

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Automatique

Option : Automatique avancée

Réf:.....

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Thème

Commande prédictive généralisée

Présenté par :

Klaoua Fares

Soutenu le : 01 Juin 2014

Devant le jury composé de :

M^{elle} H. meghabi

Mr K. abada

M^{elle} A. Mihi

MMA

MMA

MMA

Président

Examineur

Encadreur

Année universitaire : 2013 / 2014

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique ET Populaire
وزارة التعليم العالي

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Automatique
Option : Automatique avancée

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Thème

Commande prédictive généralisée

Présenté par :

Klaoua Fares

Avis favorable de

Mihi Assia

Avis favorable du Président du Jury

Nom Et Prénom :

H. meghabi

Signature

Cachet et signature

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Automatique
Option : Automatique avancée

Thème
:

Commande prédictive généralisée

Proposé par : *Klaoua Fares*

Dirigé par : *Mihi Assia*

RESUMES (Français et Arabe)

Français

Nous abordons, dans ce mémoire, la asymptotique de trajectoire basée sur la commande prédictive généralisée (GPC). La GPC est caractérisée par des paramètres, l'horizon de prédiction, intrinsèque et extrinsèque au système. Sa loi de commande résulte de la minimisation d'un critère quadratique basée sur l'erreur de prédiction entre la sortie choisie et le signal de référence correspondant. Elle garantit la stabilité du système en boucle fermée. Dans ce travail, quelques propriétés de la GPC et la garantie de la stabilité pour les systèmes linéaires bouclés résultant sont vérifiées pour un système multi variable (Commande prédictive d'une installation de climatisation).

نناقش في هذه المذكرة مقارنة المسار المعتمد على تقنية التحكم التنبؤي المعمم (GPC) التي تستخدم الخصائص والمعاملات والأفق التنبؤي، أي الأنظمة الجوهرية الخارجية للقدرة التحكم في تقليل درجة الخطأ التنبؤ الذي يعتمد في أساس على الإشارة المرجعية المختارة يضمن استقرار النظام للحلقة المغلقة في هذا العمل. تعمل تقنية التحكم التنبؤ على تحقيق وضمان واستقرار الأنظمة الخطية متعددة تغيرات (السيطرة على التنبؤية تكييف الهواء)

Dédicace

Avant tout je tiens à remercier le bon dieu est l'unique qui m'offre le courage

Et la volonté nécessaire pour affronter la difficulté de la vie

Je dédié ce modeste travail à

A ma mère

A mon père

A mes frères

A tout ma famille

*A mes amis et mes collègues de la promotion 2014 (Machines électrique et électrique de
puissance).*

A mes féaux amis (chaque un à son nom).

Fares Klaoua

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier mon DIEU LE TOUT PUISSANT, qui a rendu cet ouvrage possible

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de thèse Madame Mihî Assia. Professeur à l'Université de Biskra, pour la proposition du sujet de cette thèse et pour ses conseils et son soutien tout au long de ce travail.

Je remercie, tout organe Département de Génie électrique à L'université de Biskra

Nos remerciements à tous les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail

Mes remerciement aussi à :

- ❖ Mes parents :*
- ❖ Mon frère : mes sœur et à toutes ma famille.*
- ❖ Mes amies intimes : (K. Anouar - G. Nasser)*

Un remerciement spécial aux étudiants de la 2^{ème} année Master de la spécialité de génie électrique spécifiquement Automatique avancée

Fares Klaoua

Liste de Tableau

Tableau II.1. Les principaux types de capteurs solaires disponibles sur le marché.	24
---	-----------

Liste de figure

Fig I.1. Principe de l'horizon fuyant.	05
Fig I.2. Principe de fonctionnement de l'algorithme prédictif.	06
Fig I.3 Structure du régulateur polynomial équivalent.	11
Fig II.1 Schéma de principe d'une machine à absorption.	21
Fig.II.2 Schéma de principe d'une machine à adsorption.	22
Fig II.3 Schéma de principe d'un système à dessiccation (dessicant cooling)	23
Fig III. 1. Description du system.	28

Liste d'abréviations

GPC	Generalized Prédictive Control
Nc	Horizon de commande
Np	Horizon de prédiction
IMC	Infernal Model Contrôler
EPSAC	Extended Prédiction Self Adaptive Control
PFC	Prédictive Fonctionna Control
CARIMA	Controlled Auto Régressive Intégrâtes Moving Average
CNA	Convecteur Numérique Analogique
CAN	Convecteur Analogique Numérique
PID	Propositionelle intégral Dérive

Résumé

Nous abordons, dans ce mémoire, la asymptotique de trajectoire basée sur la commande prédictive généralisée (GPC). La GPC est caractérisée par des paramètres, l'horizon de prédiction, intrinsèque et extrinsèque au système. Sa loi de commande résulte de la minimisation d'un critère quadratique basée sur l'erreur de prédiction entre la sortie choisie et le signal de référence correspondant. Elle garantit la stabilité du système en boucle fermée. Dans ce travail, quelques propriétés de la GPC et la garantie de la stabilité pour les systèmes linéaires bouclés résultant sont vérifiées pour un système multi variable (Commande prédictive d'une installation de climatisation)

نناقش في هذه المذكرة مقارنة المسار المعتمد على تقنية التحكم التنبؤي المعمم (GPC) التي تستخدم الخصائص والمعاملات، والأفق التنبؤي، أي الأنظمة الجوهرية الخارجية للقدرة التحكم في تقليل درجة الخطأ التنبؤ الذي يعتمد في أساس على الإشارة المرجعية المختارة والذي بدوره يضمن استقرار النظام للحلقة المغلقة في هذا العمل. تعمل تقنية التحكم التنبؤ على تحقيق وضمان واستقرار الأنظمة الخطية متعددة متغيرات (السيطرة على التنبؤية تكييف الهواء)

SOMMAIRE

Dédicace	
Remerciements	
Liste de Tableau	
Liste de figure	
Liste d'abréviations	
Résumés	
Sommaire	
Introduction générale	

Chapitre I

Commande prédictive

I.1. Introduction.....	04
I.2. Commande prédictive.....	04
I.2.1. Généralités.....	04
I.2.2. Principe.....	05
I.3. Différents types d'horizon.....	08
I.4. Commande prédictive généralisée.....	07
I.4.1 Modèle numérique de prédiction	07
I.4.2 Structure du prédicteur optimal	07
I.4.3 Fonction de coût.....	09
I.4.4 Structure du régulateur polynomial	10
I.5 Régulateur polynomial équivalent.....	11
I.5.1 Choix des paramètres de réglage.....	13
I.5.2 Réglage des quatre paramètres du critère	13
I.5.2 Prise en compte du polynôme de perturbation	13
I.6 Conclusion.....	15

Chapitre II

Conditionnement d'air *par énergie solaire*

II.1 Introduction	17
II.2. Climatisation solaire	18
II.2.1. Présentation	18
II.2.2. Principe de fonctionnement	18
II.2.3. Avantages de la climatisation solaire	19
II.3. Dimensionnement du système et champ des possibles en la matière	19
A. Quel type de climatisation solaire existe-t-il	20
B. Comment fonctionne une climatisation solaire	20
C. Qu'est ce qu'une machine à absorption	20
D. Qu'est ce qu'une machine à adsorption	21
E. Qu'est ce qu'une machine à dessiccation	22
F. Quelle est son impact sur l'environnement	23
II.3.1. Capteurs solaires.....	23
4. Conclusion	26

Chapitre III

Simulation et résultats

III.1 Introduction.....	28
III.2 Description du système	28
III.3. Stratégie de contrôle.....	30
III.3.1. Systèmes de premier ordre.....	30
III.4. Simulation	31
Les paramètres de réglage du régulateur sont	31
III.3 Conclusions.....	33
Conclusions générale	35
Bibliographie	37
Annexe	40

INTRODUCTION

Générale

Introduction générale

La commande prédictive 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 : Infernal Model Control*). La commande prédictive peut être utilisée pour commander des systèmes complexes comportant plusieurs entrées et sorties où 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...

