

878

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 d'Electronique et Télécommunications



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



Domaine : **Sciences et Technologie**
Filière : **Electronique**
Spécialité : **Systèmes Electroniques**

**Commande prédictive généralisée
De flux d'huile dans un réacteur chimique**

Présenté par :

**YEBBOUS MOHAMED
BOUDRAA AMINE**

Sous la direction de :

Dr. BOUDJEHEM- DJALIL

Juin 2015

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier mon DIEU LE TOUT PUISSANT,
Je remercie Monsieur boudjehem- jalil docteur au Département d'Electronique à
L'Université de gualma. Je tiens à le remercier pour m' avoir encadré et en particulier pour
son Soutient, son conseil et sa patience. Son expérience et sa connaissance ont contribué à ma
formation Scientifique.

Je remercie tous les enseignants au Département d' Electronique à L'Université de gualma
Je le remercier pour son orientation, son disponibilité, son écoute et son patience pendant
les trois années d'études

Mes remerciements aussi à mes amis :

AMINE, ABDRAHMENE, MOHAMED ? YUCEF Derbani, YUCEF BOUSAGAA,
FATEH, LAZHAR, ABD ELMOUMENE RAMZI HAM dèche ; Pour leur soutien et la
patience qu' elles ont montré pendant les phases difficile d'étude.

Ma mère ; mes sœurs, mes frères, et toute la famille ; les mots ne suffisent pas :

je vous adore,

Je remercie également tous ceux qui m' ont soutenu de près ou de loin durant ces dernières
Années.



Mohamed

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier mon DIEU LE TOUT PUISSANT,

Je remercié Monsieur boudjehem- jalil docteur au Département d'Electronique à

L'Université de gualma. Je tiens à le remercier pour m' avoir encadré et en particulier pour son Soutient, son conseil et sa patience. Son expérience et sa connaissance ont contribué à ma formation Scientifique.

Je remercie tous les enseignants au Département d' Electronique à L'Université de gualma Je le remercier pour son orientation, son disponibilité, son écoute et son patience pendant les trois années d'études

Mon remerciement aussi à mes amies :

AMINE, ABDRAHMENE, MOHAMED ? YOUCEF Derbani, YOUCEF BOUSAGAA, FATEH, LAZHAR, ABD ELMOUMENE RAMZI HAM dèche ; Pour leur soutien et la patience qu' elles ont montré pendant les phases difficile d'étude.

Mamère ; messœurs, mes frères, et tout la famille ; les mots ne suffisent pas :

Je vous adore,

Je remercie également tous ceux qui m' ont soutenu de près ou de loin durant ces dernières Années.

Amine

Résumé

Ce travail consiste à présenter la méthodologie de la commande prédictive qui se base surtout sur le modèle de prédiction et la fonction objective pour calculer la commande optimale.

La techniques de commande prédictive a été étudiée et appliquée une analyse d'évaluation des performances de cette technique de commande et leurs applications aux processus industriels a été traité afin de montrer l'efficacité de cette technique.

Les résultats de simulation ont montrées les avantages de ces techniques en termes de rapidité, et de rejection de perturbation ainsi que la minimisation de l'écart entre la sortie prédite et la trajectoire de référence.

Abstract

In this work, we present the methodology of predictive control, which is mainly based on the prediction model and the objective function to calculate the optimal control.

The predictive control technology has been studied and applied. A benchmarking analysis of this control technique and their applications to industrial process has been processed to show the effectiveness of this technique.

Simulation results have shown the advantages of these techniques in speed, and disturbance rejection as well as minimizing the difference between the predicted output and the reference trajectory.

ملخص

هذا العمل يتعلق بتقديم منهجية الرقابة التنبؤية ، وتستند هذه الاستراتيجية بشكل رئيسي على نموذج التنبؤ ووظيفة الهدف أو معادلة الكلفة في حساب التحكم الأمثل. وقد تم دراسة طريقة الرقابة التنبؤية وتطبيقها على أنظمة ذات درجات مختلفة

الطريقة هي التحكم المعمم التنبؤي في واهتمنا عند تطبيق هذه التقنية هو تقييم أداءها من حيث. التحكم وعلى مستوى المخارج وذلك بتطبيقها على أنظمة صناعية متنوعة وقد تم إجراء دراسة فيما يتعلق بسرعة التخلص من الاضطرابات التي تحدث أثناء عملا لأنظمة وكذا فيما يخص تتبع المسار المرجعي وتقليص الفارق بينه وبين المخرجات التنبؤي وتعتبر النتائج المتحصلا عليها قيمة للغاية وأكثر فعالية

Liste des abréviations

GPC	Generalized Predictive Control
MPC	Model Predictive Control
SISO	Single Input Single Output
CARIMA	Controlled Autoregressive Integrated Moving Average
GMV	Generalized Minimum Variance
PBSTC	predictor-Based Self-Tuning Control de Peterka
EHAC	Extended Horizon Adaptive Control
UPC	(Unified Predictive Control).
EPSAC	Extended Prediction Self Adaptive Control
DMC	Dynamic Matrix Control
CARMA	Controlled Autoregressive Moving Average

Nomenclature

Paramètres de la commande GPC

$y(t)$: La sortie du modèle.

$u(t)$: La commande appliquée au système.

g_j : Les coefficients de la réponse indicielle.

$\Delta u(t - 1)$: L'incrément de commande.

$\hat{y}(t + k/t)$: La sortie prédite.

$f(t + k)$: La sortie libre.

p : est nommé l'horizon de prédiction et on prend m l'horizon de commande

p_1 : Horizon de prédiction minimal

$p_2 = p$: Horizon de prédiction maximal

m : Horizon de commande

G : Matrices dynamiques

T_e : La période d'échantillonnage.

k : Temps discret.

q^{-1} : Opérateur retard

$A(q^{-1})$: Polynôme de degré n_a .

$B(q^{-1})$: Polynôme de degré n_b .

$x(t)$: terme lié aux perturbations

$C(q^{-1})$: Polynôme de degré n_c .

$\xi(t)$: Séquence aléatoire non corrélée centrée.

$\Delta(q^{-1})$: L'opérateur de différentiation qui égale : $\Delta(q^{-1})=1-q^{-1}$

$E_j(q^{-1})$: Un polynôme de degré $(j - 1)$.

$F_j(q^{-1})$: Un polynôme de degré (n_a) .

$G_j(q^{-1})$: Un polynôme de degré $(j - 1)$

$G'_j(q^{-1})$: Un polynôme de degré (n_g')

$n_r = d$: le retard.

W : La trajectoire de référence.

J : Critère quadratique de performance.

λ : Coefficient de pondération de commande.

Sommaire :

Introduction Générale.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre 01 La Commande Prédictive.

1.1. Introduction	3
1.2. La commande prédictive	4
1.3. Aperçu Historique Sur La Commande Prédictive.....	5
1.4. Principe et Ingrédients Fondamentaux de La Commande Prédictive	6
1.5. Schéma Fonctionnelle de Commande Prédictive	7
1.6. La Stratégie de La Commande Prédictive	8
1.7. Principe Générale de la Commande Prédictive	9
1.7.1. Généralité :	9
1.7.2. Fonctionnement	10
1.8. Modélisation du système	11
1. 9. Les Avantages Et Inconvénients	12
1.9.1. Les Avantages	12
1.9.2. Les Inconvénients	14
1.10. Conclusion	15

Chapitre 02 Commande prédictive généralisé.

2.1. Introduction	17
2.2. Commande prédictive	17
2.3. Commande prédictive généralisée (G.P.C.)	18
2. 3.1. Principe de fonctionnement de la commande prédictive généralisée.....	19
2.3.2. Modèle de représentation	20
2.3.3. Expression du critère	21
2.3.4. Choix des paramètres du GPC	22
2. 3.5. Prédicteur optimal sous forme matricielle	23

2.3.6. Critère quadratique matriciel	24
2.3.7. Minimisation de la fonction de coût	25
2.4. Le principe de l'horizon fuyant	25
2.4.1. Modèle CARIMA du processus et prédiction de sortie	26
2.4.2. Développement de prédicteur et résolution des équations Diophantiennes	26
2.4.3. Critère d'optimisation et obtention de commande	30
2.4.4. Exemple	31
2.4.4.1. Réponse indicielle de processus	34
2.4.4.2 W(t) est un signal care	36
2.5. Conclusion	38

Chapitre 03 : Application et Résultat de Simulation.

3.1. Introduction	40
3.2. La commande de flux	40
3.3 La Commande prédictive généralisée (GPC) du flux d'huile	45
3.3.1 L'effet de l'horizon de prédiction sur la commande GPC	46
3.3.2 L'effet du facteur de pondération λ sur la commande GPC.....	48
3.4 Regret de Perturbation	50
3.5. Commande de système avec la présence du bruit	51
3.6. Conclusion	52
Conclusion générale.....	54

Liste des figures

Figure (1.1) Schéma fonctionnelle de la commande prédictive.....	8
Figure (1.2) Le principe de la commande prédictive.....	10
Figure (1.3) structure de base de la commande prédictive.....	11
Figure (2.1) philosophie de la commande prédictive	18
Figure (2.2) schéma de principe de GPC.....	19.
Figure(2.3) représentation temporelle du principe de la commande prédictive.....	20
Figure (2.4) model CARIMA.....	21
Figure (2.5) valcur de N_1 et de N_2 pour un système de phase non nominal.....	22
Figure (2.6) Réponse indicielle de processus.....	34
Figure (2.7) L'effet de l'horizon de prédiction sur la sortie et commande prédite	35
Figure (2.8) L'effet de l'horizon de commande sur la sortie Et la commande prédite commande prédite.....	36
Figure (2.9.a, b) L'effet de l'horizon de prédiction sur la commande GPC.....	37
Figure (2.9.c, d) L'effet de l'horizon de prédiction sur la commande GPC.....	37
Figure (2.10) L'effet de l'horizon de commande sur GPC.....	48
Figure (3.1) Les boucles de commande qui régissent le réacteur de pyrolyse.....	41

Figure (3.2) Régulateur de débit.....	41
Figure. (3.3) Régulateur de débit d'huile.....	44
Figure (3.4) réponse indiciel du système.....	46
Figure (3.5 .a), (3.5 .b) L'effet de l'horizon de prédiction.....	47
Figure (3.6) L'effet du facteur de pondération λ	49
Figure (3.7) rejet de perturbation par le GPC.....	50
Figure (3.8) commande du système avec la présence du bruit.....	52

Introduction général

Actuellement, avec les progrès observés dans le domaine des ordinateurs numériques, il est presque impossible de trouver un secteur de l'activité humaine qui ne soit touché par ce phénomène.

La conception de la commande, n'a pas arrêté à ce mouvement. Cependant il change rapidement avec la mise au point qui se produit dans le domaine numérique, en particulier avec la croissance de la capacité de calcul qui est accompagnée, en outre, la réduction des coûts.

L'emploi de l'ordinateur dans les processus de commande a permis l'implantation de techniques compliquées et sophistiquées qui permettent le développement de stratégies efficaces tout en respectant un coût raisonnable, ce qui était pratiquement impossible d'envisager avec les mécanismes et les dispositifs précédents. Des exemples de telles techniques incluent la commande non linéaire, la commande multivariable, la commande robuste, et la commande optimale.

La commande prédictive à base du modèle (Spécialement Commande Prédictive Généralisée) connue plus simplement comme commande prédictive, doit aussi son origine et son développement à l'emploi de l'ordinateur dans les processus de commande.

La GPC est une technique de commande avancée qui a été intensivement étudiée par la communauté des chercheurs, ces dernières décennies. La raison peut être attribuée au fait qu'elle permet d'inclure de manière explicite des restrictions sur les variables du système dans l'étape de calcul de la loi commande ou de la conception du contrôleur.

Grâce à ses concepts intuitifs et aux bons résultats obtenus, la commande prédictive a été implantée dans un grand nombre d'applications industrielles, parmi lesquelles il faut noter les processus chimiques, qui ont été les premiers à utiliser ce type de commande, les processus de distillation, l'industrie pétrolière et les systèmes électromécaniques tels que la commande d'axes de robot.

Ces applications industrielles ont toutes un dénominateur commun : la connaissance de la trajectoire à suivre par le système dans le futur, au moins sur un

certain horizon. La commande prédictive peut être appliquée aux systèmes multivariables et permet de contrôler un grand nombre de processus (instables, à retard pur, à non minimum de phase).

Dans notre travail on va présenter la commande prédictive généralisée. Ainsi que son philosophie, principe avantages et inconvénients.

Une application sur la commande du flux d'huile dans un réacteur chimique est aussi employée. Les résultats obtenus montrent l'efficacité de l'utilisation du GPC. En revanche, on a étudié l'influence de quelques paramètres sur la commande prédictive.

Ce travail est devisé en trois chapitres qui sont décrits brièvement dans la suite.

Chapitre 1 présente la commande prédictive.

Chapitre 2 présente la commande prédictive généraliser avec un exemple.

Chapitre 3 présentes l'application de la commande prédictive généralisée de flux dans un réacteur chimique



CHPITRE01 :

LA COMMANDE
PRÉDICTIVE

1.1. Introduction :

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

Mais ces systèmes de commandes (régulateur, correcteurs,.....) ne couvrent pas tous les besoins et ses performances s'essouffent 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 à 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 installé "capteur, actionneur" il suffit, sans étude préalable, de fixer quelques valeurs de paramètres, sans grande réflexion ou difficulté particulière, et qu'un essai expérimental suffit, l'automatique est alors l'affaire des réglés. 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 favorisé 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 à des organes purement Analogiques, a également considérablement facilité l'introduction de ces méthodes de commande à 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.

Le prédicteur Smith à compensation de retard utilise également un modèle, mais il ne fait pas de prédiction du futur.

1.2. La commande prédictive :

La commande prédictive (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 comportement futur du procédé. La commande prédictive fait partie des techniques de contrôle à modèle interne (IMC:internal model control.)

En anglais on utilise le terme MPC ou MBPC pour qualifier la commande prédictive : Model (Based) Prédictive control. Cette méthode a été née à la fin des années 1970 et s'est considérablement développée, 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 des 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.

1.3. Aperçu Historique Sur La Commande Prédictive :

Dès la fin des années 1970, de nombreux articles montraient déjà l'intérêt de la commande prédictive dans l'industrie. Les publications de Richalet et al. [6] Présentaient la commande prédictive dite heuristique (MPHC ou Model prédictive 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 cutler et ramakter [10] présentaient la commande matricielle dynamique (DMC ou Dynamique Matrix Control en anglais). Les deux algorithmes utilisaient explicitement le model 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 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 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 a lui propose en 1963 par Propoi 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 mono variable dans le formalisme des fonctions de transfert. On citera entre autre la commande PBSTC (predictor-Based Self-Tuning Control de Peterka); son principe est de minimiser, pour les valeurs predictes 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 Ydstie 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 Prédiction Self Adaptive Control) de De Keyser et al. 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 Clarke et al. En 1987 est également apparue dans ce contexte. Cette commande applique des idées de la commande GMV (Generalized Minimum Variance) et sans doute la plus populaire actuellement. Elle est technique considérée dans le reste de ce travail de chapitre et elle est bien détaillée dans le paragraphe (1-4). De nombreuses autres formulations de correcteurs prédictifs se basent sur ces idées. On trouve entre autres la commande PFC (Predictive 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).

1.4. Principe et Ingrédients Fondamentaux de La Commande Prédictive :

Par expérience, on sait que telle 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 due qu'à 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.

1.5. Schéma Fonctionnelle de base d'un système de 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 ce mémoire.

Il s'agit de réguler le processus P1 soumis à une perturbation mesurée DVm et a une perturbation non mesurée DVnm.

Le régulateur R contient les modèles internes M1 et M2 des processus P1 et P2.

M_1 et M_2 sont des modèles identifiés, éventuellement variables dans le temps, implantés et utilisés en temps réel dans le calculateur de commande.

