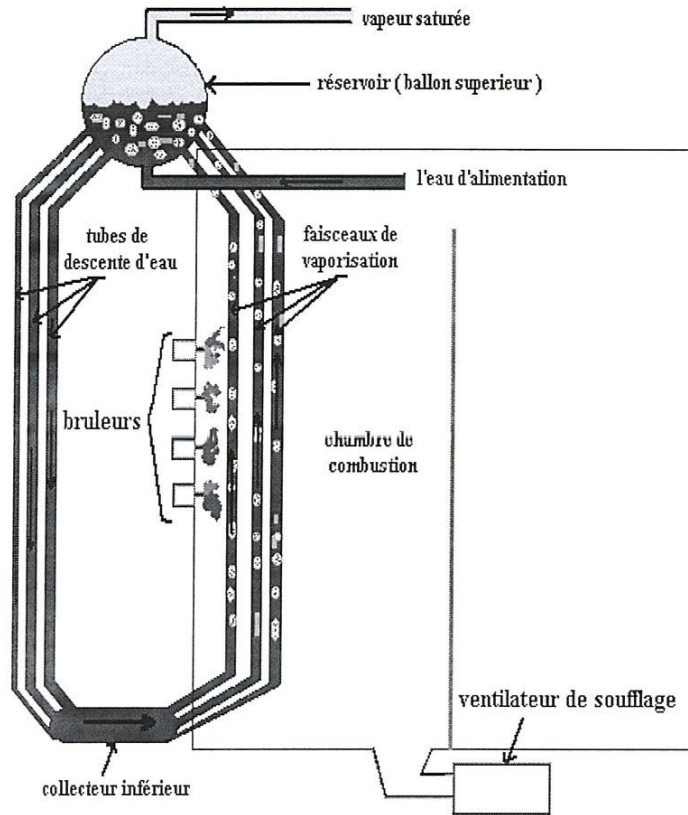


Figure III.1. Schéma simple d'une chaudière à circulation naturelle

III.3- Description de la chaudière étudiée

La chaudière étudiée est implantée dans le complexe GNL-SKIKDA, elle est de type à tube d'eau à circulation naturelle. Elle a pour rôle de fournir de la vapeur sèche pour entraîner les turbomachines (Turbocompresseur, turbopompe alimentaire, turbo ventilateur,etc.), pour les échangeurs thermiques et pour produire les vapeurs utilités.

III.4 -Principe de fonctionnement

L'eau d'alimentation est réchauffée dans les économiseurs puis acheminée au réservoir (voir figure III-2).

L'eau du réservoir descend vers les collecteurs inférieurs par des tubes à l'extérieur de la chambre de combustion, ensuite elle remonte dans les faisceaux de vaporisation à l'intérieure de la chambre de combustion (foyer), ou elle est chauffée. Le mélange eau –

vapeur remonte jusqu'au réservoir, dans ce ballon la vapeur saturée se sépare de l'eau, elle passe dans les surchauffeurs, sa température augmente. Enfin elle sort à une pression de 64 bars et à une température de 500 °C sur le collecteur général pour alimenter et servir les différents consommateurs.

III.5-Les boucles de régulation de la chaudière

Pour une bonne marche et un fonctionnement optimal de la chaudière il est impératif de contrôler les grandeurs incidentes (grandeurs d'entrées et de sorties) d'autant plus que des phénomènes complexes apparaissent dans la chaudière, phénomènes liés aux comportements dynamiques et thermodynamiques au sein de la chaudière, d'une part et aux perturbations de nature complexe d'autre part, dont la plus importante est la variation de la charge.

Pour le bon fonctionnement de la chaudière les exigences suivantes doivent être respectées et satisfaites :

- Du point de vue de l'utilisation il faut que le débit de vapeur demandé puisse être assuré à tout moment, que la pression de la vapeur à la sortie de la chaudière soit constante, que la température de la vapeur reste constante, et que la chaudière s'adapte rapidement aux variations de la charge.
- Du point de vue économique il faut que le débit de vapeur soit produit avec le minimum de consommation des produits de la chauffe. Donc assurer une autoconsommation et un rendement optimaux.
- Du point de vue sécurité il faut que le niveau dans le ballon supérieur soit maintenu entre d'étroites limites.
- Du point de vue écologique il faut que les fumées évacuées à l'atmosphère ne soient pas nuisibles et polluantes.