Le concept de commande prédictive est apparu dès la fin des années 1970 introduit simultanément par J .Richalet, D.W.Clarke et C.R.Cutler et B.L.Ramaker. Il a atteint désormais un niveau de maturité qu'atteste le nombre important d'applications industrielles recensées dans de nombreux domaines d'activité. De fait, les multiples stratégies prédictives (DMC pour Dynamic Matrix Control, EPSAC pour Extended Prediction Self-Adaptive Control, GPC pour Generalized Predictive Control, PFC pour Predictive Functional Control ...) ont prouvé leur capacité à garantir des performances accrues tout en s'avérant simple d'implantation. La commande prédictive généralisée est souvent utilisée avec en plus une adaptation en ligne du modèle utilisé pour réaliser les prédictions.

Le but essentiel de ce travail de mémoire est de vérifier la poursuite de trajectoire basée sur la commande prédictive avec garantie de stabilité tout en minimisant une fonction coût. La commande prédictive cherche à définir des lois de commande optimales pour un système donné.

Ce travail de mémoire présente l'application d'un contrôleur prédictif à un système de climatisation solaire. Le caractère variable dans le temps du processus rend nécessaire un ajustement des paramètres du régulateur pour faire varier les conditions de fonctionnement. Le but est de vérifier la poursuite de trajectoire basée sur la commande prédictive avec garantie de stabilité tout en minimisant une fonction coût. La commande prédictive cherche à définir des lois de commande optimales pour un système donné.

Le comportement et le caractère adaptatif du contrôleur sont illustrés par les résultats de simulation.

Le mémoire est organisé comme suit.

Dans le chapitre 1, nous présentons le principe de la commande prédictive dans le cadre spécifique de la commande prédictive généralisée (GPC) et les différentes étapes algorithmiques d'une commande prédictive.

Nous abordons, dans le chapitre 2, les différentes techniques de la climatisation solaire.

Nous présentons dans le chapitre 3, l'exemple d'application proposé et les résultats de simulation obtenus.

Enfin, nous faisons, une conclusion générale.



II **RELIANCE** **CHAMP** **LIBRE** **ET** **PROGRES**

COMMANDE
Prédictive

COMMANDE PREDICTIVE

I.1. Introduction

La philosophie de la commande prédictive se résume à “utiliser le modèle pour prédire le comportement du système et choisir la décision la meilleure au sens d’un certain coût tout en respectant les contraintes”. La commande prédictive (ou compensation 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.

I.2. Commande prédictive

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 ou aussi PFC: "Predictive Functional Control". Cette méthode a été inventée par un français, J. Richalet, en 1978 et généralisée par D.W. Clarke en 1987 en accord avec de grands groupes industriels aux États-Unis et en Europe (Shell et Adersa).

I.2.1. Généralités

La commande prédictive peut être utilisée pour commander des systèmes complexes comportant plusieurs entrées et sorties où 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 :

- L'idée générale est intuitive et facile à comprendre.
- Permet de respecter les contraintes sur les variables contrôlées et manipulées.
- 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.
- En cas de perturbations mesurables, le système s'adapte automatiquement.
- Permet en général un réel gain financier.



La commande prédictive est un terme général qui englobe un ensemble 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. Cette technique est utilisée en majorité par des industries employant des échanges thermiques dans leur procédés (chimie, pétrochimie)⁵

I.2.2. Principe

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

1. Calcul des prédictions des variables contrôlées jusqu'à un horizon de temps N_2 grâce au modèle interne.
2. Élaboration d'une trajectoire de référence à suivre.
3. Calcul de la future loi de commande à appliquer sur les variables manipulées jusqu'à un horizon temporel N_u .
4. 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.

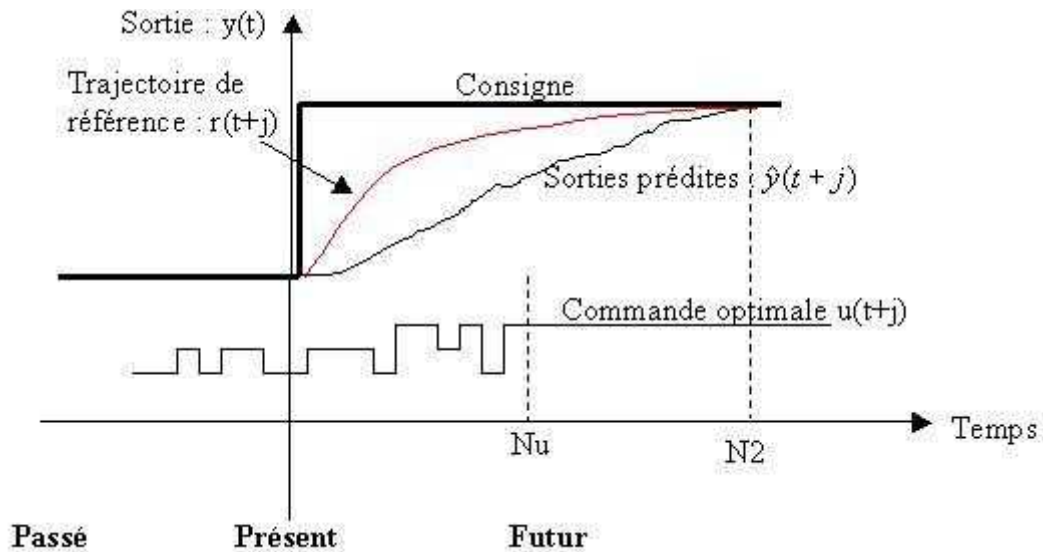


Fig I.1. Principe de l'horizon fuyant.

Les principes que l'on vient d'évoquer permettent d'établir le schéma de fonctionnement de la figure I.1



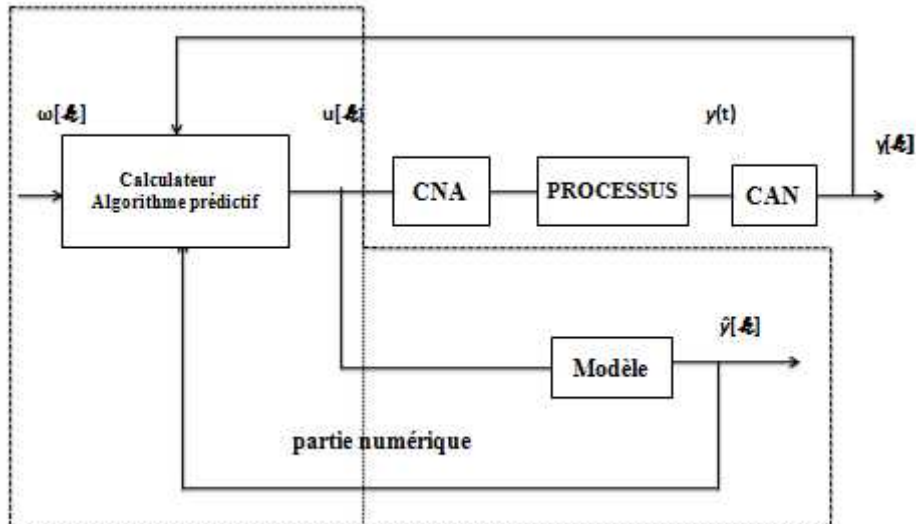


Fig I.2. Principe de fonctionnement de l'algorithme prédictif.

Le principe de l'horizon fuyant fait que seule la commande à l'instant présent $u[k]$ est appliquée sur le système. Il est alors possible de restreindre le nombre de valeurs calculées de la séquence.