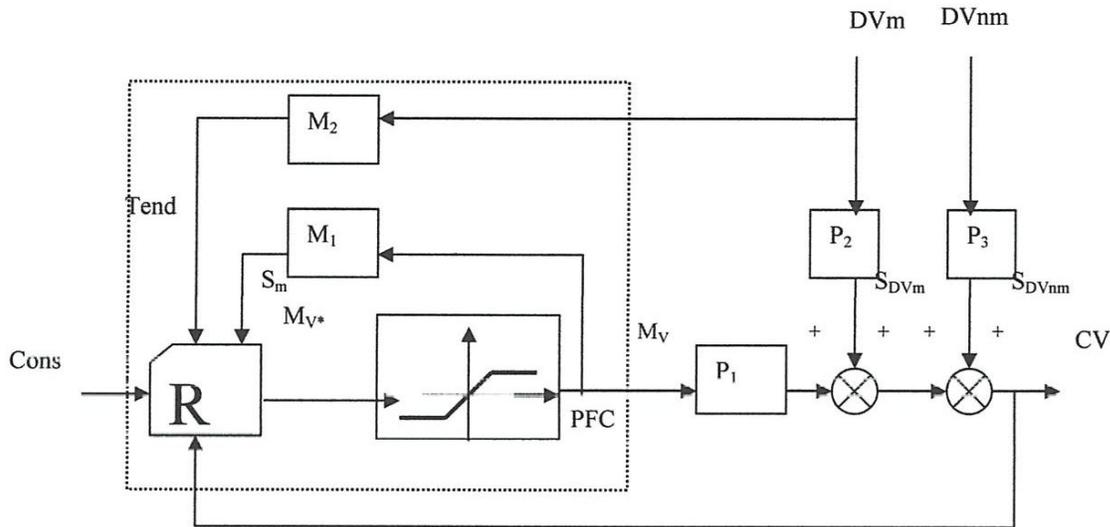


Figure (1.1)- Schéma fonctionnelle de la commande prédictive

La variable manipulée M_{V^*} , calculée par le régulateur est passée à travers un limiteur dont la sortie physique M_V attaque le processus P_1 et constitue l'entrée du modèle interne M_1 du régulateur.

La consigne à l'entrée du régulateur PFC est $Cons$. $Tend$ est un signal pris en tendance ; alors que les variables S_m et S_{DVm} sont les sorties mesurées des processus M_1 et P_2 , tandis que la perturbation D_{Vnm} et sa sortie S_{DVnm} ne sont pas mesurées. Nous utiliserons en permanence la dénomination internationale M_V pour la variable manipulée ; C_V pour la variable régulée et D_V pour les perturbations.

Nous nous intéressons ici qu'aux processus mono variables (une $M_V/1C_V$) qui sont les plus fréquemment rencontrés dans l'industrie.

1.6. La Stratégie de La Commande Prédictive :

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 à 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 situé dans le futur sur la trajectoire de référence est utilisé comme consigne pour le PID, les différences entre les deux stratégies sont moins grandes.

1. 7. Principe Générale de la Commande Prédictive :

1.7.1. Généralité :

La commande prédictive peut être utilisée pour commander des systèmes complexes comportant plusieurs entrées et sorties ou le simple régulateur PID est insuffisant.

Cette technique est particulièrement intéressante lorsque les systèmes possèdent des retards importants, des réponses inverses et de nombreuses perturbations. Les principaux utilisateurs de la commande prédictive sont les raffineries de pétroles, l'industrie chimique et agro-alimentaire, la métallurgie, l'aérospatiale...

Les principaux avantages de la commande prédictive sont les suivants :

- 1- L'idée générale est intuitive et facile à comprendre
- 2- Permet de respecter les contraintes sur les variables contrôlées et manipulées.
- 3- Evite des variations excessives sur les variables manipulées, la commande est plus douce. Cela permet une meilleure utilisation des actionneurs (vérins, vannes, moteurs) et leur temps de vie est ainsi augmenté.
- 4- En cas de perturbations mesurables, le système s'adapte automatiquement.

5- Permet en général un réel gain économique.

La commande prédictive est un terme général qui englobe de méthodes différentes (PFC, DMC, GPC, EPSAC, NLPC ...). Néanmoins, toutes ces techniques utilisent la même philosophie de contrôle et le principe de fonctionnement est le même.

1.7.2. Fonctionnement :

La commande prédictive réalise à chaque période d'échantillonnage du contrôleur les mêmes étapes :

Calcul des prédictions des variables contrôlées jusqu'à un horizon de temps N_2 grâce au modèle interne.

- Elaboration d'une trajectoire de référence à suivre
- Calcul de la future loi de commande à appliquer sur les variables manipulées jusqu'à un horizon temporel N_u .

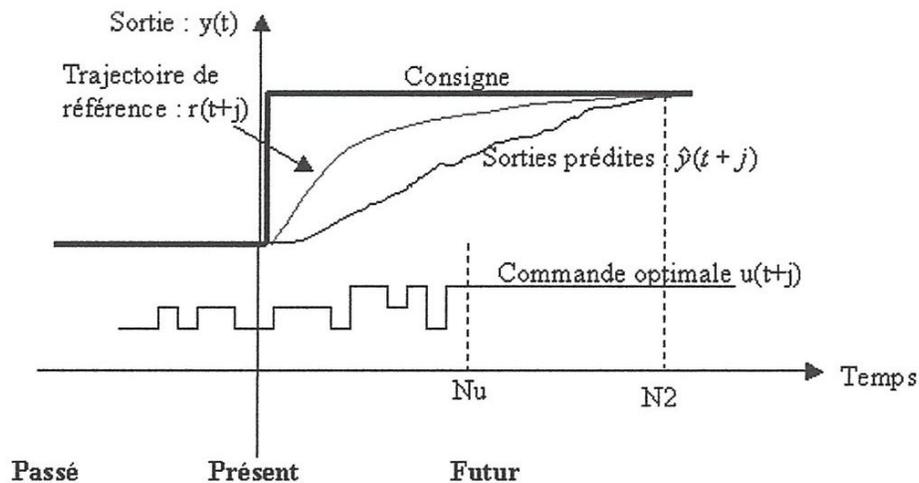


Figure (1.2) - Le principe de la commande prédictive

- Seul le premier élément de la loi de commande calculée est appliqué sur le système au coup d'horloge suivant. Toutes ces étapes se répéteront ensuite, c'est le principe de l'horizon fuyant.

1.8. Modélisation du système :

Pour l'implémentation de la stratégie, la structure de base de la Figure (1.3) est mise en œuvre. Un modèle sert à prédire les futures sorties du système.

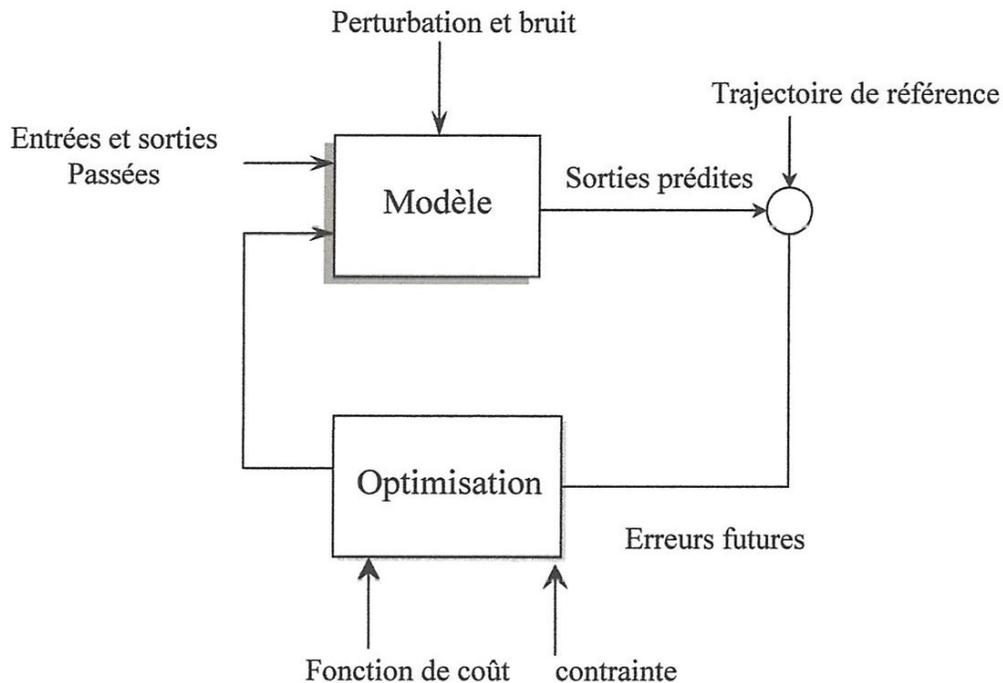


Figure (1.3)- structure de base de la commande prédictive

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 eux 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 pulsionnelles ou indicielles. La réponse impulsionnelle du système est relativement simple à obtenir car elle requiert 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.

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).

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.

1. 9. Les Avantages Et Inconvénients :

1.9.1. Les Avantages :

Tout système théoriquement commandable, monovarié, multivarié, linéaire ou non, stationnaire ou non, avec contraintes diverses, peut être piloté par cette technique. 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 désaturation.

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.
- 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 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.
- Professionnalisme tant systématique et rationnel : 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 exposer. Une analyse poussée peut conduire aux techniques

de diagnostic, de maintenance prédictive selon état, etc., qui contribue fort à la diminution du démerite.

1.9.2. Les 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).
- Ouvre 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 à 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 connaissances (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 oeuvre, 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. 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.

1.10. 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 02 :

COMMANDE PRÉDICTIVE
GÉNÉRALISÉE.

2.1. Introduction :

La commande prédictive généralisée utilise un modèle dynamique du processus à l'intérieur du contrôleur en temps réel afin d'anticiper le futur comportement du procédé. Cette stratégie de commande a montré son efficacité, sa flexibilité et son succès dans des applications industrielles, même pour des systèmes à faible période d'échantillonnage, son application de la commande prédictive dans le domaine des commandes numériques de machine-outil a donné de bons résultats en termes de rapidité et de précision.

Dans la première partie de ce chapitre on présente la philosophie et le principe de la commande prédictive généralisée, par la suite nous faisons une application de la commande prédictive linéaire à la machine asynchrone.

La deuxième partie de ce chapitre est consacrée à l'application de la commande prédictive généralisée pour résoudre le problème de poursuite de trajectoires.

Pour tester la robustesse des méthodes proposées dans ce chapitre des simulations Numériques seront présentées.

2.2. Commande prédictive :

Le principe de la commande prédictive a été introduit, pour la première fois, par Smith à la fin des années 50 (Smith 1959), et il a été repris par d'autres chercheurs, J. Richalet, en 1978 et généralisée par D.W. Clarke en 1987 en accord avec de grands groupes industriels aux USA et en Europe (Shell et Adersa). [1, 2]

L'objectif de la commande prédictive est de compenser l'effet du retard dans la boucle de commande. Cependant, la méthode est d'une part, très sensible aux erreurs de modélisation et d'autre part non capable de stabiliser des procédés instables en boucle ouverte. [1].

Pendant les dernières années, différentes structures du contrôleur prédictif ont été développées, on peut citer la commande prédictive généralisée (GPC), qui a connu un grand succès en tant que technique de commande avancée depuis le milieu des années 80 [3,4]. Cet essor s'est réalisé principalement selon deux axes privilégiés [5] :

2.3. Commande prédictive généralisée (G.P.C.) :

Cette méthode est de type prédictif où les variables impliquées dans le choix de la Commande sont connues pour un temps d'avance donné. L'intervalle où le futur est connu est nommé horizon de prédiction et à une dimension finie. Il a été démontré que l'augmentation de l'horizon de prédiction au-delà d'une certaine dimension apporte des améliorations dans la performance de contrôle [6, 7,8].

Le principe de base de la commande prédictive consiste de prendre en compte, à l'instant actuel, le comportement futur, par le biais d'utilisation explicite d'un modèle numérique du système dans le but de prédire la sortie dans le futur, sur un horizon fini.

Un des intérêts des méthodes prédictives réside dans le fait que, pour une consigne pré calculée sur un certain horizon, il est ainsi possible d'exploiter les informations de trajectoires prédéfinies situées dans la future, étant donné que le but est de faire correspondre la sortie du système avec cette consigne sur un horizon fini [6,7].

Le principe de la loi de commande prédictive est présenté dans la figure. (2.1) [6]. En effet, il est nécessaire au conducteur d'analyser l'état de la route sur un horizon assez éloigné pour déterminer la stratégie de conduite à adopter. Analyser l'état de la route ou prédire le comportement futur relève d'un concept intuitif et naturel. La commande prédictive, en fait, présente dans plusieurs activités humaines, telle que la marche, le ski,.... etc.

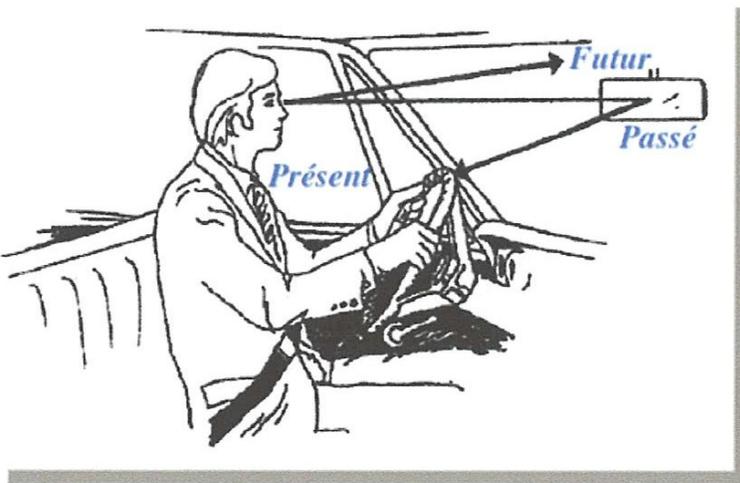


Figure (2.1) philosophie de la commande prédictive [6]

2. 3.1. Principe de fonctionnement de la commande prédictive généralisée :

Le schéma fonctionnel de la commande prédictive généralisée est présenté sur la figure. (2.2).

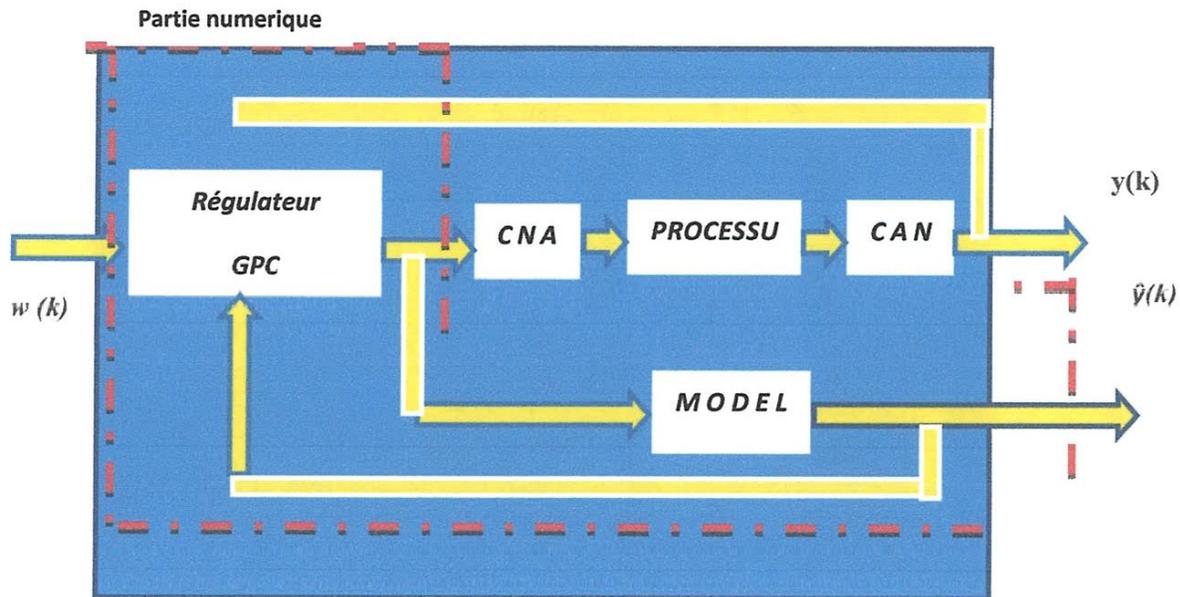


Figure (2.2) schéma de principe de GPC

$w(k)$: consigne $y(k)$: sortie du processus et $\hat{y}(k)$: prédite

La commande prédictive généralisée est basée sur quatre grandes idées [9] :

- Création d'un effet anticipatif par exploitation de la trajectoire à suivre dans le futur.
- Définition d'un modèle numérique de prédiction.
- Minimisation d'un critère quadratique à horizon fini.
- Principe de l'horizon fuyant.