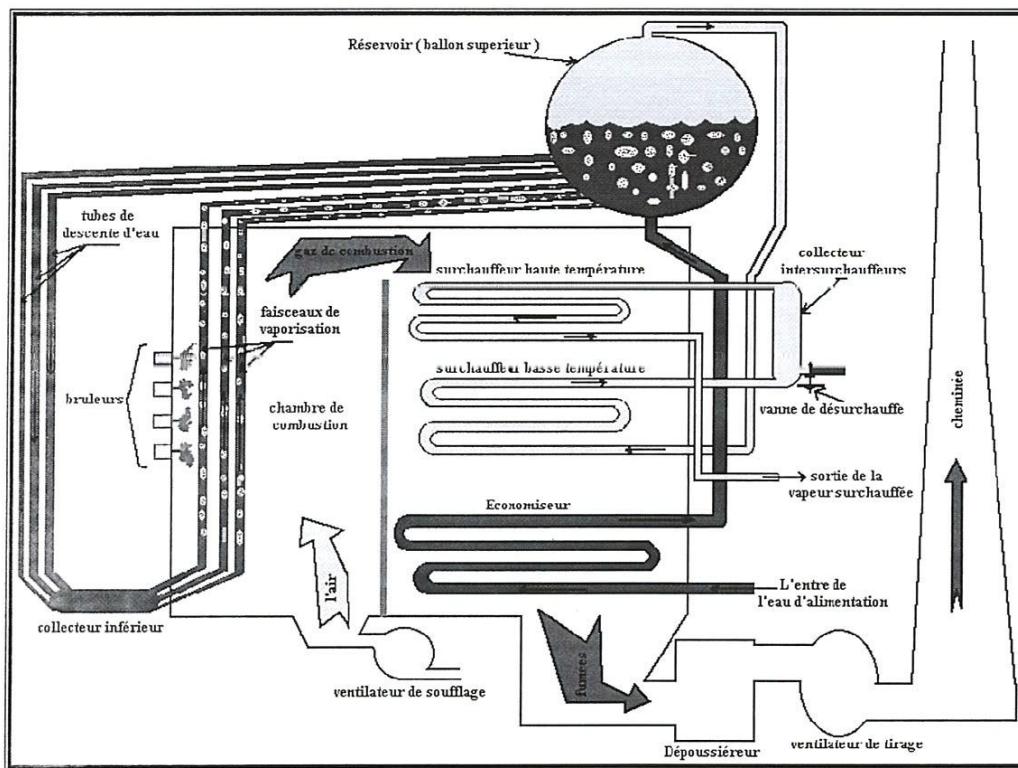


Figure III.2. Schéma fonctionnelle d'une chaudière

Pour satisfaire ces exigences on impose le contrôle de trois boucles de régulation et qui sont : la régulation de la chauffe (la combustion), la régulation de la température, et la régulation du niveau d'eau dans le ballon. Néanmoins cette dernière nécessite un intérêt particulier, d'ailleurs c'est l'objet de notre étude.

Les grandeurs à régler dans la chaudière concernent donc les paramètres suivants :

- La pression de la vapeur surchauffée par action simultanée sur le débit de combustible et le débit d'air de combustion. Avec un rapport air/combustible, corrigé en fonction de l'excès d'oxygène dans les fumées résultantes de la combustion
- La température de la vapeur surchauffée par action sur le débit d'eau de désurchauffe.
- Niveau de l'eau dans le réservoir par action sur le débit de l'eau d'alimentation.

Chaudière Modélisation et Identification

Par conséquent on a trois principales chaînes de régulation qui utilisent des correcteurs de type PID.

III.5.1- Régulation du niveau d'eau du réservoir

Cette boucle a pour rôle de maintenir le plan d'eau du réservoir (grandeur à régler) à une valeur constante et prédéterminée quelle que soit la demande de charge, c'est à dire le débit de la vapeur (grandeur perturbatrice), par action sur le débit d'eau (grandeur réglant) à travers la vanne de débit d'eau alimentaire (organe de réglage).

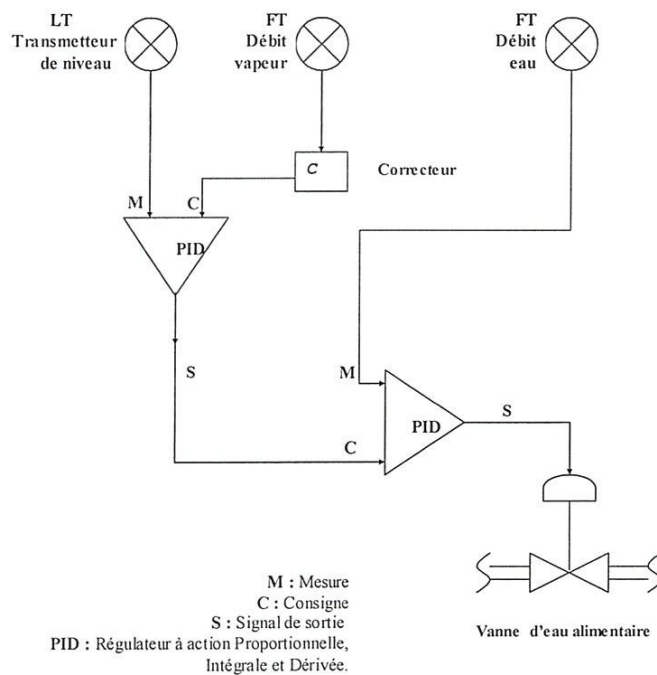


Figure III.3 Boucle simplifiée de la régulation du niveau de ballon

- Les boucles de régulations sont gérées par des régulateurs PID. Si pour les chaînes de combustion et de température ces correcteurs donnent des résultats très satisfaisants et répondent convenablement aux différentes sollicitations, ils montrent des limites et des insuffisances remarquables pour la chaîne de niveau.
- En effet la régulation du niveau dans le ballon doit assurer un bon rendement de la vaporisation, et garantir une réserve suffisante en eau. Le fonctionnement de cette boucle

entraîne des difficultés importantes. L'une d'elles résulte du fait que le contrôle d'un niveau de liquide, avec débit de soutirage fixe, crée un système intégrateur toujours difficile à régler. Cependant, le problème essentiel est dû à deux phénomènes inverses dits « de gonflement et de tassement » (sous-entendu du volume d'eau dans le ballon).

Une brutale augmentation de la demande de vapeur entraîne une diminution transitoire de la pression de vapeur dans le ballon. Ceci favorise la vaporisation et des bulles de vapeur se forment dans l'eau. La conséquence est une augmentation artificielle du volume d'eau dans le ballon (gonflement) et du niveau dans celui-ci. L'action du régulateur de niveau va se traduire par une diminution d'admission d'eau au plus mauvais moment. Une conséquence possible est alors un manque d'eau quelques minutes plus tard et le déclenchement d'une alarme de niveau bas qui engendre dans la plupart des cas le déclenchement de l'installation (par niveau très bas).

Inversement, lors de la diminution de la demande de vapeur, il se produit une augmentation de pression, dans ce cas il se forme moins de bulles de vapeur au sein du liquide (tassement du volume d'eau) et l'action du régulateur de niveau entraîne une augmentation de l'admission d'eau. Cette injection d'eau froide aggrave le phénomène de diminution apparente du niveau (contraction du volume d'eau liée à la diminution de la température). La conséquence ultérieure est généralement la présence d'un excès d'eau dans le ballon. Souvent, il ne peut se résorber car le débit de vapeur est insuffisant, et quelques minutes plus tard le déclenchement d'une alarme de niveau haut qui engendre dans la plupart des cas le déclenchement de l'installation (par niveau très haut).