I.3. Différents types d'horizon

Une idée importante de la commande prédictive est la notion d'horizon. Nous définissons deux horizons dans cette partie :

- L'horizon de contrôle N_u est le nombre d'actions successives sur l'entrée du procédé (ou variable manipulée) que l'on s'autorise à faire pour amener la sortie à la valeur désirée. Au bout de N_u pas de temps, on suppose que l'entrée reste constante.
- L'horizon de prédiction N_y est l'horizon sur lequel on prédit la sortie du procédé et sur lequel on cherche à lui faire suivre une consigne donnée, et ceci en faisant N_u actions sur la variable d'entrée. L'évolution du procédé au-delà de N_y pas de temps n'est pas prise en compte dans le critère à minimiser pour le calcul de l'action à effectuer.
- L'horizon de modèle N_p : la valeur de N_p est telle que à l'instant $N_p T_e$, la réponse du procédé a atteint 95 à 99% de sa valeur finale.



I.4. Commande prédictive généralisée

La commande prédictive généralisée est souvent utilisée avec en plus une adaptation en ligne du modèle utilisé pour réaliser les prédictions.

Ce paragraphe a pour but de préciser les points fondamentaux de la structure prédictive considérée (GPC), depuis la traduction mathématique des concepts généraux précédents jusqu'à l'obtention de la loi de commande. On envisagera, donc successivement le formalisme du modèle, la structure du prédicteur, la définition du critère et sa minimisation.

I.4.1 Modèle numérique de prédiction

L'approche polynomiale entrée/sortie par fonction de transfert est privilégiée. Dans ce cas, le modèle est classiquement représenté sous forme CARIMA (*Controlled AutoRegressive Integrated Moving Average*) :

$$A(q^{-1})y[k] = B(q^{-1})u[k-1] + \frac{C(q^{-1})\xi[k]}{\Delta(q^{-1})} \quad (1.1)$$

Où $(q^{-1})=1- q^{-1}$, u et y sont respectivement l'entrée et la sortie du modèle, $C(q^{-1})$ est un polynôme dit de perturbations, ξ est un bruit blanc centré, q^{-1} l'opérateur retard et $A(q^{-1})$, $B(q^{-1})$, Et $C(q^{-1})$ des polynômes définis par :

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_{n_A}q^{-n_A} \quad (1.2)$$

$$B(q^{-1}) = b_0 + b_1q^{-1} + \dots + b_{n_B}q^{-n_B} \quad (1.3)$$

$$C(q^{-1}) = 1 + c_1q^{-1} + \dots + c_{n_C}q^{-n_C} \quad (1.4)$$

Ce modèle, permet d'introduire au final une action intégrale au sein du régulateur prédictif, garantissant ainsi l'annulation de toute erreur statique vis-à-vis d'une entrée ou d'une perturbation en échelon.

I.4.2 Structure du prédicteur optimal

La sortie prédite $y[k + j/k]$ est décomposée de façon classique en réponse libre et réponse forcée, permettant de séparer les contributions liées au présent et au passé des contributions futures, sous la forme :

$$y[k + \frac{j}{k}] = \underbrace{\frac{F_j(q^{-1})}{\Delta(q^{-1})} y[k]}_{\text{réponse libre}} + \underbrace{\frac{H_j(q^{-1})}{\Delta(q^{-1})} \Delta u[k-1]}_{\text{réponse forcée}} \quad (1.5)$$

A l'aide de la réécriture des équations (I.1) et (I.2) :

$$\begin{aligned} A(q^{-1})\Delta(q^{-1})y[k+j] &= B(q^{-1})\Delta u[k+j-1] + C(q^{-1})\xi[k+j] \quad (1.6) \\ C(q^{-1}) - q^{-j}F_j(q^{-1}) &| y[k+j] \\ &= C(q^{-1})G_j(q^{-1}) + q^{-j}H_j(q^{-1})\Delta u[k+j-1] + C(q^{-1})J_j(q^{-1})\xi[k+j] \end{aligned}$$

Et par égalité entrée/sortie des fonctions de transfert sortie/bruit et commande/bruit, les polynômes inconnus F_j , G_j , H_j , J_j , sont solutions minimales uniques d'équations diophantiennes :

$$\Delta(q^{-1})A(q^{-1})J_j(q^{-1}) + q^{-j}F_j(q^{-1}) = C(q^{-1}) \quad (1.7)$$

$$C(q^{-1})G_j(q^{-1}) + q^{-j}H_j(q^{-1}) = B(q^{-1})J_j(q^{-1}) \quad (1.8)$$

avec :

$$\text{Degré } |J_j(q^{-1})| = j-1 \quad \text{degré } |F_j(q^{-1})| = \max(\text{degré}[A(q^{-1})], \text{degré}[C(q^{-1})] - j)$$

$$\text{Degré } |G_j(q^{-1})| = j-1 \quad \text{degré } |H_j(q^{-1})| = \max(\text{degré}[B(q^{-1})] - 1, \text{degré}[C(q^{-1})] - 1)$$

L'ensemble des calculs peut être effectué hors boucle temps réel. Dans ces conditions, tous les prédicteurs sont stockés et interviennent lors de l'élaboration finale du régulateur, comme il sera mentionné lors du paragraphe I.2.

Remarque : de façon pratique, les équations diophantienne précédentes peuvent se résoudre par division polynomiale de la façon suivante.

Pour la première :

$$J_j(q) = \frac{q^{n_a+j-n_c}C(q)}{(q)A(q)} \quad \text{Degré de } J_j(q) = j-1 \quad (1.9)$$

$$F_1(q) = \left\lfloor \frac{q^{n_a+j-n_c}C(q)}{[\Delta(q)A(q)]} \right\rfloor \quad \text{Degré de } F_j(q) = n_a \quad (1.10)$$

Les polynômes doivent alors être exprimés en puissances positives de q . Pour un polynôme $P(q)$ de degré n_p on notera donc :



$$p(q^{-1}) = P(q)q^{-n_f} \quad (\text{I.11})$$

Ainsi pour le polynôme F_j , il faut prendre en compte que si $n_c - j > n_a$, $F_j(q)$ possède des coefficients avec des puissances négatives de q . Dans ce cas $F_j(q^{-1})$ est tel que :

$$F_j(q^{-1}) = F_j(q)q^{-n_a} \quad \text{Degré } F_j(q^{-1}) = \max(n_a, n_c - j) \quad (\text{I.12})$$

Pour la deuxième :

$$G_j(q) = \left| \frac{q^{n_c - n_b} j_j(q) B(q)}{C(q)} \right| \quad \text{Degré de } G_j(q) = j - 1 \quad (\text{I.13})$$

$$H_j(q) = \text{Reste} \left| \frac{q^{n_c - n_b} j_j(q) B(q)}{C(q)} \right| \quad \text{Degré de } H_j(q) = n_c - 1 \quad (\text{I.14})$$

Pour le polynôme H_j , il faut prendre en compte $n_b - 1 > n_c - 1$, $H_j(q)$ possède des coefficients avec des puissances négatives de q . Dans ce cas $H_j(q^{-1})$ est tel que :

$$H_j(q^{-1}) = H_j(q)q^{-n_c + 1} \quad \text{Degré de } H_j(q^{-1}) = \max(n_c - 1, n_b - 1) \quad (\text{I.15})$$

Le prédicteur optimal est enfin défini en considérant que la meilleure prédiction du bruit dans le futur est sa moyenne (supposée nulle ici), soit :

$$\hat{y}[k + j/k] = \frac{F_j(q^{-1})}{C(q^{-1})} y[k] + \frac{H_j(q^{-1})}{C(q^{-1})} \Delta u[k - 1] + G_j(q^{-1}) \Delta u[k + j - 1] \quad (\text{I.16})$$

I.4.3 Fonction de coût

La loi de commande GPC est obtenue par minimisation d'un critère quadratique à horizon fini portant sur les erreurs futures avec un terme de pondération sur la commande :

$$J = \sum_{j=\bar{N}_1}^{N_2} (\hat{y}[k + j] - w[k + j])^2 + \lambda \sum_{j=1}^{N_u} \Delta u^2[k + j - 1] \quad (\text{I.17})$$

avec:

$$\Delta u[k + j] = 0 \quad \text{pour } j \geq N_u \quad (\text{I.18})$$

Le critère, outre le polynôme $C(q^{-1})$, nécessite la définition de quatre paramètres de réglage :

- N_1 : horizon de prédiction minimal;



- N_2 : horizon de prédiction maximal;
- N_3 : horizon de prédiction sur la commande;
- : coefficient de prédiction sur la commande;

Le paramètre N_u permet de réduire le nombre de commandes futures calculées, puisque selon le principe de l'horizon glissant, seule la première valeur de la séquence de commandes futures est appliquée, les autres étant oubliées.