La représentation temporelle de la commande prédictive généralisée est donnée par la figure.2.3, où l'on observe les commandes $u(k)$ à appliquer au système pour obtenir le Ralliement autour de la consigne $w(k)$.

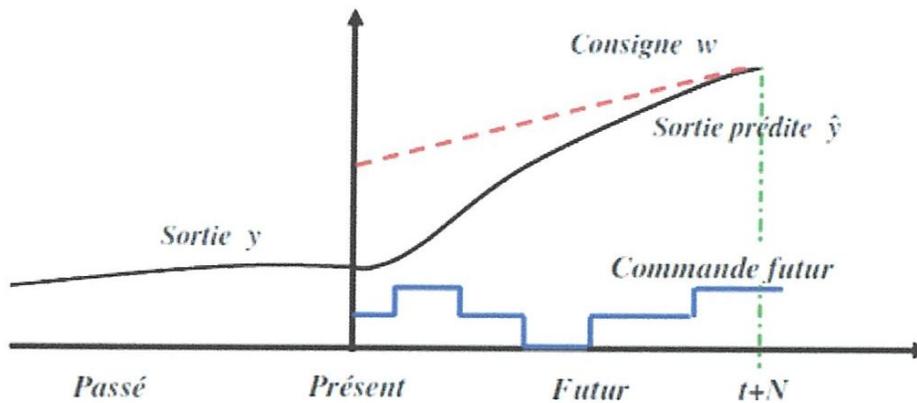


Figure (2.3) représentation temporelle du principe de la commande prédictive

Le modèle numérique est obtenu par une discrétisation (transformée en z) de la fonction de Transfert continue du modèle ce qui permet de calculer la sortie prédite sur un horizon fini.

2.3.2. Modèle de représentation :

Tous les algorithmes de commande prédictive ne diffèrent entre eux que par le modèle Utilisé pour représenter le procédé et par la fonction de coût à minimiser. Pour notre étude le système est représenté sous la forme CARIMA dont l'expression est [9,8] :

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t-1) + C(q^{-1}) * \left[\frac{\xi(t)}{\Delta(q^{-1})} \right] \quad (2-1)$$

$\Delta(q^{-1}) = 1 - q^{-1}$ et $y(t)$: sont respectivement l'incrément et la sortie du processus,
 $u(k)$: La Commande appliquée au système, q : opérateur retard, $\xi(t)$ est un bruit blanc centré.

Les polynômes $A(q^{-1})$, $B(q^{-1})$ et $C(q^{-1})$ sont définis par :

$$\begin{aligned} A(q^{-1}) &= 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_{na} q^{-na} \\ B(q^{-1}) &= b_0 + b_1 q^{-1} + \dots + b_{nb} q^{-nb} \\ C(q^{-1}) &= 1 + c_1 q^{-1} + \dots + c_{nc} q^{-nc} \end{aligned} \quad (2-2)$$

Le modèle CARIMA est représenté par la figure (2.4).

La dynamique de la perturbation doit apparaître dans la dynamique du régulateur.

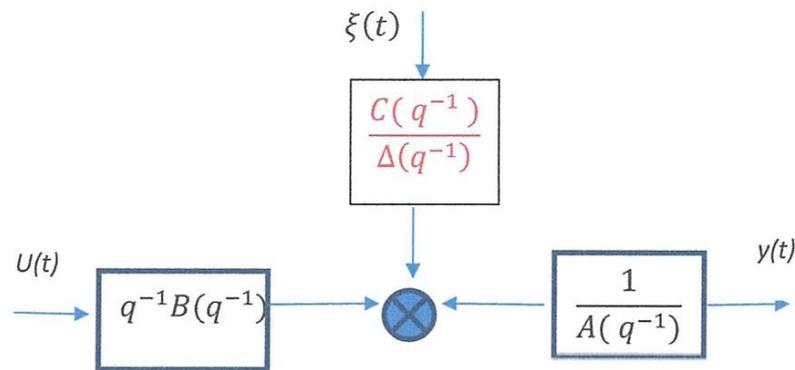


Figure (2.4) model CARIMA

Le but recherché avec l'introduction d'un intégrateur est l'annulation de toute erreur Statique vis-à-vis d'une consigne ou d'une perturbation constante.

On prendra par la suite : $C(q^{-1})=1$.

2.3.3. Expression du critère :

L'un des points fondamentaux de la méthode de commande prédictive généralisée est l'établissement d'une équation de prédiction afin de prévoir le comportement du système dans le futur, pour but de faire tendre l'erreur de sortie future vers zéro, avec un effort de commande minimum. Le calcul de la commande GPC résulte la minimisation d'un critère quadratique portant sur les erreurs futures avec un terme de pondération sur les incréments de commande :

$$J_{GPC} = \sum_{j=N_1}^{N_2} [w(t+j) - \hat{y}(t+j)]^2 + \lambda \sum_{j=1}^N \Delta u(t+j-1)^2 \quad (2-3)$$

Avec :

$w(t+j)$ et $\hat{y}(t+j)$ sont respectivement la Consigne appliquée à l'instant et la Sortie prédite à l'instant $(t+j)$.

$\Delta u(t+j-1)$: Incrément de la commande à l'instant $(t+j-1)$.

N_1 : Horizon de prédiction minimal sur la sortie.

N_2 : Horizon de prédiction maximal sur la sortie avec $N_2 \geq N_1$. N_0 est l'horizon de prédiction sur la commande.

λ : Coefficient de pondération sur la commande.

L'hypothèse suivante est faite sur la commande : $\Delta u(k+j) = 0$ pour $u_j \geq N$

Le coefficient λ permet de donner plus ou moins de poids à la commande par rapport à la sortie, de façon à assurer la convergence lorsque le système de départ présente un risque d'instabilité.

2.3.4. Choix des paramètres du GPC :

- *Choix de l'horizon minimal de prédiction N_1*

Pour un système ne présentant pas de retard, $N_1 = 1$ sinon N_1 prend la valeur du retard pur du procédé. Pour un système à déphasage non minimal, N_1 est pris égal au nombre maximal d'échantillons durant lequel ce phénomène se produit (valeur N_0 de la figure.(2.5.a). Si le retard du système est mal connu ou variable, on convient de choisir $N_1=1$.

- *Choix de l'horizon maximal de prédiction N_2 .*

N_2 est choisi de sorte que le produit $N_2 T_e$ (T_e période d'échantillonnage) soit égal au temps de réponse désiré du système. Notons que plus N_2 est grand, plus le temps de calcul est long.

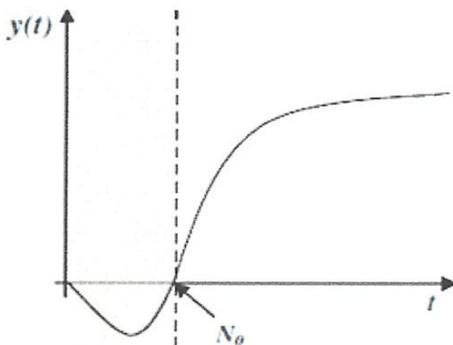


figure 2.5a valeur de N_1 pour un système de phase non nominal

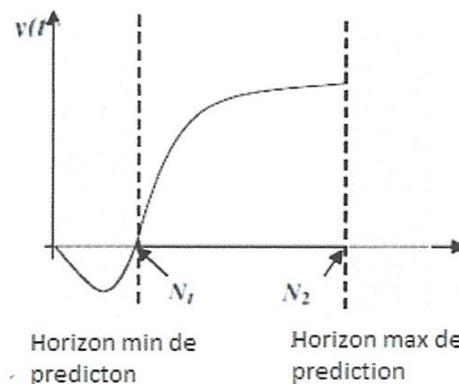


figure 2.5b choix de N_2 pour un système à phase non nominal

• **Choix de l'horizon de prédiction sur la commande N .**

La Valeur $N_u=1$ est très souvent suffisante pour beaucoup d'applications, on choisit en général un horizon de commande N_u relativement réduit. Puisque l'augmentation de l'horizon de commande pose néanmoins un problème au niveau du conditionnement et du temps de calcul.

En effet, N_u fixe la dimension des matrices à inverser dans le calcul de u_{op} .

• **Choix du facteur de pondération de la commande λ**

C'est le paramètre le plus compliqué à régler puisque il influence sur la stabilité du système bouclé. En effet, si λ est très élevé, il permet de pondérer l'influence des commandes dans l'optimisation et ainsi permet de générer un correcteur plus ou moins énergétique donc plus ou moins rapide.

2.3.5. Prédicteur optimal sous forme matricielle :

En appliquant les idées de modélisation présentées par Clarke et ses co-auteurs [4],

Un Prédicteur peut être construit sous la forme :

$$y(t+j) = \underbrace{F_j(q^{-1})y(t)}_{\text{Réponse libre}} + \underbrace{H_j(q^{-1})\Delta u(t-1) + G_j(q^{-1})\Delta u(t+j-1) + J_j(q^{-1})\xi(t+j)}_{\text{Réponse forcée}} \quad (2-4)$$

Réponse libre Réponse forcée

Avec :

$F_j; G_j; H_j$ et J_j sont les polynômes solutions uniques de deux équations diophantienne suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta(q^{-1})A(q^{-1})J_j(q^{-1}) + q^{-d+j}F_j(q^{-1}) = 1. \text{ Pour séparer les sorties passés} \\ \hspace{15em} \text{Et futurs} \hspace{10em} (2-5) \\ G_j(q^{-1}) \cdot (1) + q^{-j}H_j(q^{-1}) = B(q^{-1})J_j(q^{-1}). \text{ Pour séparer les commandes} \\ \hspace{10em} \text{Passés et futurs} \end{array} \right.$$

Le prédicteur optimal déduit de la considération que la meilleure estimée du signal perturbateur dans le futur est égal à sa moyenne supposée nul ici, donc sa forme est :

$$y(t+j) = \underbrace{F(q^{-1})y(t) + H(q^{-1})\Delta u(t-1)}_{\text{Réponse libre}} + \underbrace{G(q^{-1})\Delta u(t+j-1)}_{\text{Réponse forcée}}. \quad (2-6)$$

Posons pour cela :

$$IF(q^{-1}) = [FN1(q^{-1}) \dots \dots FN2(q^{-1})]^T$$

$$IH(q^{-1}) = [HN1(q^{-1}) \dots \dots HN2(q^{-1})]^T \hat{y} = [\hat{y}(t+N1) \dots \hat{y}(t+N2)]^T.$$

La séquence des incréments futurs $\tilde{u} = [\Delta u(t) \dots \Delta u(t+N_u-1)]^T$

De façon similaire, la matrice G formée des coefficients {g_{ji}} des polynômes G_j est donnée :

$$G = \begin{bmatrix} g_{N_1}^{N_1} g_{N_1}^{N_1} & \dots & \dots & \dots & \dots \\ g_{N_1+1}^{N_1+1} g_{N_1}^{N_1+1} & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ g_{N_2}^{N_2} g_{N_2-1}^{N_2} & \dots & \dots & g_{N_2-N_u+1}^{N_2} & \dots \end{bmatrix} \quad (2-7)$$

Avec ces notations, le prédicteur optimal à j-pas peut s'écrire sous forme matricielle :

$$Y = G\tilde{u} + IF(q^{-1})y(t) + IH(q^{-1})\Delta u(t-1) \quad (2-8).$$

2. 3.6. Critère quadratique matriciel :

Le critère quadratique de l'équation (2-3) peut se combiner avec la relation (2-8) pour

Obtenir l'expression matricielle de ce critère :

$$J = [G\tilde{u} + IF(q^{-1})y(t) + IH(q^{-1})\Delta u(t-1) - w]^T [G\tilde{u} + IF(q^{-1})y(t) + IH(q^{-1})\Delta u(t-1) - w] + \lambda \tilde{u}^T \tilde{u} \quad (2-9).$$

2.3.7. Minimisation de la fonction de coût :

La séquence optimale de commandes futures s'obtient enfin par minimisation analytique du critère sous forme matricielle $\frac{\partial j}{\partial \bar{u}} = 0$. Ce qui donne :

$$U = M[w - IF(q^{-1})y(k) - IH(q^{-1})\Delta u(t-1)] \quad (2-10)$$

Avec :

$$W = [w(t+N1) \dots \dots w(t+N2)]^T$$

La matrice M est de dimension $Nu \times (N2 - N1 + 1)$ où :

$$M = [G^T G + \lambda I_{Nu}]^{-1} G^T = [m_1^T \quad m_2^T \quad m_{Nu}^T]^T \quad (2.11)$$

Selon le principe de l'horizon fuyant, seule la première valeur de cette séquence est Appliquée au système

$$u_{opt}(t) = u_{opt}(t-1) - m_1^T [IF(q^{-1})y(t) + IH(q^{-1})\Delta u_{opt}(t-1) - w] \quad (2.12)$$

2.4. Le principe de l'horizon fuyant :

Le principe de l'horizon fuyant (mobile) constitue une procédure tout à fait originale qui distingue la commande prédictive des autres techniques de commande. L'idée est de fixer un horizon fini N, et en considérant l'état actuel comme état initial, d'optimiser une Fonction de coût sur cet intervalle, tout en respectant les contraintes. Il en résulte une Séquence optimale de N commandes parmi lesquelles seule la première valeur sera effectivement appliquée. Au fur et à mesure que le temps avance, l'horizon de prédiction glisse et un nouveau problème d'optimisation est à résoudre en considérant l'état du Système mise à jour. En résumé, à chaque étape, il est nécessaire d'élaborer une séquence de commande optimale en boucle ouverte, affinée systématiquement par l'arrivée de Mesure présente [17].

2.4.1. Modèle CARIMA du processus et prédiction de sortie :

Dans les régulateurs prédictifs, plusieurs modèles du processus peuvent être appliqués, la mise en œuvre de la GPC s'effectue à partir du modèle représenté sous la forme CARMA (Controlled AutoRegressive Moving Average).

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t-1) + x(t) \quad (2.13)$$

Avec : $y(t)$ sortie du système, $u(t)$ commande appliquée au système, q^{-1} opérateur retard, et les polynômes A et B sont définis par :

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_{na}q^{-na}$$

$$B(q^{-1}) = h_0 + h_1q^{-1} + \dots + h_{nb}q^{-nb}$$

2.4.2. Développement de prédicteur et résolution des équations Diophantiennes :

Pour obtenir la prédiction $y(t+j)$ pour $j \in [p_1, p_2]$ à partir (2.1), on considère l'identité :

$$1 = E_j(q^{-1})\tilde{A}(q^{-1})(q^{-j})F_j(q^{-1}) \quad (2.14)$$

Avec :

$$\tilde{A}(q^{-1}) = \Delta\tilde{A}(q^{-1}), E_j(q^{-1}): \text{ est un polynôme d'ordre } (j-1), F_j(q^{-1}): \text{ est un}$$

Polynôme d'ordre (na) .