Pour toutes ces raisons, la régulation du niveau requiert une importance capitale aussi bien pour la bonne marche de la chaudière que pour des raisons de sécurité.

L'utilisation des régulateurs classiques (PID) pour la régulation du niveau s'est avérée inefficace et peu précise surtout en présence des perturbations de grandes amplitudes, et limite l'exploitation de la chaudière à sa capacité optimale.

De même indépendamment de la modélisation d'un système physique par un modèle de Broida ou de Strejc, un temps mort naturel affecte le fonctionnement d'un certain nombre de dispositifs industriels. En plus dans la régulation PID la modélisation d'une fonction de transfert est toujours réalisée autour d'un point de fonctionnement, dans une hypothèse de linéarité locale, mais pour des procédés industriels évoluant en fonction des contraintes variables de fabrication (cas de la chaudière), cette hypothèse n'est plus réaliste.

La présence d'un temps mort, et l'existence de non linéarités, conduisent à des réglages « mous ». Face à des perturbations importantes, le manque de rapidité de la chaîne fermée aboutit à des écarts transitoires préjudiciables à la qualité exigée.

Les limites de performances des régulateurs PID nous ont poussées à chercher d'autres techniques de régulations plus élaborées, plus développées et mieux adaptées à ce genre de procédés.

Notre choix s'est porté sur la commande prédictive généralisée, qui donne des algorithmes de régulation avancées, testés industriellement et qui ont prouvé qu'ils peuvent prendre en charge les aspects commande et régulation avec des performances nettement supérieures à celles des régulateurs classiques.

III.6- Modélisation et identification et validation

Dans cette partie nous présentons un modèle dynamique non linéaire pour des chaudières à ballon, à circulation naturelle. Le modèle décrit la dynamique compliquée du ballon et les composants des faisceaux de vaporisation. Un grand effort a été fourni pour trouver un équilibre entre la fidélité et la simplicité. Le modèle décrit le comportement du système sur une large gamme de fonctionnement.

Il y a des changements considérables dans l'industrie de l'énergie à cause de la nouvelle réglementation très rigoureuse. En conséquence, pour une meilleure adaptation, des changements rapides sont imposés dans l'industrie. Cela mène à des exigences plus strictes sur les systèmes de contrôle des procédés pour que les installations industrielles répondent aux exigences voulues et soient le plus compétitives.

Pour beaucoup de procédés industriels des modèles statiques standards répondent fidèlement à la reproduction de ces procédés à l'état stable, mais il est possible d'obtenir des modèles « boîtes noires » de complexité raisonnable qui décrivent les systèmes en fonction des conditions de fonctionnement spécifiques en utilisant les techniques de l'identification.

Néanmoins ni les modèles statiques ni les modèles de l'identification ne sont convenables pour décrire avec fidélité le contrôle du modèle de base.

Les modèles de reproduction statiques sont assez complexes et ils ne décrivent pas la dynamique du système. Les modèles de la boîte noire sont valables pour les conditions de fonctionnement spécifiques seulement.

Pour cela nous présentons un modèle non linéaire pour les systèmes de production de vapeur, ces derniers sont des parties essentielles et critiques dans la plupart des industries de l'énergie.

Le but est de développer des modèles non linéaires modérément complexes qui décrivent les propriétés dynamiques clés sur une large gamme de fonctionnement, et fournissent des solutions adéquates aux différents problèmes qui peuvent exister, dans notre cas les phénomènes qui causent ces problèmes sont le phénomène de tassement et le phénomène de gonflement.

Le travail présenté ici est basé sur l'étude d'Åstrom, Le travail de ce dernier est un mélange de modélisation physique, identification du système, et simplification du modèle. Les résultats d'expériences de l'identification du système ont indiqué que la dynamique essentielle pourrait être décrite par un modèle simple[21].

III.6.1-Masse global et Equilibres D'énergie

A chaleur Q , Fournier aux faisceaux de vaporisation cause l'ébullition de l'eau qui donne naissance à la vapeur saturée, cette dernière va à son tour provoquer une circulation en boucle dans les faisceaux de vaporisation.

Le débit d'eau alimentaire q_f est fournie au ballon, le débit de la chaleur Q fait chauffer cette eau dans les faisceaux de vaporisation, ainsi la vapeur saturée q_s est prise du ballon vers les équipements de chauffage et/ou aux turbomachines à vapeur.

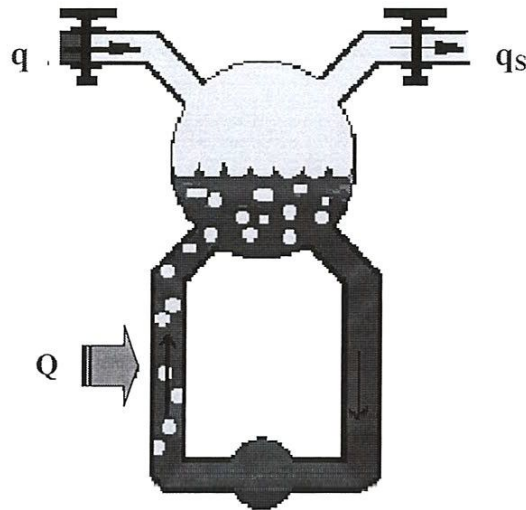


Figure III.4 Représentation schématique de la chaudière

La présence de vapeur en dessous du niveau liquide dans le ballon cause le tassement, par contre le phénomène du gonflement est causé par la présence de la vapeur au-dessus du niveau liquide et cela rend difficile le contrôle de ce dernier.

Dans la réalité le système est beaucoup plus compliqué qu'il est montré dans la figure II.6 par exemple le débit sortant de la vapeur qui passe à travers un séparateur pour séparer la vapeur des gouttelettes d'eau n'est représenté.

Malgré la complexité du système, le comportement peut être décrit par des équations d'équilibres, de masse et d'énergie.

Parmi des propriétés clés des chaudières est qu'il y a un transfert de chaleur très important dû à l'ébullition et à la condensation. L'énergie stockée dans la vapeur d'eau est libérée ou absorbée très rapidement quand des changements de pression subviennent, Ce mécanisme est la clé de la dynamique des chaudières.