I.4.4 Structure du régulateur polynomial

La minimisation du critère nécessite la mise sous forme matricielle de l'équation de prédiction (I.22) et de la fonction de coût (I.23), soit respectivement :

$$J(\tilde{u}) = \left(G\tilde{u} + \frac{1}{c(q^{-1})} if y[k] + \frac{1}{c(q^{-1})} ih u[k-1] - w \right)^T \quad (I.19)$$

$$\left(G\tilde{u} + \frac{1}{c(q^{-1})} if y[k] + \frac{1}{c(q^{-1})} ih \Delta u[k-1] - w \right) + \lambda_{\tilde{u}}^T \tilde{u} \quad (I.20)$$

$$if = [FN_1(q^{-1}) \dots FN_2(q^{-1})]^T \tilde{u} = [\Delta u[k] \dots \Delta u[k + N_u - 1]] \quad (I.21)$$

$$ih = [H_{N_1}(q^{-1}) \dots H_{N_2}(q^{-1})]^T \hat{y} = [\hat{y}[k + N_1] \dots \hat{y}[k + N_2]] \quad (I.22)$$

$$w = [w[k + N_1] \dots w[k + N_2]]^T \quad (I.23)$$

$$G = \begin{bmatrix} g_{N_1}^{N_2} & g_{N_1-1}^{N_1} & \dots & \dots \\ g_{N_1+1}^{N_1+1} & g_{N_1}^{N_1+1} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ g_{N_2}^{N_2} & g_{N_2-1}^{N_2} & \dots & \dots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{N_1} & g_{N_1-1} & \dots \\ g_{N_1+1} & g_{N_1} & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ g_{N_2} & g_{N_2-1} & \dots \end{bmatrix} \quad (I.24)$$

Notons que les coefficients des polynômes $\{G_j\}$ intervenant dans la matrice G sont en fait les coefficients de la réponse indicielle discrète du modèle (I. 7).

La solution optimale du problème (I.26) est alors obtenue par minimisation analytique de ce critère sous forme matricielle :

$$j(\tilde{u}) = \tilde{u}^T (G^T G + \lambda I_{N_u}) \tilde{u} + 2\tilde{u}^T G^T \left(\frac{1}{c(q^{-1})} if y[k] + \frac{1}{c(q^{-1})} ih u[k-1] - w \right) + \left(\frac{1}{c(q^{-1})} if y[k] + \frac{1}{c(q^{-1})} ih \Delta u[k-1] - w \right)^T \left(\frac{1}{c(q^{-1})} if y[k] + \frac{1}{c(q^{-1})} ih \Delta u[k-1] - w \right) \quad (I.25)$$

Soit :

$$\frac{\partial j(\tilde{u})}{\partial \tilde{u}} = 2(G^T G + \lambda I_{N_u}) \tilde{u} + 2G^T \left(\frac{1}{c(q^{-1})} if y[k] + \frac{1}{c(q^{-1})} ih u[k-1] - w \right) \quad (I.26)$$

L'annulation de cette dérivée fournit la solution optimale :

$$\tilde{u}_{opt} = (G^T G + \lambda I_{N_u})^{-1} G^T \left(w - \frac{1}{C(q^{-1})} If \gamma[k] - \frac{1}{C(q^{-1})} Ih \Delta u[k-1] \right) \quad (I.27)$$

De façon classique en commande prédictive, seule la première valeur de la séquence est appliquée au système, selon le principe de l'horizon fuyant :

$$\Delta u_{opt}[k] = n_1^T \left(w - \frac{1}{C(q^{-1})} If \gamma[k] - \frac{1}{C(q^{-1})} Ih \Delta[k-1] \right) \quad (I.28)$$

Avec:

$$N = (G^T G + \lambda I_{N_u})^{-1} G^T = \begin{bmatrix} n_1^T \\ \vdots \\ n_{N_u}^T \end{bmatrix} \quad (I.29)$$

I.5 Régulateur polynomial équivalent

L'équation (I.8) correspond à un correcteur linéaire pouvant se structurer sous forme RST, comme indiqué figure I.1, selon la relation :

$$s(q^{-1}) \Delta u[k] = -R(q^{-1}) \gamma[k] + T(q^{-1}) w[k + N_2] \quad (I.30)$$

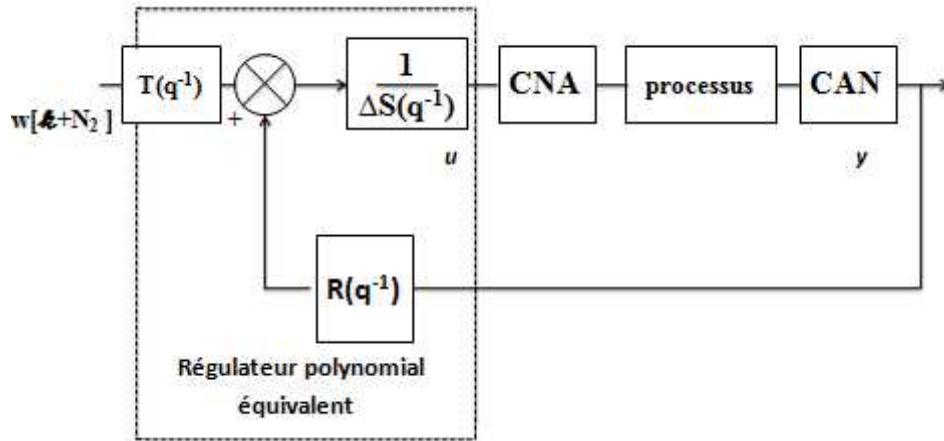


Fig I.3 Structure du régulateur polynomial équivalent.

En effet, la relation (I.8) s'écrit également :

$$\begin{aligned} C(q^{-1}) \Delta u_{opt}[k] &= C(q^{-1}) n_1^T w - n_1^T If \gamma[k] - n_1^T Ih \Delta_{opt}[k-1] \\ &= C(q^{-1}) n_1^T \begin{bmatrix} w(t + N_1) \\ \vdots \\ w(t + N_2) \end{bmatrix} - n_1^T If \gamma[k] - n_1^T Ih(q^{-1}) \Delta u_{opt}[k] \end{aligned} \quad (I.31)$$

Soit:

$$S(q^{-1}) \Delta u_{opt}[k] = C(q^{-1}) n_1^T \left[\begin{array}{c} q^{N_1-N_2} \\ \vdots \\ w(t+N_2) - \frac{n_1^T I f \gamma[k]}{R(q^{-1})} \end{array} \right] \quad (I.32)$$

Les trois polynômes R, S, T prennent donc la forme suivante :

$$S(q^{-1}) = C(q^{-1}) + n_1^T i h(q^{-1}) \quad (I.33)$$

$$R(q^{-1}) = n_1^T i f \quad (I.34)$$

$$T(q^{-1}) = C(q^{-1}) T_1(q^{-1}) = C(q^{-1}) n_1^T [q^{N_1-N_2} \dots q^0]^T \quad (I.35)$$

Avec :

$$\text{Degré}[S(q^{-1})] = \max(\text{degré}[B(q^{-1})]; \text{degré}[C(q^{-1})]) \quad (I.36)$$

$$\text{Degré}[R(q^{-1})] = \max(\text{degré}[A(q^{-1})]; \text{degré}[C(q^{-1})] - N_1) \quad (I.37)$$

$$\text{Degré}[T(q^{-1})] = \text{degré}[C(q^{-1})] + N_2 - N_1 \quad (I.38)$$

On remarque l'effet anticipatif inhérent à la commande prédictive, apporté par le préfiltre non causal $T(q^{-1})W(t+N_2)$. Cet effet anticipatif est d'autant plus marqué que l'horizon de prédiction maximal est important.