En multipliant l'équation (2.1) par le terme $\Delta E_j(q^{-1})q^{-j}$ on obtient :

$$\tilde{A}(q^{-1})E_j(q^{-1})y(t+j) = E_j(q^{-1})B(q^{-1})\Delta u(t+j-1) + E_j(q^{-1})\xi(t+1) \quad (2.15)$$

Considérant l'équation (2.14), l'équation (2.15) peut être écrite comme suite :

$$(1 - q^{-j}F_j(q^{-1}))y(t+j) = E_j(q^{-1})B(q^{-1})\Delta u(t+j-1) + E_j(q^{-1})\xi(t+j)$$

Laquelle peut écrire comme suit :

$$y(t+j) = F_j(q^{-1})y(t) + E_j(q^{-1})B(q^{-1})\Delta u(t+j-1) + E_j(q^{-1})\xi(t+1) \quad (2.16)$$

Considérant que $E_j(q^{-1})\xi(t+j)$ qui représente les valeurs futures de la perturbation ou

Du bruit est égale à 0. Or ces valeurs sont par définition indépendantes de signaux mesurables à l'instant t . Donc la prédiction optimale à l'instant t de $y(t+j)$, notée $\hat{y}(t+j|t)$, obtenue grâce à des grandeurs dont la valeur est connue à l'instant t , est donnée par :

$$\hat{y}(t+j) = F_j(q^{-1})y(t) + E_j(q^{-1})B(q^{-1})\Delta u(t+j-1) \quad (2.17)$$

Les polynômes $F_j(q^{-1})$ et $E_j(q^{-1})$ peuvent être exprimés comme :

$$F_j(q^{-1}) = f_{j,0} + f_{j,1}(q^{-1}) + \dots + f_{j,na}(q^{-na})$$

$$E_j(q^{-1}) = e_{j,0} + e_{j,1}(q^{-1}) + \dots + e_{j,j-1}(q^{-(j-1)})$$

Pour initialiser l'itération, on note que pour $j=1$, l'équation (2.14) devient :

$$1 = E_1(q^{-1})\tilde{A}(q^{-1})(q^{-j})F_1(q^{-1})$$

Et puisque l'élément dominant de $\tilde{A}(q^{-1})$ est égale à 1, donc

$$E_1(q^{-1}) = 1, F_1(q^{-1}) = q(1 - \tilde{A}(q^{-1})) \quad (2.18)$$

Pour calculer les deux polynômes $E_{j+1}(q^{-1})$ et $F_{j+1}(q^{-1})$ d'où :

$$F_{j+1}(q^{-1}) = f_{j+1,0} + f_{j+1,1}(q^{-1}) + \dots + f_{j+1,na}(q^{-na})$$

$$E_{j+1}(q^{-1}) = E_j(q^{-1}) + e_{j+1,j}(q^{-j}) \text{ Avec } e_{j+1,j}(q^{-j}) = f_{j,0}$$

$$\Rightarrow E_{j+1}(q^{-1}) = E_j(q^{-1}) + f_{j,0}(q^{-j}) \quad (2.19)$$

Le polynôme F_{j+1} peut alors être calculé avec :

$$F_{j+1}(q^{-1}) = q^{j+1}(1 - E_{j+1}(q^{-1})\tilde{A}(q^{-1})) \quad (2.20)$$

Dans l'équation (2.17), le terme $E_j(q^{-1})B(q^{-1})$ est une combinaison linéaire de valeurs de Δu à des instants d'échantillonnage le futur et le passé. Mais la fonction de coût (critère)

Implique seulement les valeurs futures et la valeur présente de Δu .

Pour séparer l'effet de l'action de commande passée et future de l'équation (2.17), la seconde équation diophantienne en G_j et G'_j doit être résolue.

$$E_j (q^{-1}) B(q^{-1}) = G_j (q^{-1}) + q^{-1} G'_j (q^{-1}) \quad (2.21)$$

Avec

$$G_j (q^{-1}) = G_{j,0} + G_{j,1}(q^{-1}) + \dots + G_{j,j-1} (q^{-(j-1)})$$

$$G'_j (q^{-1}) = G'_{j,0} + G'_{j,1}(q^{-1}) + \dots + G'_{j,ng'} (q^{-ng'})$$

$$ng' = nb - 1$$

Considérant l'équation (2.21), l'équation (2.17) peut être écrite comme suite

$$\hat{y}(t+j) = \underbrace{G_j (q^{-1}) \Delta u(t+j-1)}_{\text{Réponse forcée}} + \underbrace{G'_j (q^{-1}) \Delta u(t-1) + F_j (q^{-1}) y(t)}_{\text{Réponse libre}} \quad (2.22)$$

Réponse forcée Réponse libre

Le premier terme à droite est dénommé la réponse forcée et le reste dénommée la réponse libre. La réponse libre exprime la prédiction de la sortie du processus basée sur

l'entrée passée. La réponse libre peut inclure les perturbations déjà mesurées et leurs effets sur la sortie future. La réponse forcée correspond à la prédiction produite par la commande actuelle et future. Nous notons ici que les polynômes $E_j (q^{-1})$ et $F_j (q^{-1})$ sont calculés d'une façon récursive qui se base sur les équations diophantines. Il existe d'autre formulation de la GPC qui n'utilise pas cette récursivité mais les coefficients de la réponse impulsionnelle pour calculer $G_j (q^{-1})$ à partir de la fonction de transfert du processus, avec :

$$G_j (q^{-1}) = E_j (q^{-1}) B(q^{-1})$$

Donc la prédiction, le long de l'horizon, se fait par le calcul récursif du polynôme $G_j (q^{-1})$ et de la réponse libre f .

Le polynôme $G_{j+1} (q^{-1})$ peut être obtenu récursivement comme suivant :

$$G_{j+1} (q^{-1}) = E_{j+1} (q^{-1}) B (q^{-1}) \tag{2.23}$$

$$G_{j+1} (q^{-1}) = E_j (q^{-1}) + F_{j,0} q^{-j} B (q^{-1})$$

$$G_{j+1} (q^{-1}) = G_j (q^{-1}) + F_{j,0} q^{-j} B (q^{-1}) \tag{2.24}$$

Si le système possède un retard d, la sortie du processus ne sera influencée par la commande u(t) qu'après une période d'échantillonnage d+1. Les valeurs p₁, p₂ et m désignant l'horizon peuvent être définis par : p₁ = d + 1. Pour simplicité, on prend p₁=1, et p₂ = p.

De l'équation (2.22) on obtient (en considérant le retard d) :

$$\hat{y}(t + (d + 1)/t) = G_{d+1}(q^{-1}) \Delta u(t) + f_{d+1}(t)$$

$$\hat{y}(t + (d + 2)/t) = G_{d+2}(q^{-1}) \Delta u(t) + f_{d+2}(t)$$

⋮

$$\hat{y}(t + (d + p)/t) = G_{d+p}(q^{-1}) \Delta u(t) + f_{d+p}(t) \tag{2.25}$$

Avec :

$$f_j(t) = G'_j (q^{-1}) \Delta u(t-1) + F_j (q^{-1}) y(t)$$

$$y = \begin{bmatrix} \tilde{y}(t + d + 1/t) \\ \tilde{y}(t + d + 2/t) \\ \vdots \\ \tilde{y}(t + d + p/t) \end{bmatrix}, \quad \tilde{u} = \begin{bmatrix} \Delta u(t) \\ \Delta u(t + 1) \\ \vdots \\ \Delta u(t + m - 1) \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} g_0 & 0 & \dots & 0 \\ g_1 & g_0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g_{p-1} & g_{p-2} & \dots & g_0 \end{bmatrix}$$

$$G'_j (q^{-1}) = \begin{pmatrix} G_{d+1}(q^{-1}) - g_0 q^1 \\ G_{d+1}(q^{-1}) - g_0 - g_1 q^{-1} q^2 \\ \dots \\ G_{d+1}(q^{-1}) - g_0 - g_1 q^{-1} - \dots - g_{p-1} q^{p-1} q^p \end{pmatrix}$$

Les deux termes de l'équation (2.14) dépendent seulement du passé et peuvent être regroupés dans f conduisant à

$$\hat{y} = G \Delta u + f$$

2.4.3. Critère d'optimisation et obtention de commande :

L'objectif de prédiction de commande est de calculer la séquence future de commande $u(t), u(t+1), \dots$ de quelque sorte que la sortie future du processus $y(t+j)$ est amenée proche à la trajectoire de référence $w(t+j)$. Et ceci est accompli par la minimisation d'une fonction de coût qui contient les erreurs quadratiques entre la trajectoire de référence et les prédictions sur l'horizon de prédiction ainsi que la variation de la commande.

$$J = \sum_{j=p_1}^p \delta(j) (\hat{y}(t+j|t) - w(t+j))^2 + \lambda \sum_{j=1}^m \Delta u(t+j-1)^2 \quad (2.26)$$

Les coefficients $\delta(j)$ et $\lambda(j)$ qui interceptent en considération le comportement futur, prennent souvent une valeur égale à 1 (qui est la valeur retenue à cette minimisation) pour $\delta(j)$ et une valeur constante pour λ .

Dans le cas où δ diffère de 1, il est possible d'obtenir un poids exponentiel de $\delta(j)$ le long de l'horizon en utilisant l'expression :

$$\delta(j) = \alpha^{j-1}$$

Si α est donnée entre 0 et 1 et l'erreur la plus loin de l'instant de temps est plus influencée par rapport à celle la plus proche, donnant une commande douce avec petit effort. Si, de l'autre côté, $\alpha > 1$ les premières valeurs d'erreurs sont les plus influencées, provoquant une commande dure.

S'il n'y a pas des contraintes, la solution de la minimisation de la fonction de coût est :

$$J = e e^T + \lambda \hat{u} \hat{u}^T$$

D'où est le vecteur de l'erreur future le long de l'horizon de Prédiction et \hat{u} est le vecteur composé de l'incrément de la commande future.

D'où

$$\hat{u} (\Delta u(t), \Delta u(t+1), \Delta u(t+2), \dots, \Delta u(t+m))$$

$$j = (\hat{y}(t+j) - w(t+j)) (\hat{y}(t+j) - w(t+j))^2 + \lambda \hat{u} \hat{u}^T \quad (2.27)$$

Avec

$$\hat{y}(t+j) = G \hat{u} + f \quad (2.28)$$

$$J = (G\hat{u} + f - w) (G\hat{u} + f - w)^T + \lambda \hat{u} \hat{u}^T \quad (2.29)$$

$$\min_u J(u) = 2G^T(G\hat{u} + f - w) + 2\lambda \hat{u} = 0 \quad (2.30)$$

La solution optimale est obtenue comme suit :

$$\min_u J(\hat{u}) = 0 \quad (2.31)$$

$$\Rightarrow 2G^T(G\hat{u} + f - w) + 2\lambda \hat{u} = 0$$

Ce qui donne

$$\hat{u} = (G^T G + \lambda I)^{-1} G^T (w - f) \quad (2.32)$$

On peut écrire :

$$\hat{u} = K (w - f)$$

Avec :

$$K = (G^T G + \lambda I)^{-1} G^T$$

• **Etapes de calcul de l'algorithme GPC :**

1. Calcul des polynômes $E_j (q^{-1})$ et $F_j (q^{-1})$.
2. Calcul de la matrice $G_j (q^{-1})$.
3. Calcul de la matrice $G'_j (q^{-1})$ et f
4. Calcul de la commande prédite $u(t)$.
5. Calcul de la sortie prédite $\hat{y}(t + k/t)$

• **EXEMPLE :**

Soit un système de 1er ordre mis sous la forme CARIMA :

$$(1 + aq^{-1}) y(t) = (b_0 + b_1 q^{-1}) u(t - 1) + e(t)/\Delta \quad (2.33)$$

Dans cet exemple le retard d est égal à 0 et le polynôme de perturbation $C (q^{-1})$ est

Considéré égal à 1.

Les valeurs numériques des paramètres du modèle sont :

$$a = -0.8, b_0 = 0.4, b_1 = 0.6, p_1 = 1, p_2 = m = 3.$$

$$1 = E_j(q^{-1}) \tilde{A}(q^{-1}) (q^{-j}) F_j(q^{-1})$$

La prédiction des polynômes $E_j(q^{-1})$ et $F_j(q^{-1})$. Est de $j=1$ à 3 sera calculée résolvant les Deux équations Diophantiennes (2.14) et (4.21) avec :

$$\tilde{A}(q^{-1}) \times \Delta = A(1 - q^{-1}) = 1 - 1.8q^{-1} + 0.8q^{-2} \quad (2.34)$$

Dans ce cas, on commence par $j=1$;

$$E_1(q^{-1}) = 1 \quad F_1(q^{-1}) = 1.8 - 0.8q^{-1}$$

➤ Pour $j=2$;

$$E_2(q^{-1}) = 1 + 1.8q^{-1} F_2(q^{-1}) = 2.44 - 1.44q^{-1}$$

➤ Pour $j=3$;

$$E_3(q^{-1}) = 1 + 1.8q^{-1} + 2.44q^{-2} F_3(q^{-1}) = 2.952 - 1.952q^{-1}$$

Avec ces valeurs et le polynôme $B(q^{-1}) = 0.4 + 0.6q^{-1}$, les valeurs de $G_j(q^{-1})$. Sont les suivantes :

$$G_j(q^{-1}) = E_j(q^{-1}) B(q^{-1})$$

$$G_1(q^{-1}) = 0.4 + 0.6q^{-1}$$

$$G_2(q^{-1}) = 0.4 + 1.32q^{-1} + 1.08q^{-2}$$

$$G_3(q^{-1}) = 0.4 + 1.32q^{-1} + 2.056q^{-2} + 1.464q^{-3} \quad (2.35)$$

Calcul de $G'_j(q^{-1})$

$$G'_j(q^{-1}) = \begin{pmatrix} G_1(q^{-1}) - g_0 q^1 \\ G_2(q^{-1}) - g_0 - g_1 q^{-1} q^2 \\ G_3(q^{-1}) - g_0 - g_1 q^{-1} - \dots - g_2 q^2 q^3 \end{pmatrix}$$

Avec

$$g'_1(q^{-1}) = (0.4 + 0.6q^{-1} - 0.4)q = 0.6$$

$$g'_2(q^{-1}) = (0.4 + 1.32q^{-1} + 1.08q^{-2} - 0.4 - 0.6q^{-3})q^2 = 1.08$$

$$g_3'(q^{-1}) = (0.4 + 1.32 q^{-1} + 2.056 q^{-2} + 1.464 q^{-3} - 0.4 - 1.32 q^{-1} - 2.056 q^{-2})q^3 = 1.464$$

$$G'_j(q^{-1}) = \begin{bmatrix} 0.6 \\ 1.08 \\ 1.464 \end{bmatrix} F(q^{-1}) = \begin{bmatrix} 1.8 - 0.8q^{-1} \\ 2.44 - 1.44q^{-1} \\ 2.952 - 1.952q^{-1} \end{bmatrix}$$

$$f(q^{-1}) = F_j(q^{-1})y(t) + G'_j(q^{-1})\Delta u(t-1)$$

$$f(q^{-1}) = \begin{bmatrix} 0.6\Delta u(t-1) + 1.8y(t) - 0.8y(t-1) \\ 1.08\Delta u(t-1) + 2.44y(t) - 1.44y(t-1) \\ 1.464\Delta u(t-1) + 2.952y(t) - 1.952y(t-1) \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

Et la prédiction de la sortie peut être écrite comme :

$$\begin{bmatrix} \hat{y}(t+1/t) \\ \hat{y}(t+2/t) \\ \hat{y}(t+3/t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4 & 0 & 0 \\ 1.32 & 0.4 & 0 \\ 2.056 & 1.32 & 0.4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u(t) \\ \Delta u(t+1) \\ \Delta u(t+2) \end{bmatrix}$$

$$+ \underbrace{\begin{bmatrix} 0.6\Delta u(t-1) + 1.8y(t) - 0.8y(t-1) \\ 1.08\Delta u(t-1) + 2.44y(t) - 1.44y(t-1) \\ 1.464\Delta u(t-1) + 2.952y(t) - 1.952y(t-1) \end{bmatrix}}_f$$

f

Pour $\lambda = 0.8$, la matrice K est calculée avec :

$$K = (G^T G + \lambda I)^{-1} G^T = \begin{bmatrix} 0.133 & 0.286 & 0.147 \\ -0.154 & -0.165 & 0.286 \\ -0.029 & -0.154 & 0.1334 \end{bmatrix}$$

$$\Delta u(t) = \begin{bmatrix} 0.133 & 0.286 & 0.147 \\ -0.154 & -0.165 & 0.286 \\ -0.029 & -0.154 & 0.1334 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} w(t+1) - f(t+1) \\ w(t+2) - f(t+2) \\ w(t+3) - f(t+3) \end{bmatrix}$$