La diffusion rapide de l'énergie assure des changements de température dans les différentes parties de la chaudière dans le même sens, pour cette raison la statique peut être décrite par un modèle d'ordre inférieure.

La pression du ballon et le niveau de vapeur ou d'eau peuvent être représentées par une équation de premier ordre.

III.6.2-Equation de l'équilibre de la chaudière

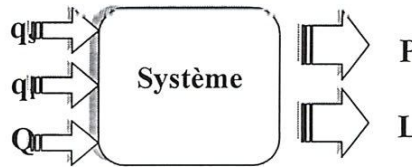
Les comportements du système sont décrits par des équations d'équilibre massique et énergétique.

Les entrées du système sont

- Le taux du flux de la chaleur aux faisceaux de vaporisation Q .
- Le débit de l'eau d'alimentation q_f .
- Le débit de la vapeur q_s .

Les sorties du système sont

- La pression du ballent P
- Le niveau de l'eau dans le Ballon L .



III.7-Identification du modèle de la chaudière

L'identification paramétrique de système est une technique de l'automatique consistant à obtenir un modèle mathématique d'un système à partir de mesures ou pour bien précise on peut dire:

1. Finalité du modèle plus Connaissances a priori:

- ☞ Vérification d'un modèle théorique, réguler un système
- ☞ Lois physiques, mesures, linéaire /non linéaire, intégrateurs, retards, ...

2. Définition des expériences à réaliser, le choix d'un type de modèle et le choix d'une méthode d'identification:

- ☞ Signaux d'entrée, périodes d'échantillonnages, nombre de mesures, Identification. en BO ou BF, en ligne ou hors ligne.
- ☞ AR, ARMA, MA, ...
- ☞ Moindres carrés, Variable instrumentale, ...
- ☞ Signification physique. des paramètres
- ☞ En comparant la sortie mesurée avec la sortie calculée à l'aide du modèle c'est à dire changer les ordres, retards, expériences.

III.7.1- Principe de l'identification

Identifier un système c'est déterminer, à partir des informations dont nous disposons sur les entrées et les sorties de ce système, un modèle mathématique appartenant à une classe de modèle donnée et qui soumis aux mêmes sollicitations que le système initial donne des réponses considérées comme équivalentes compte tenu de nos objectifs de la précision souhaitées.

En pratique l'identification a pour objectif de déterminer la conduite d'un modèle utilisé pour simuler, commander ou régler un processus.

Les imperfections de modélisation et d'identification étant généralement compensées par la boucle de régulation. Ce dernier point rend d'ailleurs l'identification d'un système en boucle fermée plus complexe et souvent moins précise que l'identification en boucle ouverte.

La validation du modèle obtenue par identification est une étape nécessaire.

Les méthodes déterministes d'identification ne tiennent en général pas compte des bruits et par conséquent fournissent difficilement, en particulier pour les systèmes bouclés, une estimation de la précision des paramètres, en particulier pour les systèmes bouclés, une estimation de la précision des paramètres, contrairement aux méthodes statistiques.

Toutefois la mise en œuvre des méthodes statistiques nécessite le plus souvent une modélisation du bruit lui-même et la connaissance de diverses informations statistiques le concernant (moyenne, variance, ...) ce qui en fait un problème complexe que nous ne traitons pas ici.

III.7.2-Modèle ARX

a) Définition

Le modèle ARX (Auto Regressive exogeneous) EST UN modèle auto régressif qui inclut des entrées $u(t)$ ET UN bruit Blanc $\zeta(t)$ de moyenne nulle. De plus, le modèle inclut un retard pur de k coups d'horloge. Si le système est échantillonné à une période d'échantillonnage T , alors le retard sera de $k \cdot T$.

Sous forme temporelle :

$$y(t) = B[u(t - k), u(t - 1 - k), \dots]^T - A[\zeta(t), \zeta(t - 1), \dots] \quad 3.1$$

Dans un espace discret utilisant la Transformée en Z :

Identification et validation

$$y(z) = Z^{-k} \frac{(z^{-1})}{z^{-1}} \quad 3.2$$

Mais la structure du modèle la plus usagée est l'équation différentielle linéaire simple:

$$y(t) + a_1 y(t-1) + \dots + a_{n_a} y(t-n_a) = b_1 u(t-n_k) + \dots + b_{n_b} u(t-n_k-n_b+1) + e(t) \quad 3.3$$

La structure est donc définie par trois nombres entiers: n_a , n_b et n_k

Où

n_a : Égale au nombre des pôles

n_b : Égale au nombre des zéros

Cependant que n_k est le temps mort du système et représente le retard.

Pour les systèmes de contrôle échantillonnés, typiquement n_k est égale à 1 s'il n'y a pas temps mort.

Une représentation polynomiale de l'équation précédente et donnée par :

$$A(q) y(t) = B(q) u(t-n_k) + e(k) \quad 3.4$$

Avec

$$t = 1, 2, \dots, n \quad 3.5$$

Où

$$A(q) = 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_{n_a} q^{-n_a} \quad 3.6$$

$$B(q) = b_1 + b_2 q^{-1} + \dots + b_{n_b} q^{-n_b+1} \quad 3.7$$

b) Validation

Généralement, la validation est l'ensemble des activités de vérification dans le but de confirmer une hypothèse, un travail, une théorie, un mode de fabrication, etc.

Une validation dépend du cadre que l'on se donne (des critères) et se fait toujours en fonction de celui-ci.

Si on prend la fonction de transfert de modèle mathématique (chaudière).

$$A(q) = 1 - 1,934q^{-1} + 0,9337q^{-1} \quad 3.8$$

$$B(q) = -0,0001139q^{-1} + 0,0001196q^{-1}$$

Avec :

$n_a = 2$; $n_b = 2$; $n_k = 1$ (choisit comme des valeurs pour stabiliser le système).