L'intérêt qui se dégage de la représentation RST très générale est que finalement la boucle temps réel s'avère très peu gourmande en temps de calcul, puisque la commande appliquée au système se calcule par une simple équation aux différences (2.10). Les trois polynômes R, S, T sont en effet élaborés hors ligne et définis de façon unique dès lors que les quatre paramètres de réglage sont choisis.

Un autre intérêt majeur de cette structure RST concerne l'étude de la stabilité de la boucle corrigée, et donc la caractérisation de la stabilité de la commande prédictive élaborée, qui est dès lors possible pour un jeu de paramètre du critère fixé.

I.5.1 Choix des paramètres de réglage

I.5.2 Réglage des quatre paramètres du critère

La définition du critère quadratique (I.4) a montré que l'utilisateur doit fixer quatre paramètres de réglage. Ce choix des paramètres s'avère cependant délicat car il n'existe pas de relations empiriques permettant de relier ces paramètres à des indicateurs classiques en automatique, tels que marges de stabilité ou bande passante.

A partir de l'étude d'un grand nombre de systèmes types, il est cependant possible de dégager les quelques règles suivantes:

- N_1 : horizon de prédiction inférieur sur la sortie. Le produit $N_1.T_e$ (T_e période d'échantillonnage) est choisi égal au retard pur du système;
- N_2 : horizon de prédiction supérieur sur la sortie. Le produit $N_2.T_e$ est limité par la valeur du temps de réponse. Plus N_2 est grand, plus le système corrigé est stable et lent;
- N_u : horizon de prédiction sur la commande. Choisir N_u égal à 1 simplifie les calculs.
- λ : coefficient de pondération sur la commande. Ce paramètre est lié au gain du système, par la relation empirique :

$$\lambda_{opt} = tr(G^T G) \quad (I.39)$$

Où G est la matrice des coefficients de la réponse indicielle de modèle décrite au paragraphe 2.2.4.

I.5.2 Prise en compte du polynôme de perturbation

Une technique classique de robustification de la commande GPC est l'utilisation du polynôme dit de perturbation $C(q^{-1})$ du modèle CARIMA comme paramètre de réglage. Cet aspect est en fait primordial uniquement en **régulation**, puisque le polynôme de perturbation n'intervient pas lors du calcul de la fonction de transfert entrée / sortie en boucle fermée, il ne peut donc modifier la dynamique de suivi de trajectoire.

La fonction de transfert en boucle fermée entre l'entrée et la sortie n'est pas modifiée par le polynôme $C(q^{-1})$; en revanche $C(q^{-1})$ influence le transfert entre la perturbation et la sortie. Ce polynôme modélisant l'influence du bruit dans le système.

L'influence du bruit au sein du système étant généralement impossible à identifier, le polynôme $C(q^{-1})$ peut être utilisée comme paramètre de réglage. Ce polynôme $C(q^{-1})$ joue un rôle uniquement sur le comportement en rejet de perturbation et sur la robustesse vis-à-vis de bruits (par exemple influence du bruit de mesure sur la commande). Là encore il n'existe pas de règle analytique quant au choix de ce polynôme.

Le choix du polynôme $C(q^{-1})$ résulte donc le plus souvent d'un compromis. Notons que l'on trouve dans littérature des méthodes d'optimisation permettant d'effectuer le choix de ce polynôme.

I.6 Conclusion

Ce chapitre présente la stratégie de la commande prédictive, l'idée centrale et l'intérêt de cette approche. Tous ces concepts sont détaillés dans le cadre spécifique de la commande prédictive généralisée (GPC), dans le cas de systèmes linéaires mon variable invariants. Les différentes étapes algorithmiques d'une commande prédictive généralisée (GPC). Les techniques prédictives présentent cependant une complexité accrue du choix des paramètres de réglage, non seulement par un nombre plus élevé, mais également liée à une interaction plus forte entre ces paramètres.

TECHNIQUE

*Conditionnement
d'air par
énergie solaire*

CONDITIONNEMENT D'AIR PAR ENERGIE SOLAIRE**II.1 Introduction :**

Utiliser l'énergie solaire pour produire du froid peut revêtir plusieurs aspects mais l'objectif final est toujours de **limiter l'utilisation d'une climatisation classique** réputée pour ses impacts négatifs sur l'environnement.

Un climatiseur traditionnel produit du froid en comprimant un fluide dit « frigorigène » ou « réfrigérant » qui a la capacité d'absorber de grosse quantité de chaleur (calories) lorsqu'il passe de sa phase liquide à sa phase gazeuse au niveau de l'évaporateur. Un climatiseur consomme par conséquent de l'électricité pour actionner le compresseur et du fluide frigorigène. En effet, bien qu'il soit en circuit fermé, les fuites de fluide ne sont pas rares.

Les impacts sur la consommation d'électricité et l'environnement sont donc loin d'être négligeables sachant que les fluides frigorigènes sont des gaz à effet de serre dont le pouvoir de réchauffement est beaucoup plus élevé que celui du CO₂ : jusqu'à 2.000 fois et plus. Utiliser l'énergie solaire pour ces installations vise donc à limiter ces impacts. Dans le cas de la climatisation solaire, l'énergie calorifique délivrée par le système solaire est utilisée par des machines de production de froid ou de traitement d'air pour produire de l'énergie frigorifique permettant d'assurer le rafraîchissement des locaux. Selon l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), il faut parler plus précisément de « **systèmes de conditionnement d'air des bâtiments assistés par le solaire** ». Autrement dit, l'alimentation de l'installation repose sur un **mix énergie solaire/énergie conventionnelle**, la contribution solaire pouvant aller de quelques pourcent à 100 % théoriquement.

Lorsque l'installation fonctionne uniquement grâce à la ressource solaire, le système ne permet alors d'obtenir qu'une diminution de la température de l'air du local de quelques degrés par rapport à l'air extérieur : on parle alors de rafraîchissement. À l'inverse, une installation associant systèmes solaire et d'appoint permet de maintenir une ambiance thermique et hygrométrique constante dans les locaux, quelles que soient les conditions extérieures : on parle alors de climatisation, explique l'ADEME dans une note de synthèse.

II.2. Climatisation solaire :

II.2.1. Présentation :

La **climatisation solaire** désigne l'ensemble des techniques de climatisation utilisant l'énergie solaire comme ressource énergétique primaire.

Il existe 4 moyens de produire du froid à partir de l'énergie solaire :

- utiliser le solaire photovoltaïque pour alimenter un climatiseur traditionnel en électricité
- convertir l'énergie solaire thermique en énergie mécanique couplée avec un climatiseur à compression.
- utiliser l'énergie solaire thermique pour alimenter une machine à froid dite "à sorption" (absorption ou adsorption).
- utiliser l'énergie solaire thermique pour alimenter un système de conditionnement d'air par évaporation ou DEC.

Actuellement, les systèmes de rafraîchissement les plus répandus sont les **systèmes "à sorption"** et les systèmes de **climatisation par évaporation**.

L'alimentation d'un groupe à compression classique par des panneaux photovoltaïques n'est pas envisageable actuellement, essentiellement pour des questions de coût des panneaux. Selon l'Institut national du Solaire (INES), *dans quelques décennies, lorsque le prix de ces derniers aura suffisamment diminué, et que des groupes frigorifiques utilisant des fluides frigorigènes sans impacts sur l'effet de serre ou la couche d'ozone seront disponibles, il faudra se poser la question.*

Parmi les quatre voies possibles, les deux dernières ont fait l'objet de nombreux travaux de recherche car elles sont les plus prometteuses. Aujourd'hui les technologies sont abouties. De nombreuses installations de démonstration ont été construites avant un développement à grande échelle.