Appliquant seulement la première ligne de la matrice K pour calculer l'incrément

De commande $\Delta u(t)$ on trouve :

$$\Delta u(t) = -0.604\Delta u(t-1) - 1.371y(t) + 0.805y(t-1) + 0.133w(t+1) + 0.286w(t+2) + 0.147w(t+3)$$

Le signal de commande est donné par :

$$u(t) = 0.396u(t-1) + 0.604u(t-2) - 1.371y(t) + 0.805y(t-1) + 0.133w(t+1) + 0.286w(t+2) + 0.147w(t+3)$$

2.4.3.1. Réponse indicielle de processus :

Consigne $w(t) = 1$ et le retard $d=2$

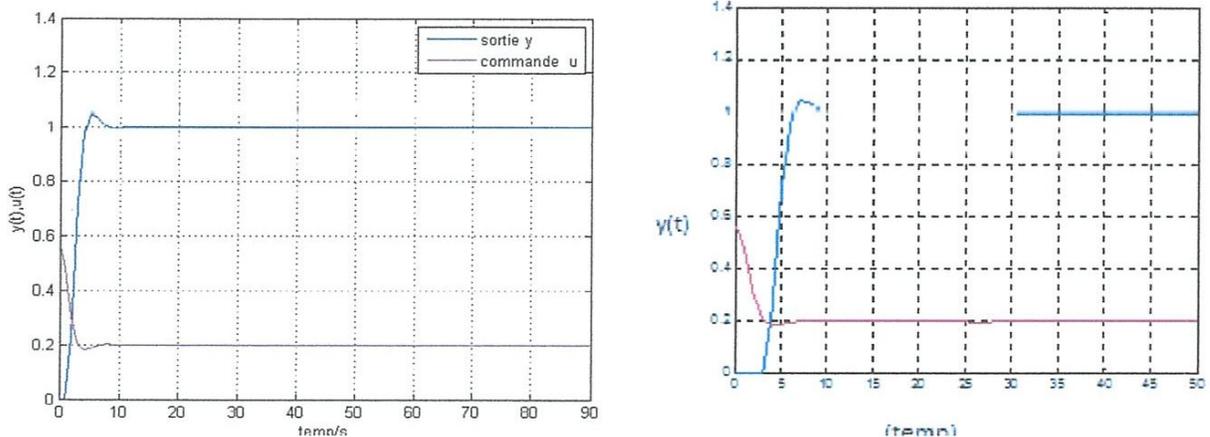
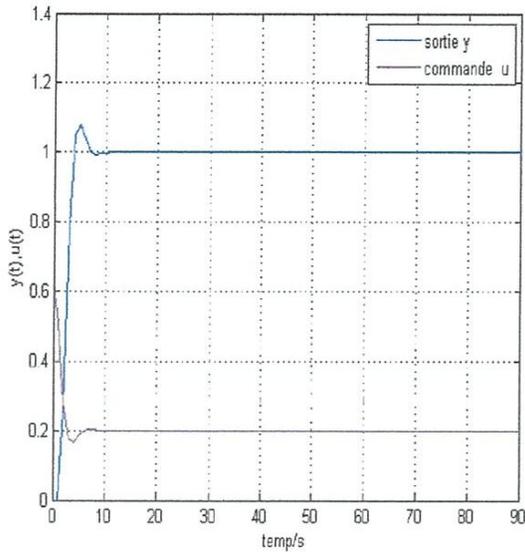


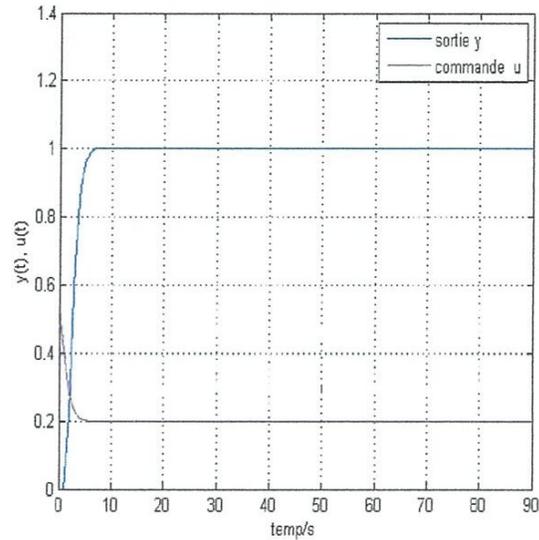
Figure (2.6) Réponse indicielle de processus

Les paramètres utilisés du processus sont cités au-dessus, avec un horizon minimum de prédiction $P1$ égale au retard du processus $d = 2$. Le facteur de pondération de la commande $\lambda=0.8$

a) L'effet de l'horizon de prédiction sur la sortie et commande prédit :



(a)



(b)

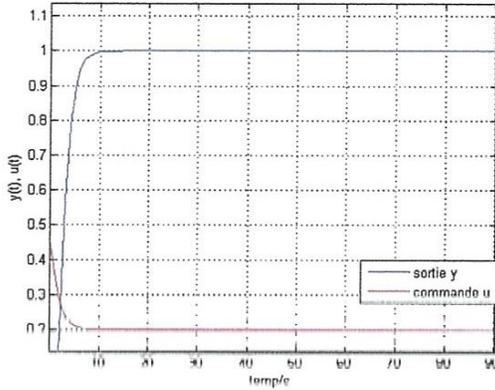
Figures : (2.7) L'effet de l'horizon de prédiction sur la sortie et commande prédite

(a) $P1=1; P2=2; m=1; \lambda=0.8$ (b) $P1=1; P2=3; m=1; \lambda=0.8$

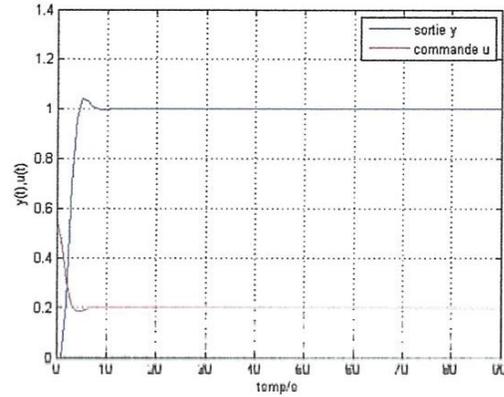
L'horizon de commande égale à $m=1$ et l'horizon de Prédiction 'p' (de sortie) est changé pour le but de connaître son effet. Les différentes Sorties et commandes correspondantes sont données par les figures (2.7.a) et (2.7.b) Respectivement.

Ces figures montrent clairement l'effet de l'horizon de prédiction, plus l'horizon est long, plus la réponse est lente et la commande est moins excitée.

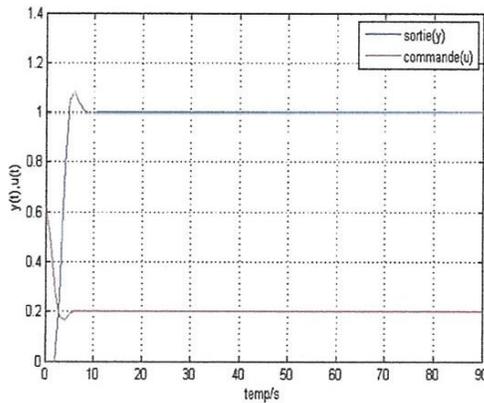
b) L'effet de l'horizon de commande sur la sortie et la commande prédite
Commande prédite :



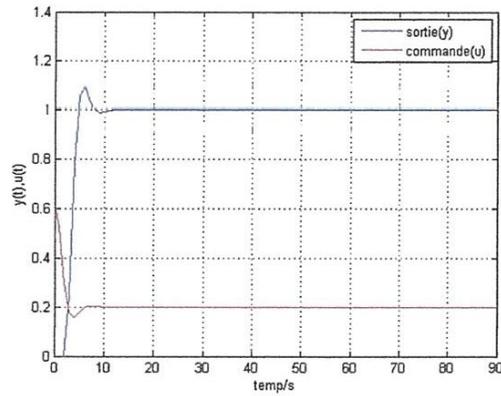
a)



b)



c)



d)

Figure (2.8) L'effet de l'horizon de commande sur la sortie et la commande prédite

(a) $P1=1 ; P2= 4 ; m=1 ; \lambda=0.8$

(b) $P1=1 ; P2= 4 ; m=2 ; \lambda=0.8$

(c) $P1=1 ; P2= 2 ; m=1 ; \lambda=0.8$

(d) $P1=1 ; P2= 2 ; m=2 ; \lambda=0.8$

2.4.3.2 $W(t)$ est un signal périodique carré :

$W=[\text{ones}(1,30) \text{ zeros}(1,30) \text{ ones}(1,30) \text{ zeros}(1,30) \text{ ones}(1,30) \text{ zeros}(1,30)]'$;

c) L'effet de l'horizon de prédiction sur la commande GPC :

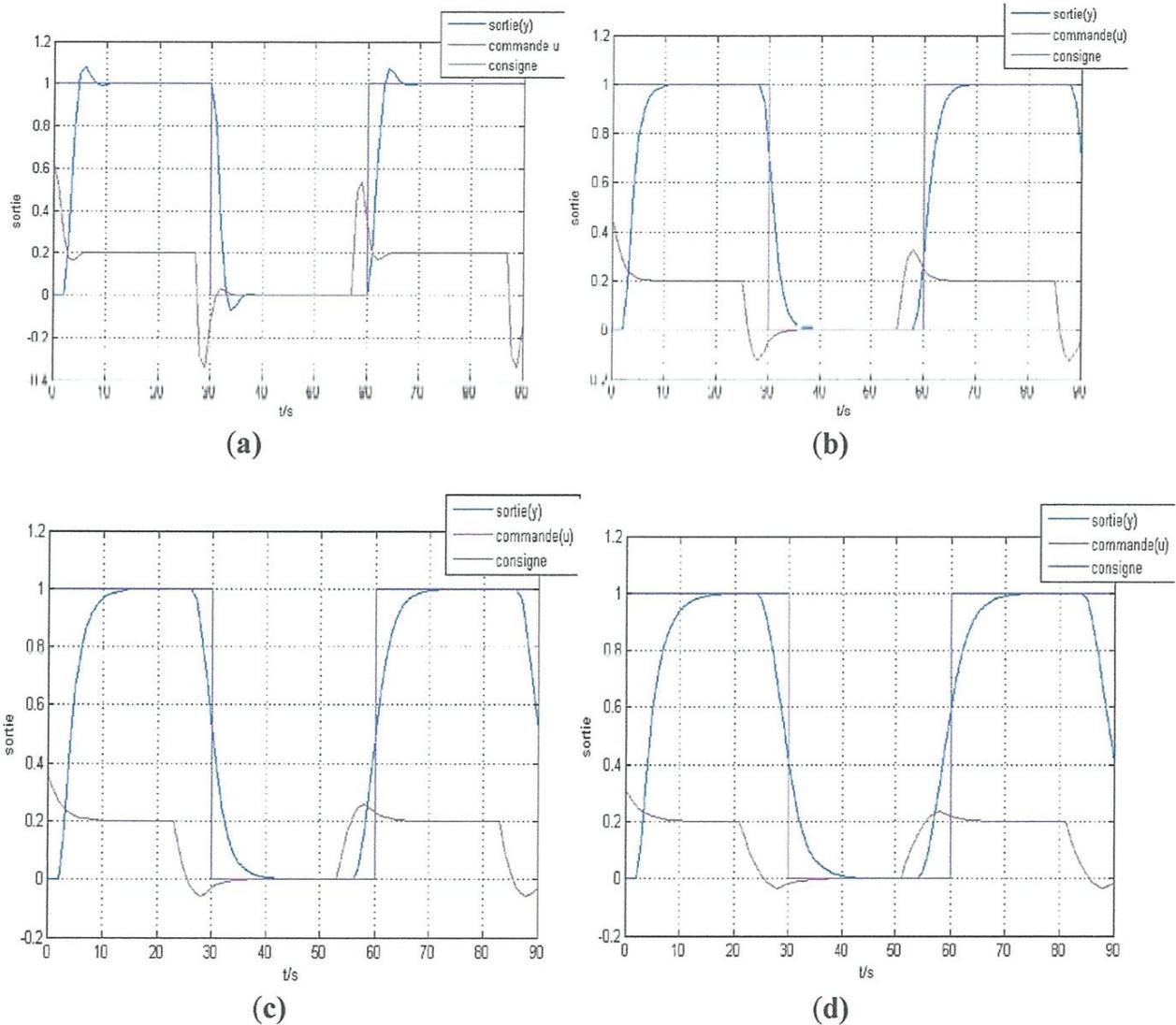


Figure (2.9) L'effet de l'horizon de prédiction sur la commande GPC

a) $P1=1; P2= 2; m=1; \lambda=0.8$ b) $P1=1; P2= 4; m=1; \lambda=0.8$

c) $P1=1; P2= 6; m=1; \lambda=0.8$ d) $P1=1; P2= 8; m=1; \lambda=0.8$

On voit que le signal de sortie (y) essaie de suivre la consigne. On remarque que le changement de l'horizon effectuera le dépassement de la réponse du système à cause de l'incrément dans la commande.

d) L'effet de l'horizon de commande sur GPC :

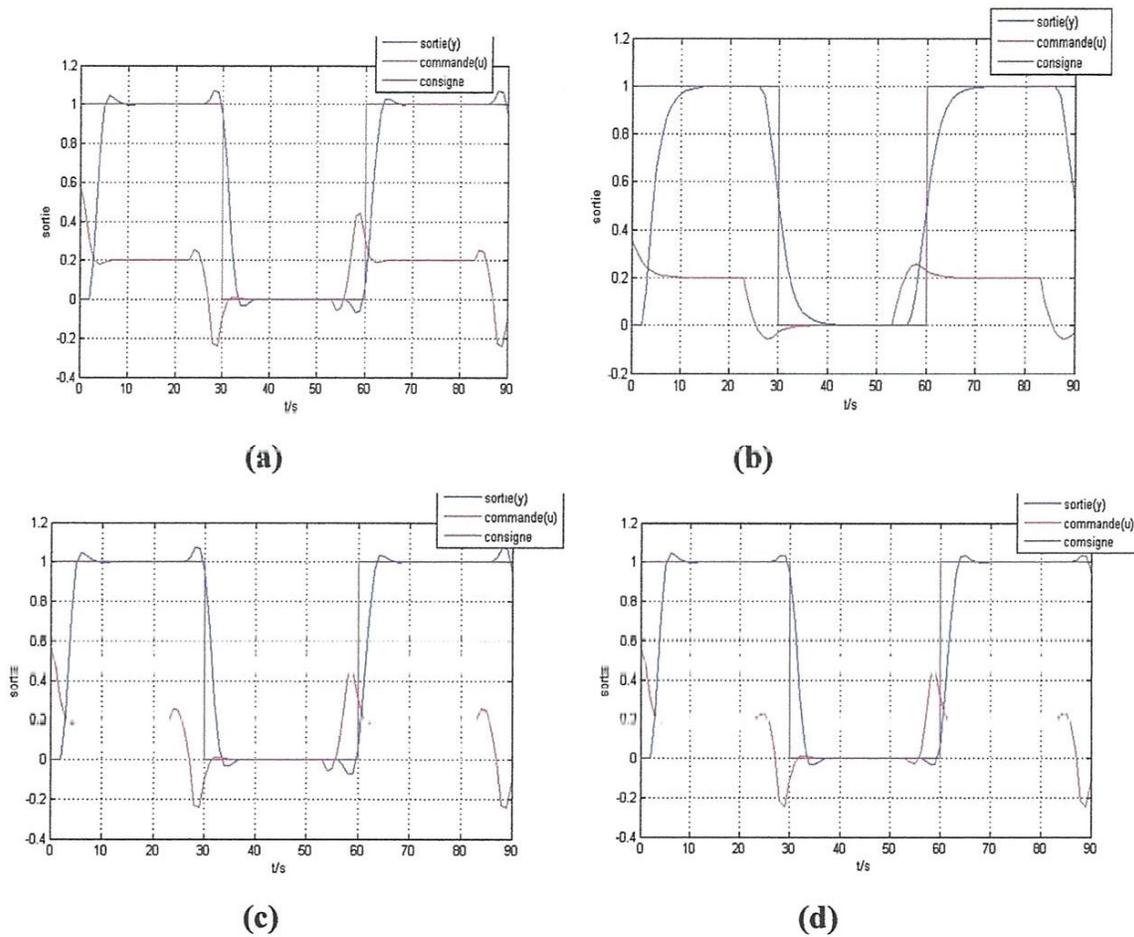


Figure (2.10) L'effet de l'horizon de commande sur GPC

a) $P1=1; P2=6; m=1; \lambda=0.8$ b) $P1=1; P2=6; m=2; \lambda=0.8$ c) $P1=1; P2=6; m=3; \lambda=0.8$ d) $P1=1; P2=6; m=5; \lambda=0.8$

2.5. CONCLUSION

Dans ce chapitre ; nous avons présenté et étudié la commande prédictive généralisée cette commande a besoin d'un modèle interne et d'un signal de référence ; pour prédire le comportement futur du système (linéaire ou non linéaire) en optimisant un critère quadratique (J) pour calculer une certaine commande. Ceci grâce à un choix particulier des paramètres de synthèse (horizon de prédiction minimal N_1 et maximal N_2 ; l'horizon de commande N_u ; le coefficient de pondération λ) permettant

d'avoir des commandes douces et une bonne poursuite du signal de sortie à la consigne.