Donc :

En remplaçant $A(q)$ et $B(q)$ dans l'équation (3.4) nous obtenons :

$$Y(t) = 1,934 y(t-1) - 0,9337 y(t-2) - 0,0001139 u(t-2) + 0,0001196 u(t-3) + e(t)$$

La fonction de transfert:

$$G(z) = \frac{y(z)}{u(z)} = \frac{B(z)}{A(z)}$$
$$G(z) = \frac{-0.0001139z^{-1} + 0.0001196z^{-2}}{1 - 1.934z^{-1} + 0.9337z^{-2}}$$

III.8- Conclusion

Après identification du modèle mathématique, on le réduit en un système mono-entrée; (SISO). Donc, l'excitation du débit eau alimentaire représente l'entrée du système et le niveau d'eau dans le ballon désigne la sortie.

Nous aurions pu bien sûr, choisir plusieurs entrées et sorties si nous considérons le système multi-entrées ; multi-sorties (MIMO) dans son ensemble.

Le résultat de la validation ($G(Z)$) du système SISO sera utilisé comme la fonction de transfert du système pour la commande du niveau d'eau du ballon de la chaudière.

Chapitre -IV-

Résultats et Discussions

IV.1 introduction

Après avoir étudié l'MPC, nous allons l'appliquer sur la régulation du niveau de ballon de la chaudière.

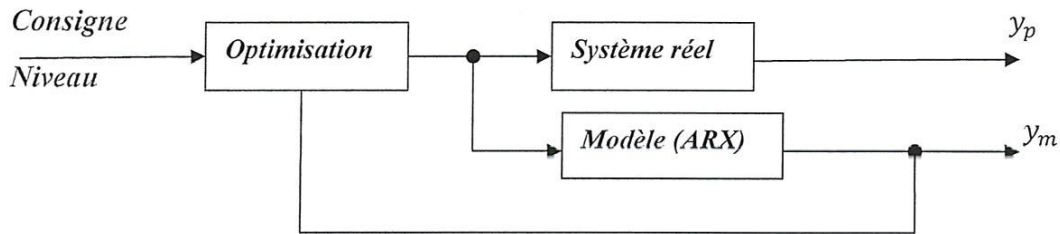


Figure IV.1 Schéma global de l'MPC appliqué

Pour avoir cette régulation nous simulons avec le « MATLAB » la fonction de transfert obtenue après validation du modèle dans le chapitre précédent.

On met tons la fonction de transfert après que nous l'avons extrait dans l'identification du modèle mathématique (modèle ARX), nous l'admettons comme la fonction de transfert du modèle et du système réel pour cette but on utilise deux façon la régulation avec contraintes et la commande prédictive on poursuit.

La Réponse indicielle du système est montrée dans la figure IV.2

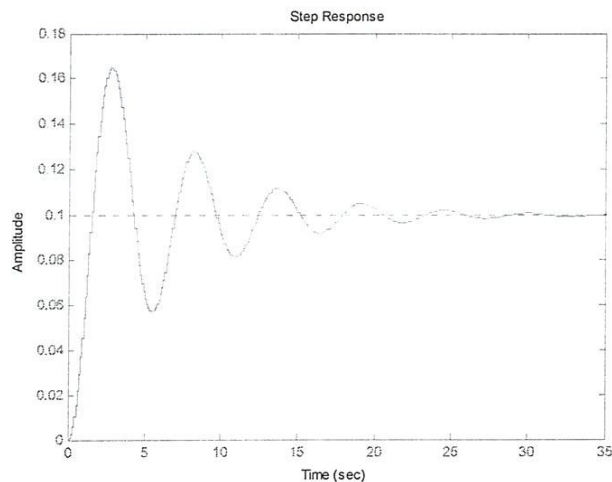


Figure IV.2 la réponse indicielle du système

Résultats et discussions

La réponse indicielle du système est donnée en figure IV. Le temps de réponse à 5% est de 99.1706 s, dépassement de 65.3% le gain statique 0.1, temps monté est 12.89 s et temps 1^{er} dépassement est 13.5 s.

IV.2. Régulation prédictive avec contraintes du niveau d'eau la chaudière

a) Régulation prédictive sans bruit à l'entrée

Dans la première partie de la régulation on boucle fermé on va étudier l'entrée sans perturbation et avec les paramètres qui nous avons choisis pour stabiliser la sortie (y) on va obtenir les résultats de la simulation du command MPC avec contraintes.

Les paramètres choisis sont ($H_p = 10, H_u = 1, T_{ref} = 0.6 \text{ sec}, T_s = 0.1 \text{ sec}$)

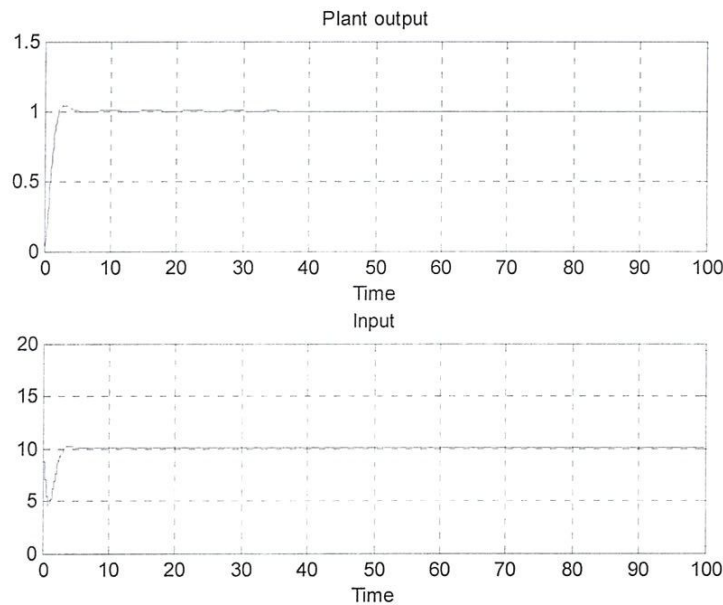


Figure IV.3 – Régulation prédictive sans bruit à l'entrée

On remarque que la sortie de système (y) essaye de suivre de la consigne (s) et l'erreur de prédiction très petit et moins important ça que signifier les systèmes sans bruit, l'entrée de système après une courte de temps devient stable.

b) L'Effet de l'horizon de prédiction sur l'MPC

Dans cette partie, nous changeons l'horizon pour pouvoir vérifier l'influence de ce paramètre sur la commande MPC nous choisissons pour H_p les valeurs suivantes: 5, 8, 11, 14. Les résultats obtenus sont montrés dans les figures suivantes.