II.2.2. Principe de fonctionnement :

La technique de climatisation solaire la plus courante utilise des capteurs solaires pour fournir de la chaleur à **une machine à absorption**. Cette machine dissocie par ébullition une solution d'eau et de bromure de lithium.

Après refroidissement, la recombinaison des deux composants produit du froid qui peut être distribué comme dans un système de climatisation classique.

Les **machines à adsorption** sont pour l'instant moins répandues que les précédentes, mais présentent un grand intérêt pour l'avenir de la climatisation grâce à l'énergie solaire.

Comme les machines à absorption, elles produisent de l'eau glacée qui peut être utilisée dans une centrale de traitement d'air ou dans un réseau d'eau alimentant des installations décentralisées.

Il existe par ailleurs des systèmes ouverts où l'eau est en contact direct avec l'air à refroidir.

Ces systèmes de **climatisation par dessiccation** ou **climatisation par évaporation** augmentent l'humidité de l'air et réduisent la température ambiante.

II.2.3. Avantages de la climatisation solaire :

Quelle que soit la technique utilisée (absorption, adsorption ou DEC), la climatisation solaire permet d'exploiter **une énergie renouvelable et gratuite**.

Elle offre **une solution de climatisation propre**. Les fluides frigorigènes employés sont totalement inoffensifs pour l'environnement (à la différence des fluides utilisés dans les systèmes conventionnels). Par ailleurs, la climatisation solaire permet de réduire les émissions de CO₂.

Elle a aussi pour avantage de pouvoir fournir le plus de froid quand il fait le plus chaud, dans les périodes où le soleil est le plus disponible. Efficaces et silencieuses, ces technologies ont une durée de vie plus longue que les systèmes de réfrigération classiques (25 ans contre 10 ou 15 ans pour un système classique).

En revanche, elles sont encore en phase de développement et sont plus chères que les systèmes classiques.

On trouve généralement les systèmes de climatisation thermique dans les grandes installations industrielles et commerciales telles que les hôtels, les bureaux, les usines et les entrepôts.

Les systèmes de climatisation thermique solaire actuels ne coûtent nettement plus cher que les systèmes de climatisation électrique.

II.3. Dimensionnement du système et champ des possibles en la matière :

Les systèmes solaires de climatisation sont généralement utilisés dans des applications industrielles ou commerciales à grande échelle entraînant une demande de climatisation importante. Associer des systèmes solaires de climatisation à un système de chauffe-eau solaire pendant toute l'année augmente leur efficacité. Les principaux composants d'un système solaire de climatisation sont les isolateurs, les réservoirs d'entreposage et le système de climatisation thermique. En règle générale, on utilise des capteurs plans de type vitré ou sous-vire en fonction de la température désirée pour le

système de climatisation thermique. Pour les températures plus élevées (dépassant 80°C), on utilise généralement des capteurs sous-vide.

Les isolateurs thermiques convertissent directement l'énergie du soleil en énergie thermique utilisable. La chaleur produite par les isolateurs est transférée à un système de climatisation thermique par un fluide d'échange de chaleur.

A. Quel type de climatisation solaire existe-t-il ?

Il faut savoir qu'il existe trois types de climatisation solaire, la machine à absorption, la machine à adsorption et la machine à dessiccation.

B. Comment fonctionne une climatisation solaire ?

L'expression « climatisation solaire » désigne l'ensemble des moyens de climatiser en utilisant comme ressource énergétique primaire la chaleur du soleil. Ce mode de climatisation qui peut se substituer à l'utilisation de ressources fossiles présente comme principal intérêt de pouvoir fournir le plus de froid quand il fait le plus chaud, ce qui correspond généralement aux périodes où le soleil est le plus disponible.

C. Qu'est-ce qu'une machine à absorption ?

La machine à absorption en cycle fermée utilise une solution d'eau et de bromure de lithium. La compression thermique est obtenue en utilisant un couple réfrigérant/liquide absorbant, et une source de chaleur qui remplace la consommation électrique du compresseur mécanique et c'est grâce à des capteurs solaires sous vide posés en toiture que la chaleur est produite. La plupart des systèmes utilisent une pompe à solution, très faiblement consommatrice d'électricité.

La climatisation solaire est composée :

D'un débourbeur, qui a pour rôle de vaporiser le fluide caloporteur.

- D'un condenseur, qui a pour rôle de condenser le fluide caloporteur en état vapeur à l'état liquide.
- D'un détendeur, qui a pour rôle de diminuer la température et la pression du fluide.
- D'un évaporateur, qui sert à échanger de la chaleur entre l'air chaud et le fluide s'évaporant, en créant du froid.
- D'un absorbeur, qui sert à absorber le réfrigérant et
- D'une pompe, qui sert ramener le couple réfrigérant/absorbant dans le déserteur.

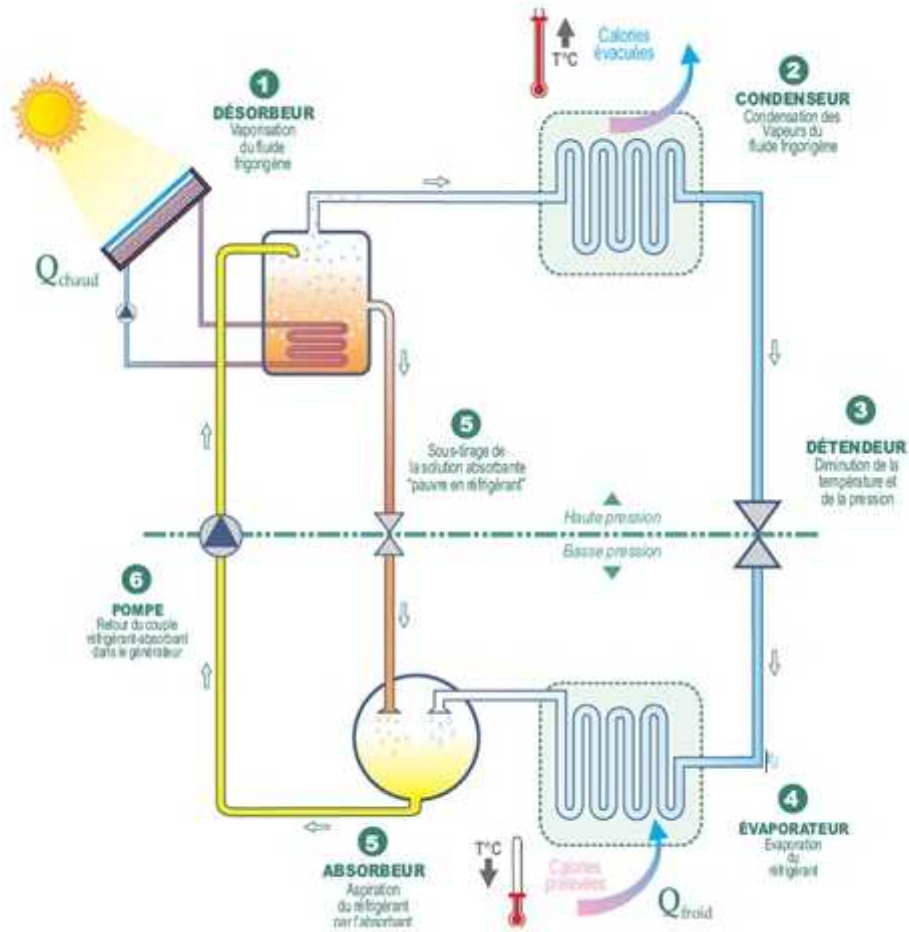


Fig II.1 Schéma de principe d'une machine à absorption.