Cette méthode du fait qu'elle utilise des formes récursives ; facilite considérablement son implémentation dans un calculateur numérique.

Cette commande présente aussi un avantage très intéressant qui réside dans l'élimination des effets de toute perturbation en échelon de grandeur ; de durée d'occurrence aléatoires grâce à l'action intégrale du modèle CARIMA.

CHAPITRE 03 :

APPLICATION ET RESULTAT DE SIMULATION.

3.1. INTRODUCTION :

Le principal élément technologique des installations industrielles et les réactions chimiques est le réacteur chimique. Dans ce chapitre, il est considéré que le réacteur chimique est un appareil dont le processus chimique peut être effectué pour obtenir certaines substances dans des processus technologiques. Les systèmes de commande automatique par leurs dynamiques apportent ces processus à un point où le profil est optimal, ce qui impose l'utilisation de plusieurs méthodes pour réaliser les performances désirées.

Dans ce chapitre on va présenter l'application de la commande (GPC) sur la commande de flux dans un réacteur de pyrolyse ce dernier est planté dans les usines pétrochimiques et est destiné à obtenir de l'éthylène, la combinaison d'une quantité de gaz à l'eau dans certaines conditions opératoires peuvent produire une réaction chimique, ce qui a comme résultats la production de l'éthylène [18].

3.2. La commande de flux :

Les systèmes automatiques de la structure de contrôle de flux sont faites de simple ajustement en fonction de l'erreur, une telle structure est utilisée uniquement pour maintenir un écoulement à une valeur spécifiée ou en tant que boucle secondaire en une structure de commande qui modifie le flux en cascade avec le niveau ou Concentration [19].

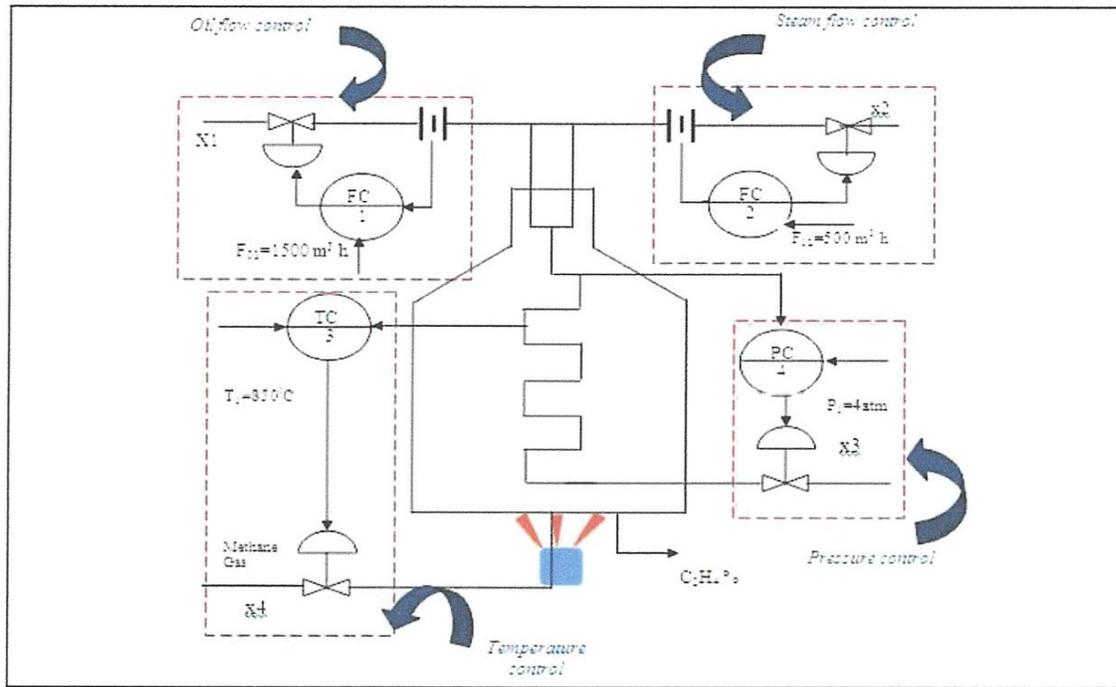


Figure (3.1) Les houcles de commande qui régissent le réacteur de pyrolyse

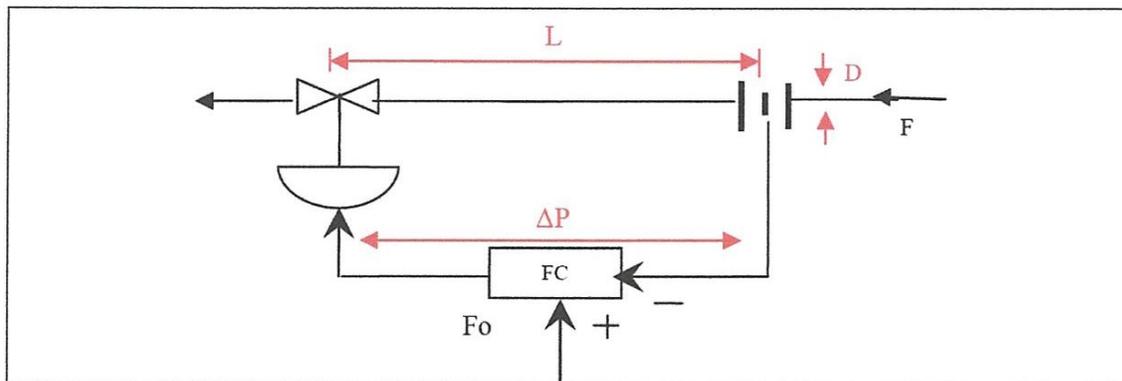


Figure (3.2) Régulateur de débit

où :

S = la surface de la section

R : rayon de tuyau

L : longueur de tuyau

F : débit de fluide

F_0 : valeur initial de flux

ΔP : réduction de la pression par la restriction

α : coefficient de débit

ρ : la densité de fluide

K_p : facteur d'amplification, $k_p=0.5$

τ_{pa} : Retard constant du canal $\tau_{pa} = X^2 \frac{V_0}{F_0}$

V_0 : volume de fluide dans le tuyau en cas d'équilibre

M : masse de liquide à travers le tuyau

v : taux d'écoulement de liquide à travers le tuyau

Pour les systèmes de contrôle de flux, en utilisant le théorème de lignes courtes

[13]: pipeion est équivalente à une résistance hydraulique définie par la relation connue :

$$F = \alpha s \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (3.1)$$

Pour un flux constant, les forces appliquées dans le système sont équilibrés, ce qui implique :

$$\Delta P_0 - \frac{F_0^2 \rho}{2\alpha^2 s} = 0 \quad (3.2)$$

Où :

ΔP_0 : est la force active pour pousser le liquide dans le tuyau

$\frac{F_0^2 \rho}{2\alpha^2 s}$ Est la force de réaction par la restriction

En régime dynamique, la différence entre ces deux forces est compensé par le taux de Modification de durée d'impulsion du système.

$$\Delta P(t) s - \frac{F^2(t) \rho}{2\alpha^2 s} = \frac{d(Mv)}{dt} \quad (3.3)$$

Qui impliquent que :

$$\Delta P(t) S - \frac{F^2(t) \rho}{2\alpha^2 S} - \rho L \frac{1}{S} \frac{d(F(t))}{dt} \quad (3.4)$$

Les valeurs qui dépendent de t sont obtenues, si les variations de deux valeurs arbitraires de constant état sont données à titre : [11]

$$\begin{aligned} \Delta P(t) = \Delta P_0 + \Delta(\Delta P(t)) = \Delta P_0 + \Delta P(t) \quad (3.5) \\ F(t) = F_0 + \Delta F(t) \end{aligned}$$

De (3.4) et (3.5) :

$$(\Delta P_0 + \Delta P(t)) S - \rho \frac{(F_0 + \Delta F(t))^2 S}{2\alpha^2 S^2} = \rho L \frac{d(F_0 + \Delta F(t))}{dt} \quad (3.6)$$

Par extraction (3.6) et l'état d'équilibre exprimée par (3.2) et en ignorant le terme quadratique $F^2(t)$, l'équation suivante peut être obtenue : [12]

$$\Delta P(t) S - \frac{2\rho F_0 \Delta F(t)}{2\alpha^2 S^2} S = \rho L \frac{d(\Delta F(t))}{dt} \quad (3.7)$$

Par la normativité dans l'état stable

$$Y(t) = \frac{\Delta F(t)}{F_0} \text{ ET } M(t) = \frac{\Delta P(t)}{\Delta P_0} \quad (3.8)$$

les résultats du modèle linéaire avec des variables adimensionnelles [11]:

$$\frac{\alpha^2 V_0}{F_0} \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = \frac{1}{2} m(t)$$

Le contrôle de débit d'huile

Le dispositif de commande d'écoulement d'huile est représenté sur la figure (3.3) .

Dans ce cas, l'étude du réacteur de pyrolyse

Paramètres technologiques sont données par :

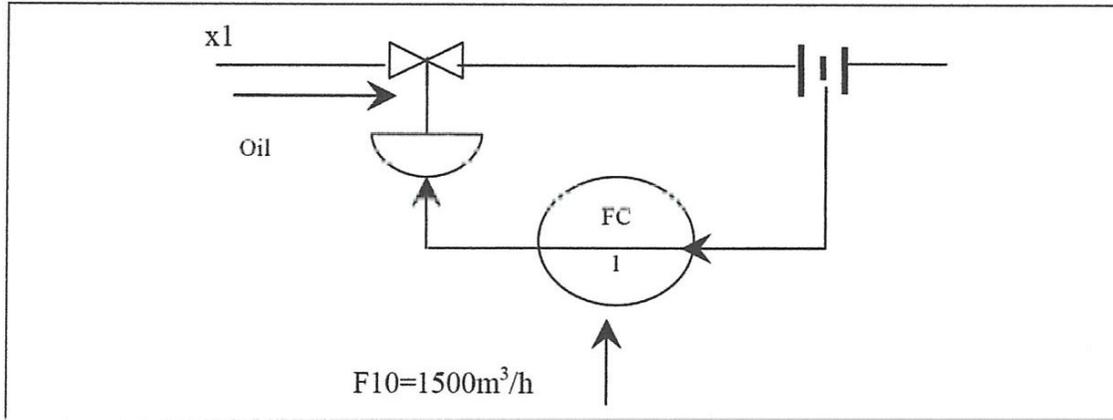
La longueur du tuyau $L = 10 \text{ m}$

Le diamètre du tube est de $0,2 \text{ m}$ ce qui signifie que $R = 0,1 \text{ m}$

Le débit de la vitesse nominale ; $F_{10} = 1500 \text{ m}^3 / \text{h} = 0.41 \text{ m}^3 / \text{sec}$

Le coefficient de débit $\alpha = 0,9$

Le facteur d'amplification $k_p = 0,9$



Figue. (3.3). Régulateur de débit d'huile.

$$H_p(s) = \frac{0.5}{\alpha^2} \frac{V}{F_{10}s+1} - \frac{0.5}{0.62s+1} \quad (3.9)$$

$$V = \Pi * r^2 * L = \Pi \left(\frac{0.2}{2}\right)^2 * 10 = 3.14 * (0.01) * (10) = 0.314 \text{ m}^3 \quad (3.10)$$

$$\alpha^2 \frac{V}{F_{10}} = 0.9^2 * \frac{0.314}{0.41} = 0.62 \quad (3.11)$$

La fonction de transfert du réacteur :

$$H_E(s) = \frac{0.66}{8s+1}$$

La fonction de transfert du processus: $H_p(s) = \frac{0.5}{0.62s+1}$

$$\frac{\Delta I}{\Delta F_1} * \frac{F_{10}}{I_0} = \frac{16}{2000} * \frac{1500}{16} = 0.75 \text{ la fonction de transfert du capteur}$$

La fonction de transfert du système est maintenant égal à :

$$H_F = H_P * H_E * H_T = \frac{0.66}{8s+1} * \frac{0.5}{0.62s+1} * 0.75 = \frac{0.24}{(8s+1)(0.62s+1)} \quad (3.12)$$

La fonction de transfert du processus à commander est donnée par :

$$H_F = \frac{0.24}{4.96s^2 + 8.62s + 1} \quad (3.13)$$

3.3. La Commande prédictive généralisée (GPC) du flux d'huile :

Dans cette partie on a utilisé les équations présentées dans le chapitre précédant pour calculer les différents paramètres du GPC.

Dans le but de déterminer les meilleurs paramètres du GPC, une série de simulation est présentée à chaque fois pour déterminer un paramètre.

Le modèle utilisé est présenté par la fonction de transfert discrète du système présenté par l'équation (3.13).

$$\text{Modèle : } H_m = \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} = \frac{0.0002285q + 0.0002156}{q^2 - 1.839q + 0.8405}$$

MATLAB est utilisé pour obtenir des réponses indicelles du système en boucle fermée. On peut déduire qu'A est un polynôme de seconde degré et B est du premier degré.