Résultats et discussions

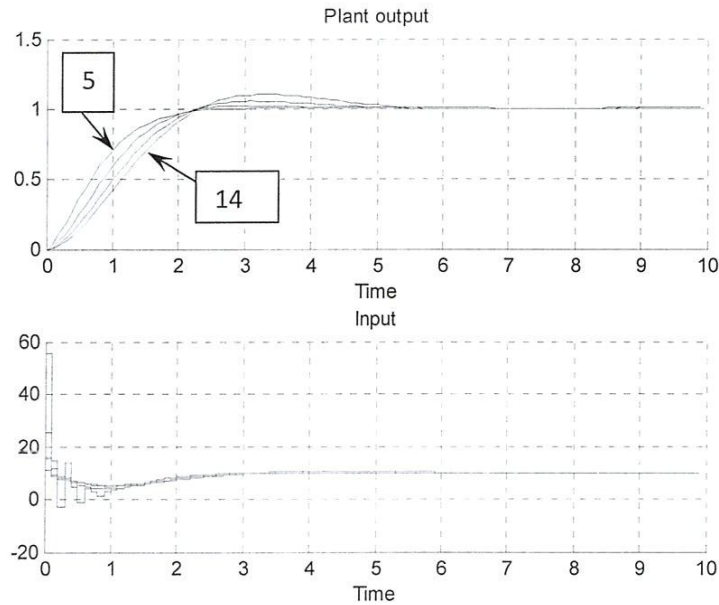


Figure IV.4- L'Effet de l'horizon de prédiction sur l'MPC

On remarque que le changement de l'horizon affectera le dépassement de la réponse du système, mais elle suit toujours ce dernier, l'entrée de système après une longue de temps devient stable. On remarque aussi que le choix de l'horizon de prédiction est très important pour obtenir des meilleurs résultats. Ce paramètre peut être choisis empiriques, mais si les comportements du système est déjà connu on peut le choisis à partir des paramètres du système.

c) Régulation prédictive avec perturbation sur la commande

On remarque que la sortie de système (y) essaye de suivre de la consigne (s) et l'erreur de prédiction est après un certain temps jusqu'à ce qu'elle devienne inexistante,

Résultats et discussions

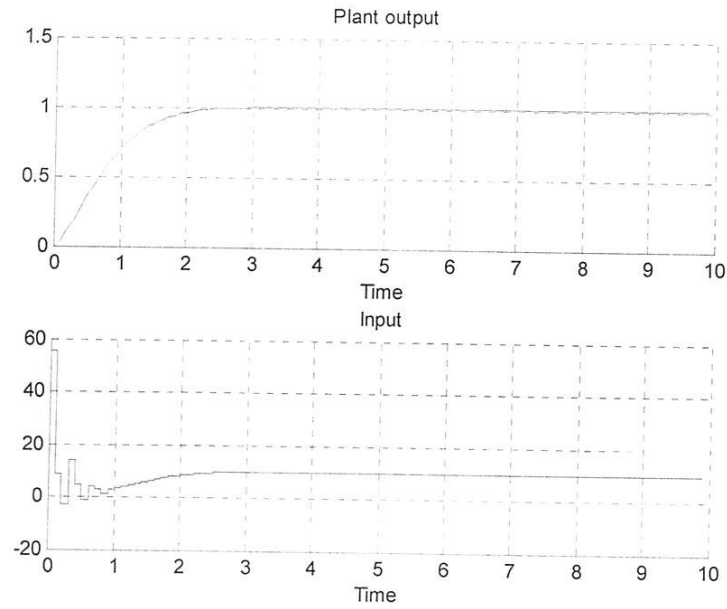


Figure IV.5- Régulation prédictive avec perturbation sur la commande

d) Régulation prédictive de niveau d'eau avec perturbation à la sortie

Dans cette partie avec le même paramètre on applique à la sortie du système une perturbation injectée à l'instant $t=50$ sec

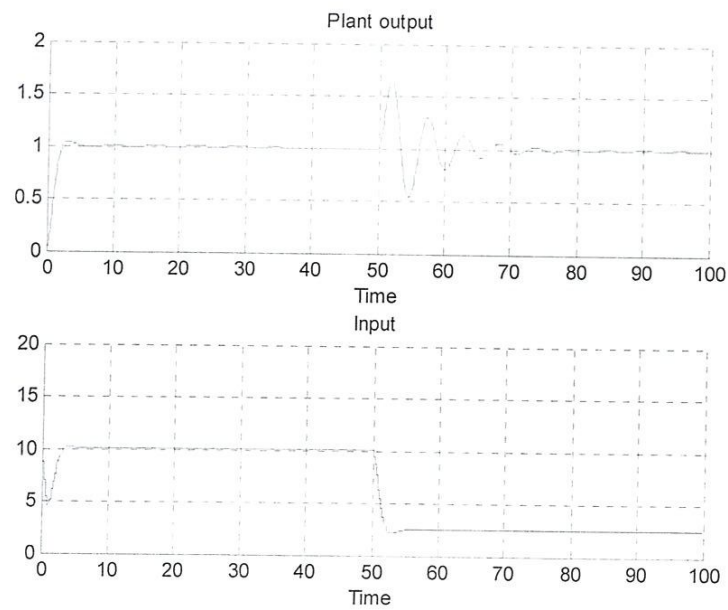


Figure VI.6- Régulation prédictive de niveau d'eau avec perturbation à la sortie

Résultats et discussions

D'abord on remarque que la sortie de système (y) essaye de suivre de la consigne (s) et l'erreur de prédiction très petit et moins important jusqu'à l'instant $t=50$ le signal varie Pour une période de temps est retour stable, l'entrée de système après une courte de temps devient stable jusqu'à $t=50$ le signal varie et encore une fois retour stabilité.