D. Qu'est-ce qu'une machine à adsorption ?

Ici, au lieu d'une solution liquide, un matériau solide (un adsorbant) est utilisé. Les systèmes disponibles sur le marché utilisent l'eau comme réfrigérant et le silica-gel comme adsorbant. La machine comprend deux compartiments remplis d'adsorbant, un évaporateur et un condenseur. L'adsorbant du premier compartiment est régénéré par chauffage (eau chaude solaire), la vapeur d'eau ainsi générée étant envoyée dans le condenseur où elle se condense. L'eau liquide, via une vanne de détente, est envoyée à basse pression dans l'évaporateur où elle s'évapore (phase de « production de froid »). L'adsorbant maintient la basse pression en adsorbant cette vapeur d'eau. Ce compartiment doit être refroidi pour entretenir le processus d'adsorption. Lorsque la « production de froid » diminue (saturation de l'adsorbant en vapeur d'eau), les fonctions des deux compartiments sont permutées par ouverture et fermeture de clapets. Actuellement, seuls quelques fabricants proposent ce type de machines à adsorption.

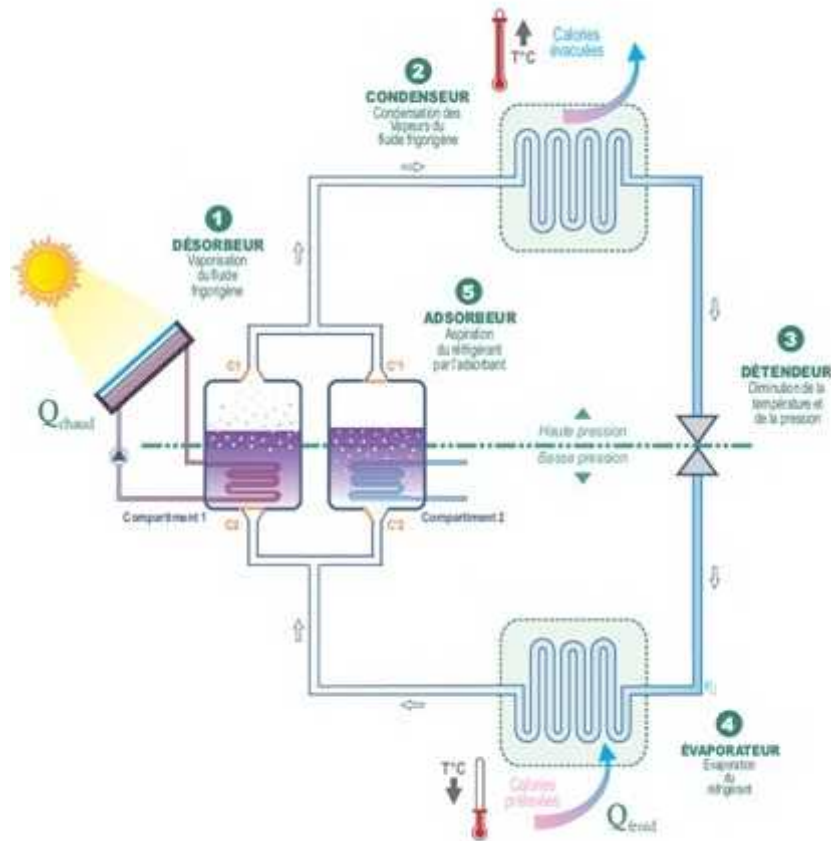


Fig.II.2 Schéma de principe d'une machine à adsorption.

E. Qu'est-ce qu'une machine à dessiccation ?

Les systèmes à dessiccation sont des systèmes ouverts utilisant l'eau, en contact direct avec l'air, comme réfrigérant. Le cycle de rafraîchissement est une combinaison de rafraîchissement évaporatif avec une déshumidification par un matériau hygroscopique, qui peut être aussi bien liquide que solide. Le terme « ouvert » signifie que le réfrigérant est évacué du système après qu'il ait produit son effet refroidissant, et qu'une nouvelle quantité de réfrigérant doit être injectée, le tout dans une boucle ouverte. Seule l'eau peut être utilisée comme réfrigérant puisqu'elle est en contact direct avec l'air ambiant. La technologie la plus courante aujourd'hui utilise des roues à dessiccation rotatives, avec du silice-gel ou du chlorure de lithium comme matériau de sorption. Les principaux composants du système sont les suivants : Le procédé de base permettant le conditionnement d'air est le suivant : L'air entrant, chaud et humide, traverse une roue à dessiccation en rotation lente, et est donc déshumidifié. L'air étant réchauffé par le phénomène d'adsorption, un premier refroidissement est obtenu au travers d'un échangeur thermique (roue métallique en nid d'abeilles, en rotation). L'air est ensuite humidifié, et donc refroidi, dans un humidificateur,

permettant d'ajuster le niveau d'humidité et de température souhaité pour l'air neuf. L'air repris dans la pièce est humidifié pratiquement jusqu'au point de saturation (6-7), pour bénéficier au maximum du potentiel de refroidissement dans l'échangeur thermique. Enfin, la roue à dessiccation doit être régénérée, en utilisant de la chaleur à un niveau de température relativement faible (50 °à 75 °C), permettant ainsi de poursuivre le processus continu de déshumidification.

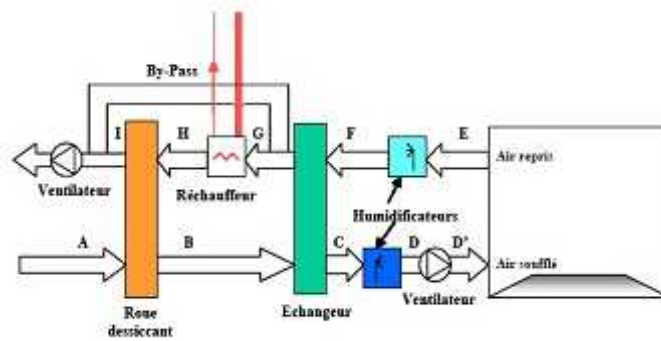


Fig II.3 Schéma de principe d'un système à dessiccation (dessinant cooking)

F. Quelle est son impact sur l'environnement ?

La climatisation solaire à absorption supprime la quasi-totalité des nuisances dues aux techniques de climatisation conventionnelles :

- La source d'énergie est le soleil, donc sans rejet.
- La consommation électrique des auxiliaires est plus de vingt fois inférieure à celle du compresseur remplacé.
- Les fluides frigorigènes employés sont totalement inoffensifs, à la différence des fluides de type HCFC (Hydro CloroFluoro Carbure) utilisés dans les systèmes conventionnels.
- Les sources de bruit les plus importantes (moteur et compresseur) sont totalement supprimées.
- L'absence de pièces mécaniques en mouvement conduit en conséquence à une durée de vie nettement plus longue que les groupes de réfrigération classiques.

II.3.1. Capteurs solaires

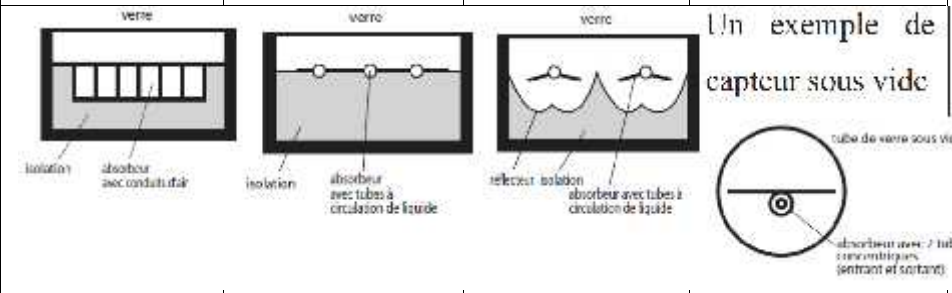
Les principaux types de capteurs solaires disponibles sur le marché sont présentés dans le tableau suivant.

Le rafraîchissement solaire se différencie de la production d'eau chaude par le niveau élevé de température à laquelle la chaleur utile doit être fournie. Pour les groupes de froid à sorption (absorption et adsorption), la température utile dépasse généralement 80°C ; les

valeurs les plus basses étant d'environ 50°C. Pour les systèmes à dessiccation, la température de fonctionnement va de 55°C à 90°C.