La figure (3.4) montre la réponse indicelle du système commandé par la commande GPC et le signal de la commande $u(t)$. On peut clairement voir que le GPC est capable d'assurer une bonne amélioration de performance du système

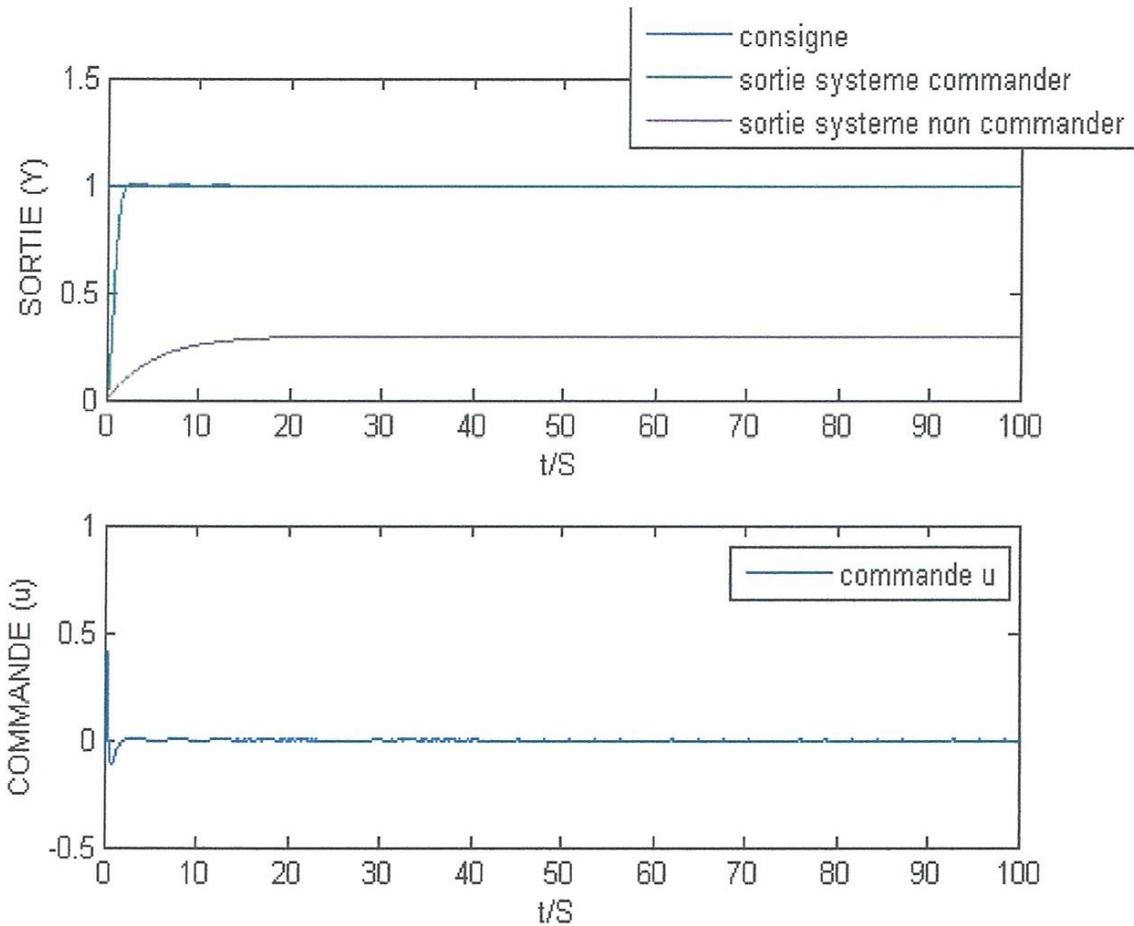


Figure (3.4) réponse indiciel du système

3.3.1 L'effet de l'horizon de prédiction sur la commande GPC

Dans le but de voir l'effet de l'horizon de prédiction sur la commande prédictive généralisée, une série de simulation a été faite avec plusieurs valeurs de l'horizon de prédiction H_p .

Les résultats obtenus sont montrés dans la figure (3.5).

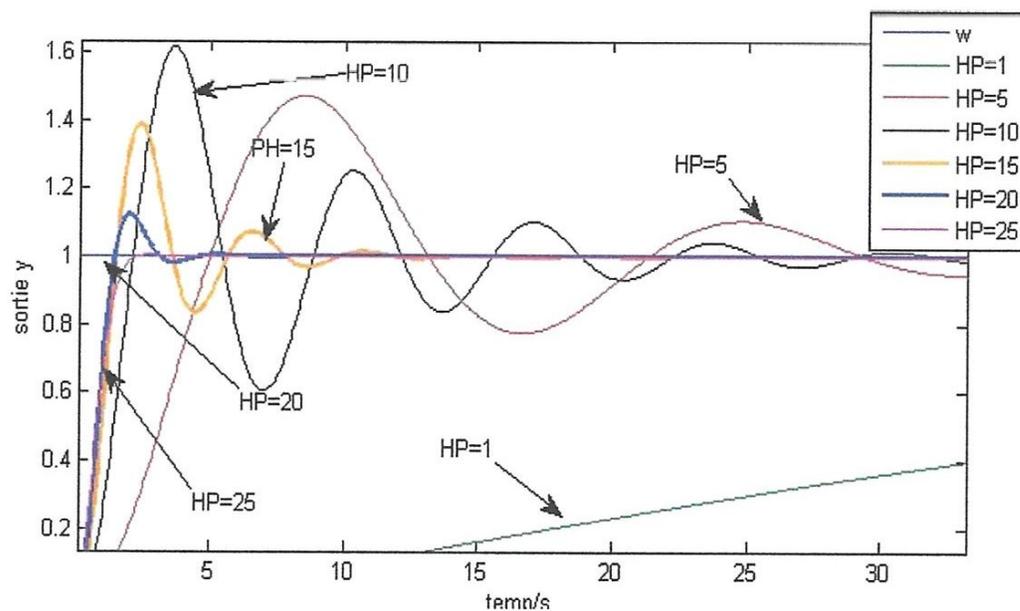
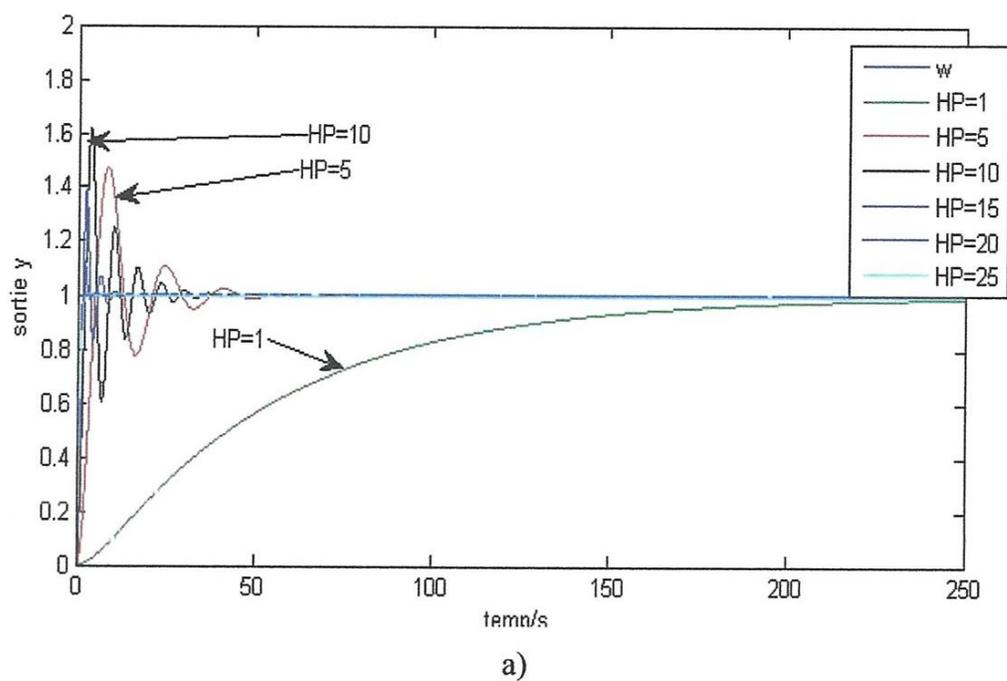


Figure (3.5 .a), (3.5 .b) L'effet de l'horizon de prédiction

Alors, la figure (3.5) nous montre clairement l'effet de l'horizon de prédiction sur la sortie du système.

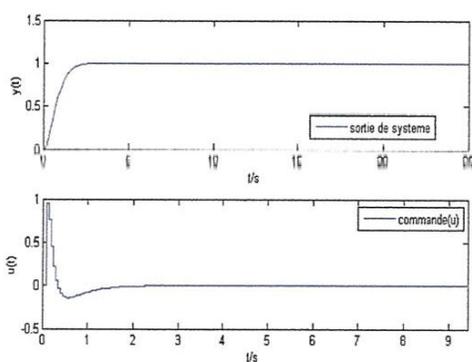
Dans la première simulation, l’horizon de prédiction ‘ H_p ’ (de sortie) est changé dans le but de connaître son effet. Les différentes sorties et commandes correspondantes sont données par les figures (3.5) respectivement.

Ces figures montrent clairement l’effet de l’horizon de prédiction, plus l’horizon est court .plus la réponse est rapide. Des oscillations sont obtenues dans les cas avec horizon de prédiction moins suffisant.

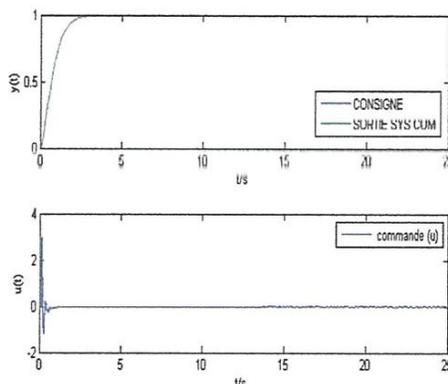
On remarque que la meilleure réponse correspond à un horizon de prédiction $H_p=25$.

3.3.2L’effet du facteur de pondération λ sur la commande GPC

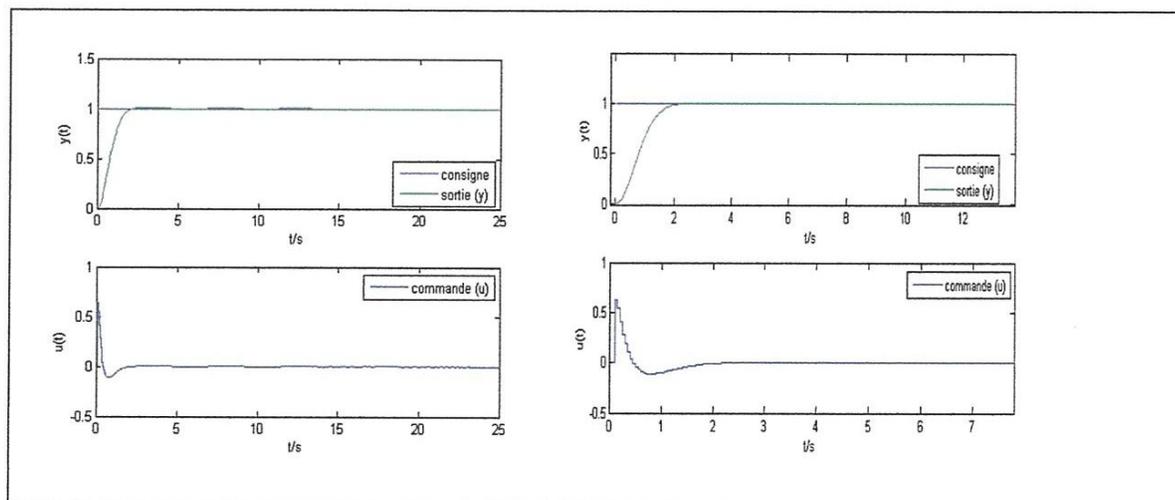
Pour voir l’avantage apporté sur la commande GPC par l’introduction du facteur de pondération λ , une série de simulation ont été fait avec plusieurs valeurs de λ ($\lambda=0.1, 0.5, 0.8, 1.2$)



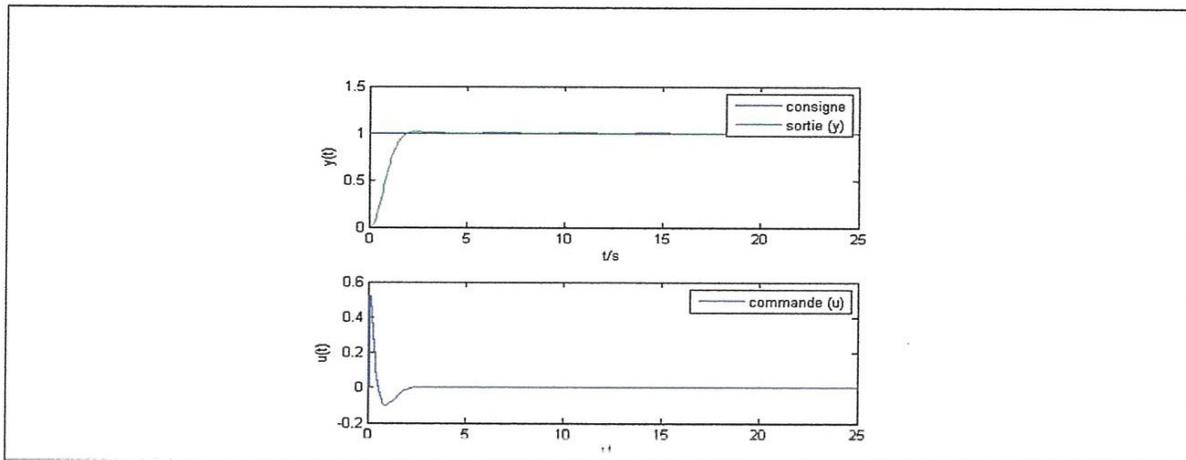
a)



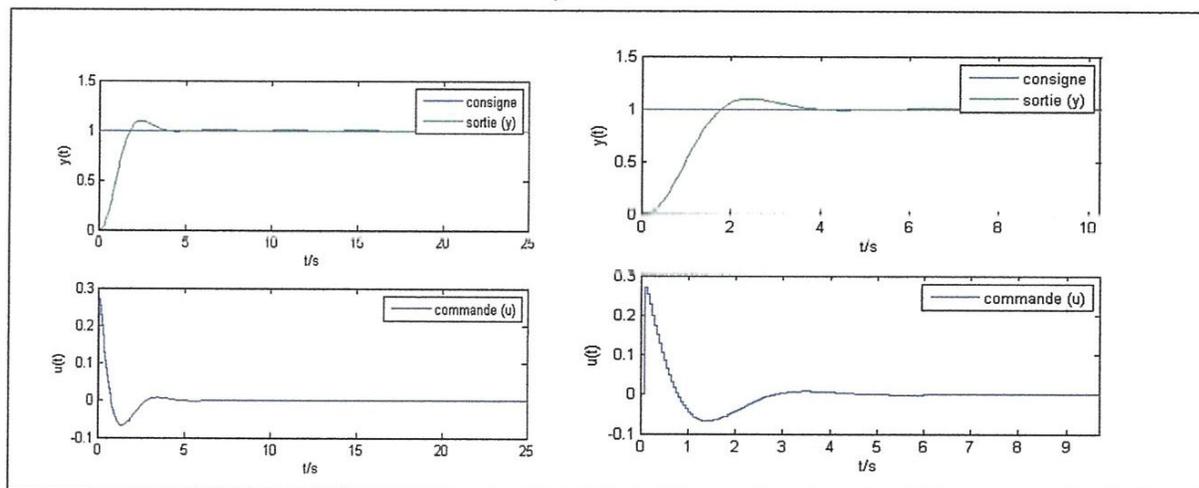
b)



c)



d)



e)

Figure (3.6) L'effet du facteur de pondération λ sur le GPC : a) $\lambda=0.1$, b) $\lambda=0.5$, c) $\lambda=0.8$, d) $\lambda=1$, e) $\lambda=2$

Le Changement de facteur de pondération λ est compris entre 0.1 et 2. L'erreur dans la sortie due de la variation de facteur de pondération λ est montrée par les figures à partir des résultats obtenus pour différentes valeur de λ le système est trouvé plus rapide pour une petite valeur de λ sans oscillation, cependant la diminution de la valeur de λ entraîne un signal de commande de haute énergie

3.4.Rejet de Perturbation :

Dans le but de voir la capacité du GPC dans le rejet des perturbations, on a injecté une perturbation de 10% de la valeur finale de la sortie au niveau de cette dernière a l'instant $t=150$ sec pendant 50 sec, puit on a annuler la perturbation pour bien voir la capacité du GPC pour la récupération de la sortie commandé