e) Régulation prédictive en cas ou le model ne respecte pas le processus

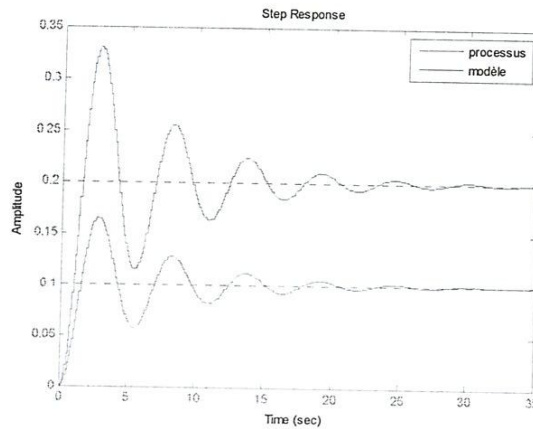


Figure IV.7- la réponse indiciel du modèle et le processus

La commande du système avec ce modèle dans ce cas là, donne les résultats montrées dans la figure IV.8.

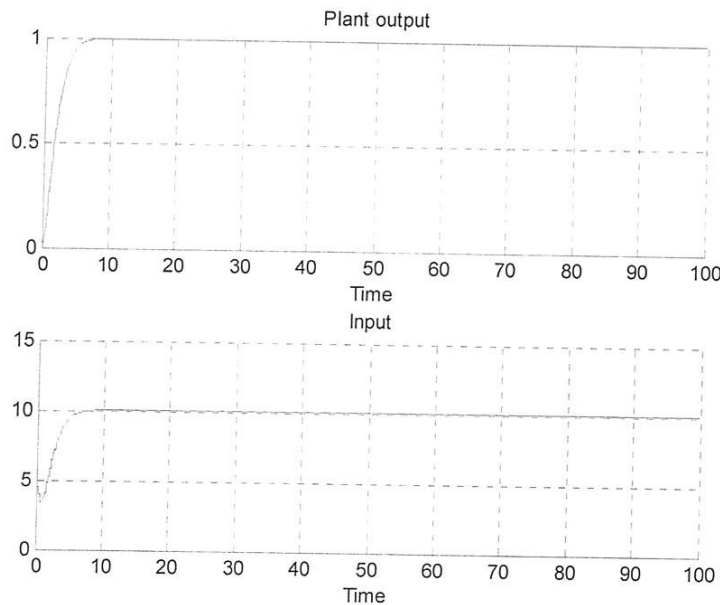


Figure IV.8- La commande du système avec ce modèle

Résultats et discussions

Bien que le modèle diffère avec le processus mais la sortie de système (y) essaye de suivre de la consigne (s) et l'erreur de prédiction très petit et moins important ça que signifier les systèmes sans bruit, l'entrée de système après une courte de temps devient stable.

IV.3. Commande prédictive en poursuite du niveau d'eau

a) Commande prédictive en poursuite du niveau d'eau sans bruit à l'entrée

Dans cette partie on va voir le changement du niveau si on applique la MPC en poursuite avec une perturbation à l'entrée et avec un changement de l'incrémental et les autres valeurs restent constantes on trouve les résultats suivants :

Les paramètres utilisés dans cette partie sont : ($H_p = 10, H_u = 1, T_{ref} = 0.6 \text{ sec}, T_s = 0.1 \text{ sec}$)

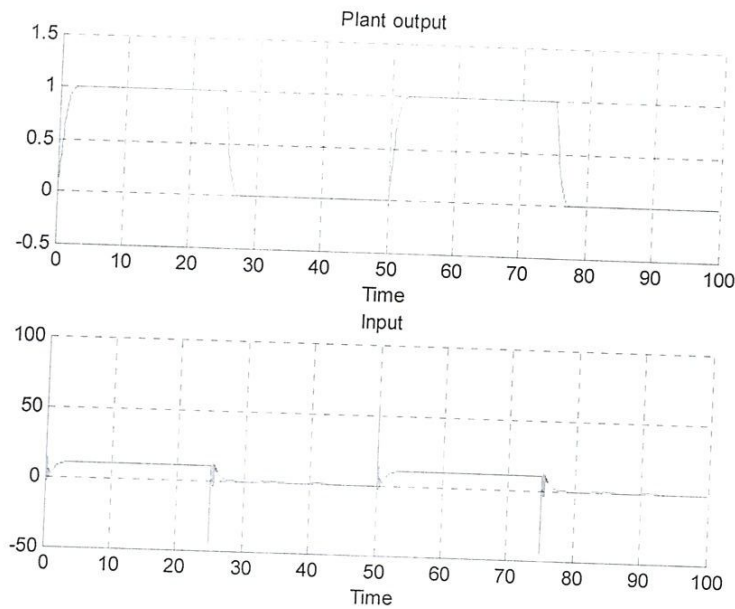


Figure IV.9- Commande prédictive en poursuite du niveau d'eau sans bruit à l'entrée

Au début on voit que le signal de sortie suit la consigne mais après un temps le signal varie et l'entrée de système au début reste d'abord stable mais après un temps le signal varie comme la sortie.

b) Poursuite de La commande avec un modèle différent du système

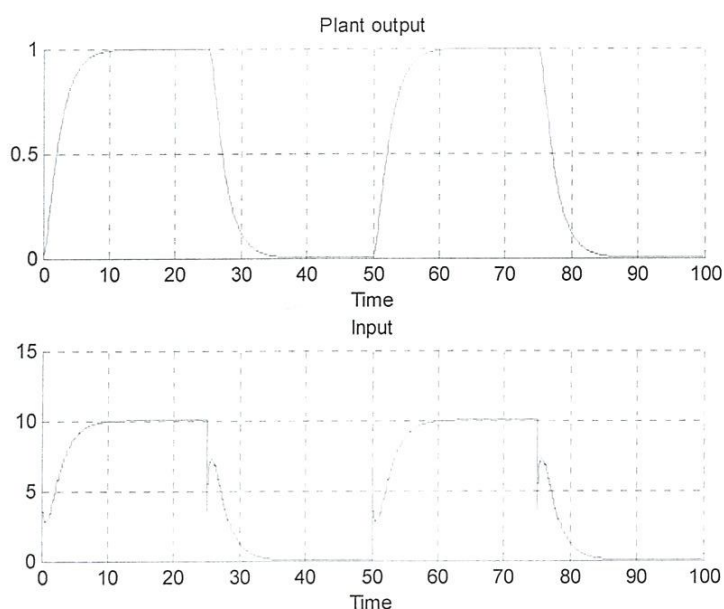


Figure IV.10- Poursuite de La commande avec un modèle différent du système

Au début on voit que le signal de sortie suit la consigne malgré que le fonction de modèle

IV.4- Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié deux sortes d'application. Dans la première application nous avons appliqué la régulation prédictive avec contrainte. Bruit et non bruit, perturbée à l'entrée et la sortie, changement le horizon et même le modèle différenciant le processus.

Dans la deuxième application nous avons appliqué la commande prédictive en poursuite dans les deux cas présentées ont montrés des résultats très satisfaites.

La mise en œuvre de la MPC, nous a donné des résultats très satisfaisants, qui nous, permettent d'affirmer que cette technique de commande est très adaptée pour le réglage du niveau du ballon dans la chaudière

Conclusion Générale

Conclusion générale

Au début de notre mémoire pour régler le niveau d'une chaudière à ballon, nous avons proposé la Commande prédictive en remplacement des régulateurs PID, qui représentent des limitations et des insuffisances par rapport à ce que nous attendons pour le réglage de ce paramètre clé.

Pour atteindre cet objectif, nous avons tout d'abord fait une étude sur le principe de la commande prédictive à modèle sans contraintes du système de notre étude. Cependant avant l'application de cette méthode, les valeurs des paramètres de synthèse doivent être bien choisis (N_1, N_2, N_U, λ) afin d'assurer les performances désirées et respecter les contraintes imposées.

Nous avons déterminé la fonction de transfert utilisée pour la commande, en ayant pris des résultats de simulation comme données pour identifier le modèle de la chaudière. La simulation de l'application de la commande prédictive à modèle nous a donné un bon contrôle des éléments désirés, qui se manifestent dans la chaudière.

La mise en œuvre de la MPC, nous a donné des résultats très satisfaisants, qui nous permettent d'affirmer que cette technique de commande est très adaptée pour le réglage du niveau du ballon dans la chaudière ; puisque aux différentes perturbations et sollicitations sur le niveau, la commande agit dans le sens désiré, chose que nous ne rencontrons pas avec les régulateurs classiques.

Donc à la fin de notre mémoire on peut dire que la commande prédictive à modèle reste jusqu'à ce jour un thème de recherche très important.

Bibliographie

- [1] Commande prédictive : wikipédia
- [2] Richalet, J. & al (1976), 'Algorithmic Control of Industrial Processes', In proceeding of the 4th IFAC Symposium on Identification and System Parameter Estimation, Tbilisi.
- [3] Cutler, C. R. & Ramaker, B. L. (1980), 'Dynamic Matrix Control (DMC): Computer Control Algorithm', Proc. IEEE, San Francisco USA 122 (9), 920-934
- [4] Propoi A.I, Use of linear programming methods for synthesizing sampled-data automatic systems, Automn. Remote Control, Vol. 24, No. 7, pp. 837_844, 1963.
- [5] Ydstie, B. E. (1984), 'Extended Horizon Adaptive Control (EHAC)', In Proceeding of the 9th IFAC World Congress-Budapest-Hungary pp. 911-915.
- [6] De Keyser, R. M. C. & al, A. (1985), 'Extended Prediction Self-Adaptive Control (EPSAC)', In Proceedings of the 7th IFAC Symposium on Identification and System Parameter Estimation. Invited Session on applications of Adaptive and Self tuning Control
- [7] Clarke. D. LI. & al (1987), 'Generalized Predictive Control. Part I: The basic algorithm. Part 2: Extensions and Interpretations', Automatica 23(2)? 137-160.
- [8] Commande prédictive par Jacques Richalet (Directeur Société Adersa)
- [9] La commande prédictive (Editions Eyrolles)
- [10] Commande prédictive : Note De Cours Options Procédé Environnement Ecole centrale Paris 2005- 2006
- [11] locomotive à vapeur :wikipédia
- [12] Identification du système : wikipédia
- [13] Agachi, P., Nagy, Z., Cristea, M. et Lucaci, A. (2006). Model Based Control: Case Studies in Process Engineering. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
- [14] Bemporad, A. et Morari, M. (1999). Robust model predictive control: A survey. In Robustness in Identification and Control, Lecture Notes in Control and Information Sciences, Vol. 245:pp. 207–226
- [15] Camille et Maciejowski, J. (2000). Robust finite horizon MPC without terminal constraints. In Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control, Vol.1:pp. 166–171. 3.7.3

- [16] Dufour, P. (2000). Contribution à la commande prédictive des systèmes à paramètres repartis non linéaires. Thèse de doctorat, UNIVERSITÉ CLAUDE BERNARD - LYON1 département de Génie Electrique et des Procédés. 3.7.4
- [17] Boucher, P. et Dumur, D. (1996). La commande prédictive. Collection Méthodes et pratiques de l'ingénieur, Editions Technique, Paris. 3.7.4, 3.8
- [18] Richalet, J., G. Lavielle, G. et Mallet, J. (2005). La commande prédictive. Mise en œuvre et applications industrielles. Groupe Eyrolles, Paris. 3.7.4
- [19] Campo, P. J. et Morari, M. (1986). ∞ -norm formulation of model predictive control problems. Proceedings of the American Control Conference, Seattle, pages. 339-343.
- [20] Chaudière à vapeur (documents GLIK-SKIKDA)
- [21] Thème Commandes prédictive généralisée d'un Processus Industriel