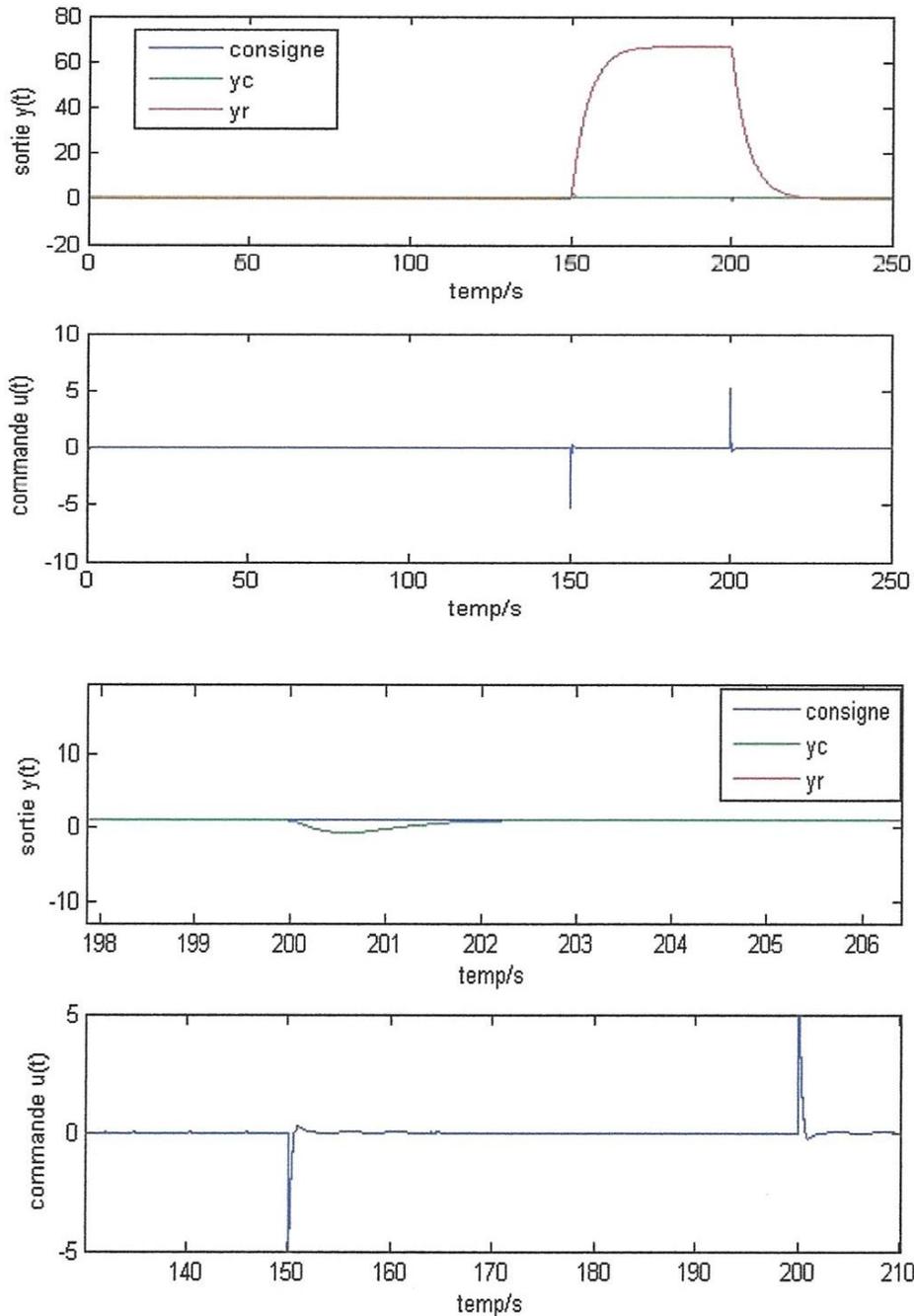


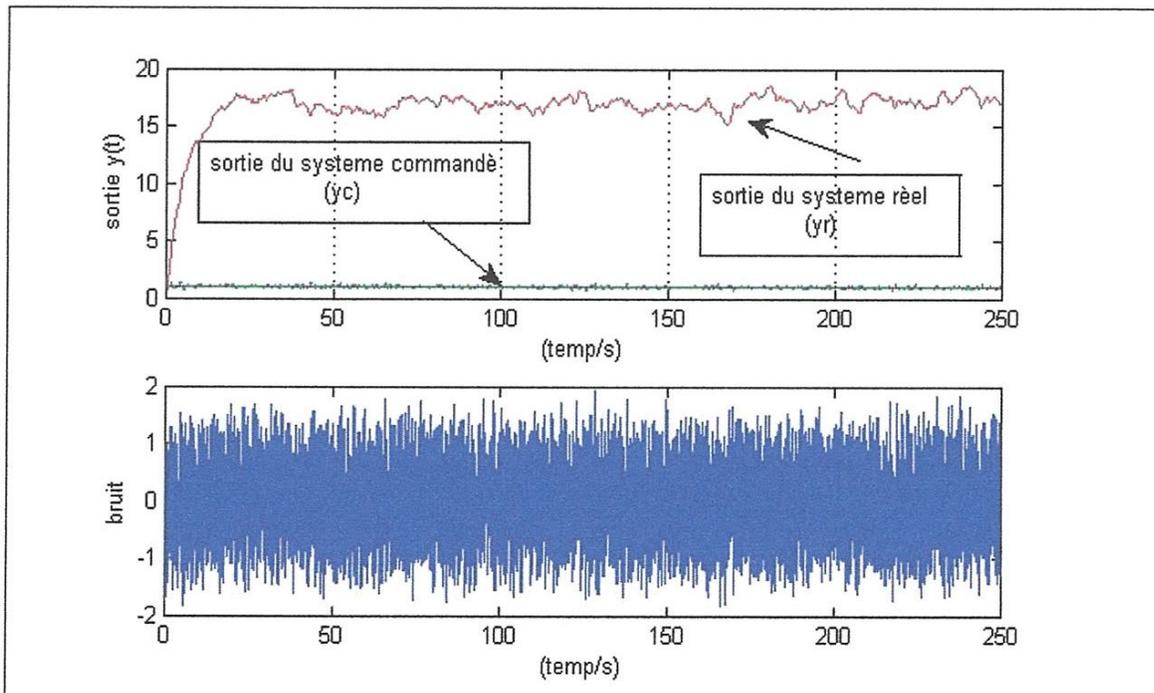
Figure (3.7) Rejetde perturbation par le GPC

On remarque que le GPC est capable de rejeter la perturbation injectée au système à l'instant $t=150$ sec et aussi capable de récupérer la sortie une deuxième fois après l'annulation de la perturbation. Il est clairement remarquée que le système sera endommagé par cette augmentation dans la sortie après l'injection de la perturbation ou la sortie augment à 700% ; l'utilisation de GPC ne permet pas seulement d'obtenir une réponse rapide et stable mais de réagir contre la présence des perturbations qui affecte d'une façon directe sur le processus (réacteur) et assure une bonne stabilité. (Empêcher un mauvais fonctionnement des processus industriels)

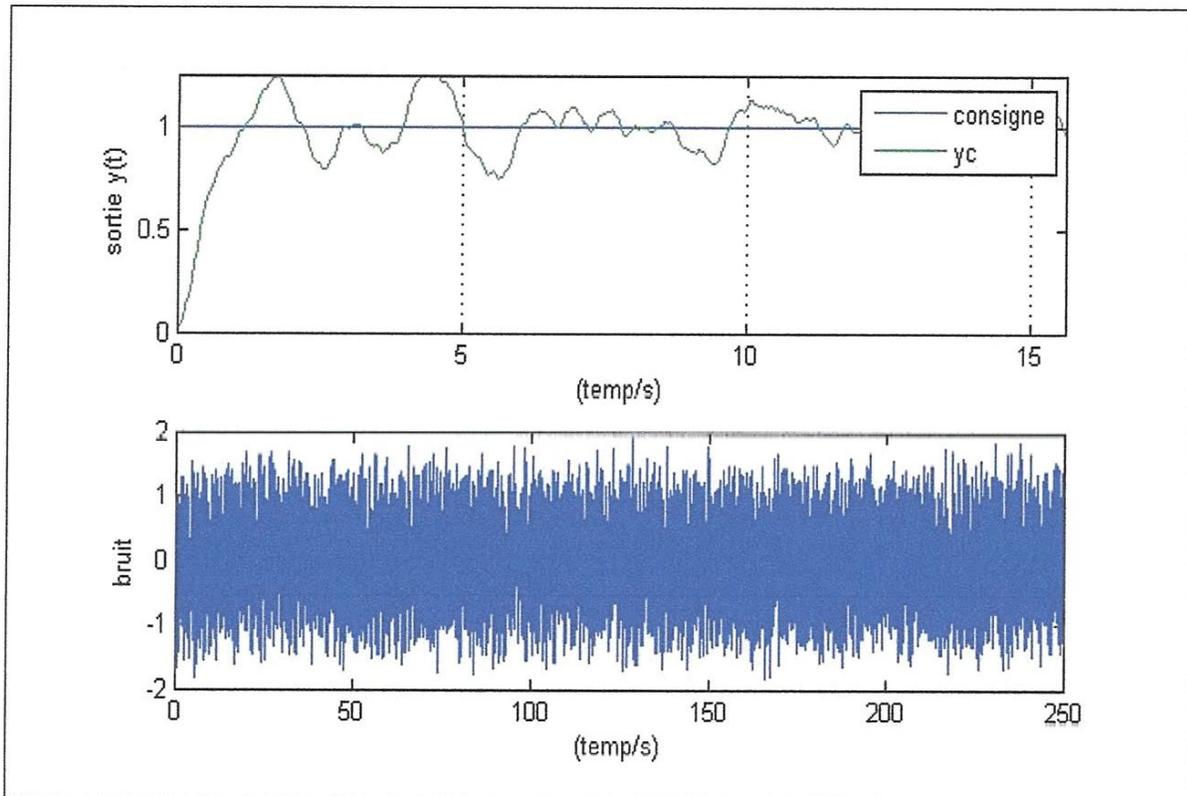
3.5. Commande de système avec la présence du bruit :

L'existence du bruit dans les systèmes est très habituelle dans notre vie réelle, de sorte que la capacité des systèmes de commande dans ces conditions représente un défi pour les concepteurs des contrôleurs

Dans le but de voir l'effet de bruit sur la commande prédictive généralisée, on a utilisé un bruit de 5% (un bruit blanc) une série de simulation a été faite. Les résultats obtenus sont montrés dans la figure 3.8



a)



b)

**Figure (3.8) (a) Commande du système avec la présence du bruit
(b) agrandissement de la figure (a)**

On remarque que le GPC a réussi de minimiser l'effet de bruit et maintenir la sortie du système au tour de point de consigne.

Une comparaison entre la sortie du système bruité et la sortie du système commandé montre le grand avantage apporté par l'utilisation de GPC avec notre système.

3.6. Conclusion :

Ce chapitre a été consacré au développement théorique de l'algorithme de Commande prédictive généralisée GPC.

L'algorithme de commande GPC a été examiné sur le modèle de contrôle de débit d'huile dans le but d'obtenir les meilleures performances. La réponse indicielle de ceux-ci est simulée avec le logiciel Matlab. Plusieurs paramètres sont pratiqués dont lesquels sont pris en comptes

Les contraintes sur la commande. Accordant aux résultats de simulation, la GPC est efficace. Le choix de l'horizon de prédiction, de commande et le facteur de pondération et le compromis Entrée/Sortie sont dépendues l'un des autres. Les performances de la GPC sont clairement démontrées dans nos exemples illustratifs.

Conclusion générale

Le travail dont nous avons rendu compte dans le présent mémoire porte sur une stratégie de commande à horizon fuyant, la commande prédictive généralisée GPC, qui par sa simplicité a fait l'objet d'un grand intérêt dans le domaine industriel. La version linéaire de cette loi de commande a été présentée : sa philosophie, ses concepts et sa mise en œuvre. Les performances réalisées par cette stratégie de commande ont été prouvées à travers un exemple.

La puissance de cette loi de commande prédictive est mise en valeur par une simulation « La commande prédictive de flux de huile dans un réacteur chimique ».

Les résultats obtenus montrent l'efficacité de cette loi de commande dans ce genre d'application. En effet, nous avons pu intégrer des contraintes sur le contrôleur de flux et on a montré la capacité de la commande prédictive généralisée d'éjecter ce genre de contrainte.

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. La prédiction 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.

Références

- [1] **olivierpage**, «*étude et comparaison de différentes structures de commande multi contrôleurs application à un axe robotise* », *l'écolesupérieure d'ingénieurs d'Annecy, université de Savoiejuillet 2001.*
- [2] **M.K.Maazi, E Mendes P, Boucher, D,Dumur** , “ *A new real –time control strategy for induction motor based on a reference control and RST predictive structure* ”, *EPE-EPMC, intern. PowerElect and Motion control conf, pp.6.1845.189, Kosice, republique slovaque September 2000.*
- [3] **J.Richalet,A.Rault,J.L/TestudETJapon** « *model predictive heuristic control: application to contrl processes* » *Automatic, 14(5), pp.413-428, 1978.*
- [4] **D.W. Clarke,C.Mohtadi,andP.S.Tuffs**, “*generalized predictive control:partl:the basic algorithm, part ll: “extensions and interpretation”*”, *Inautomatic,vol.23:2,pp,137-160,1987.*
- [5] **pedro ponce cruz.Jaime J .Rodriguez Rivas**, “*introduction motor space vector control using adaptive reference model direct and indirect methods*” *industrial electronics , proceedings IEEE international symposium, issue ,pp.300-305- vol.1,2000.*
- [6] **P.Boucher, D.Dumur**, “*la commande prédictive*” *Edition technique paris 2000.*
- [7] **Assiyakattani** ,« *la commande prédictive globale multi variable* » *mémoire présenté a la faculté des étudessupérieures de l'universitéLavalCanada pour l'obtention du grade de maitre ès sciences 2000.*

- [8] **Khoudmihouari**, « *construction a l'étude de la commande prédictive des systèmes non linéaires : application a la machine asynchrone* » **école normale supérieur de l'enseignementtechnique d'Oran 2008.**
- [9] **M.Maaziz**, « *commande prédictive de système non linéaire* » : **application ala commande de machine asynchrones ,Thèse de doctorat université paris Xi orsay,2000.**
- [11] **D.W. Clarke** : « *Commande Prédictive Généralisée (G.P.C) (Generalzed Prédicitive Control)* ».1985
- [10] **De J. Richalet** : « *Commande Prédictive Fonctionnelle (P.F.C) (PrédicitiveFunctional Control)* ».1987
- [12] **Azzouzi, M. &Popescu, D.** « *Optimisation d'un réacteur de pyrolyse par SiSCon, »Conférence Internationale Francophone d'Automatique CIFA'2008, Bucharest, June 2008.*
- [13] **Azzouzi, M.** « *Systèmes numériques pour la commande avancée des installations Pétrolières et pétrochimique* », **PhD Thesis, PolitehnicaUniversity of Bucharest.2008.**
- [14] **Harriott, P.** "Chemical reactor design", **pp. 131-142. CRC First Edition, New York.2002.**
- [15] **Landau, Y, D. &Zito, Gianluca.** "Digital Control Systems: Design, Identification andImplementation", **pp. 267-291, First Edition of Springer, Paris.2006.**
- [16] **Popescu, D., Lupu, C., Petrescu, C. &Matescu, M.** « *Sisteme de Conducere a proceselor industrial* », **pp. 24-29, Printech, Bucharest.2006b.**
- [17] **Nicolas Petit**, « *commande prédictive* », **Ecole Centrale Paris, 2006.**

[18]Popescu, D., Stefanoiu, D., Lupu, C., Petrescu, C., Ciubotaru, B. &Dimon, C.
« *Industrial Automation* », *Agir, Bucharest.*(2006a).

[19]Borne, P., Tanguy, G. D., Richard, J. P., Rotelle, F.

&Zambittakis,C3 « *Analyse et régulation des processus industriels ;*

tom »2 :Régulation numérique, pp. 267-275, Technip, Paris. 1993.