Compte-tenu des débits élevés nécessaires pour alimenter le système, une stratification du volume de stockage de l'eau chaude est difficile et la température de retour dans le capteur est donc relativement élevée, elle aussi. Ceci induit une limitation dans le choix du type de capteur.

En conséquence, les capteurs solaires plans et les capteurs à air sont bien adaptés pour les systèmes à dessiccation. Lorsque l'on utilise un groupe de froid à adsorption, l'utilisation de capteurs plans sélectifs est limitée aux régions à fort ensoleillement. Dans les régions moins ensoleillées, ou pour les groupes de froid nécessitant des températures de fonctionnement plus élevées comme les machines à absorption simple effet, des capteurs à hautes performances doivent être utilisés. Si on se limite aux capteurs fixes, des températures encore plus élevées peuvent être obtenues grâce à des capteurs sous vide à concentration optique. Il peut s'agir d'une option intéressante pour les systèmes utilisant des groupes de froid à absorption haute performance (double effet).

Type de capteur	Capteur à air	Capteur plan	Capteur plan à concentrateur parabolique	Capteur sous vide
Abréviations	CA	CP	CPC	CSV
				Un exemple de capteur sous vide
Principe	Chauffage direct de l'air	Chauffage d'un liquide (eau, eau+glycol)	Chauffage d'un liquide (eau, eau+glycol), concentration du rayonnement	Tube sous vide pour réduire les pertes thermiques. Différentes technologies : - capteur à caloducs

				<ul style="list-style-type: none"> - capteur à flux direct - capteur à concentration, type Sydney
Principales applications	Préchauffage de l'air de ventilation	Eau chaude sanitaire	Eau chaude sanitaire et industrielle	Eau chaude sanitaire et industrielle
Principales applications en rafraîchissement solaire	Systèmes ouverts à dessiccation	Systèmes à dessiccation, adsorption, absorption (simple effet) avec capteurs sélectifs	Adsorption et absorption (simple effet)	<ul style="list-style-type: none"> - Adsorption, absorption (simple effet) - Absorption (double effet) : Sydney

Tableau II.1. Les principaux types de capteurs solaires disponibles sur le marché.

4. Conclusion :

Dans ce chapitre les différentes techniques de la climatisation solaire ont été présentées. La climatisation solaire désigne les groupes au gaz qui nécessitent une source chaude pour produire de l'eau glacée. Or, si cette source d'eau chaude provient de capteurs solaires, le groupe frigorifique utilisera en priorité l'énergie solaire pour fonctionner. Les besoins de climatisation étant plus forts quand il y a de l'ensoleillement, ce concept de climatisation solaire donne d'excellents résultats économiques et écologiques.

- D'un détendeur, qui à po
- D'un évaporateur, qui sert à
- D'un absorbeur, qui sert
- D'une pompe, qui sert
- D'un condenseur, qui a pour rôle
- D'un absorbeur,
- D'une pompe, qui

REMANIPULÉ
REBILITÉ
REBILITÉ
REBILITÉ

Simulation

Et

Résultats

Simulation et résultats

III.1 Introduction

Systèmes solaires thermiques sont généralement difficiles à contrôler parce que la source d'énergie (rayonnement solaire) n'est pas manipulable et est continuellement en évolution. Provoquant des changements soudains de la dynamique du processus, cela nécessite des changements de débit pour le suivi de la référence. Beaucoup de stratégies de contrôle ont été appliquées à ces systèmes, allant du PID classique jusqu'à la commande prédictive.

Dans ce mémoire, une méthode qui utilise la commande prédictive est testée sur un système de climatisation solaire.

III.2 Description du système :

Le système solaire de conditionnement d'air se compose d'un champ qui produit de l'énergie solaire de l'eau chaude qui alimente une machine à absorption. Cette machine génère de l'eau refroidie et l'injecte dans le système de conditionnement d'air, pour atteindre une puissance de refroidissement de 35 kW.

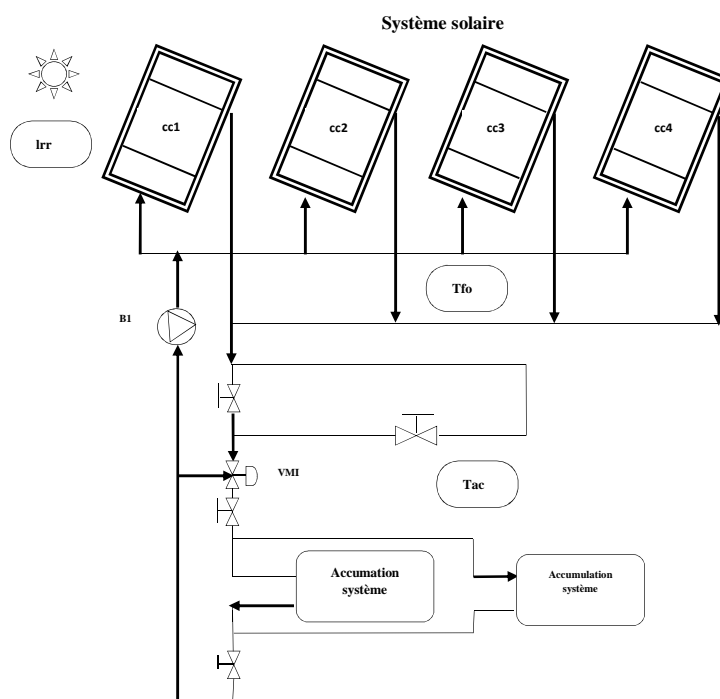


Fig III. 1. Description du system.

Le système solaire peut être considéré comme une installation de conditionnement d'air qui utilise l'énergie thermique pour produire de l'air froid. L'objectif global de contrôle est de fournir de l'eau glacée pour le système de distribution d'air à la température requise. Ceci est réalisé en contrôlant la température de l'eau chaude fournie par le champ solaire. Puisque l'énergie primaire (rayonnement solaire) n'est pas manipulable, la température désirée est obtenue en agissant sur le débit de circulation. La contribution solaire, en plus des variations cyclique de rayonnement saisonnière et quotidienne, est également dépendante des conditions atmosphériques tels que la couverture nuageuse, l'humidité. Il est important de maintenir une température de sortie constante tant que les conditions solaires changent, et le seul moyen disponible pour y parvenir est via l'ajustement de l'écoulement de fluide.

Le problème de commande adressée dans ce mémoire est la régulation de la température de sortie (T_{fo}) du système solaire. La figure III.1 montre les principaux composants du système, qui sont les suivants :

- a) Système de chauffage solaire, composé d'un ensemble de capteurs solaires plans. La principale source d'énergie est un rayonnement solaire qui est utilisée par les capteurs solaires pour augmenter la température de l'eau en circulation. Le champ solaire est composé de 151 m² de capteurs plats qui travaillent au sein de la gamme de 60 à 100 °C et de fournir une puissance nominale de 50 kW.
- b) un système d'accumulation, composé de deux réservoirs de 2500 litres travaillant en parallèle. Ce système agit comme un tampon, stockant de l'eau chaude pour être utilisé dans les situations transitoires où le rayonnement solaire ne permet pas la température désirée être obtenue à la fin du circuit d'eau chaude.

L'objectif du système de commande consiste à maintenir la température d'eau de sortie T_{fo} à un niveau désiré malgré les perturbations telles que les changements dans le niveau de rayonnement solaire (causés par des nuages), la réflectivité du miroir ou de la température d'eau d'entrée.

Ceci est réalisé en faisant varier le débit du fluide à travers le champ manipulant la vanne à trois voies (VM1). Le champ présente un temps de retard variable qui dépend de la variable de commande (débit). La fonction de transfert du processus varie avec des facteurs tels que le niveau de rayonnement ou de la température d'eau d'entrée. Le maintien d'une

température de sortie constante tout au long de la journée, où les conditions solaires changes, nécessite une grande variation opérationnel dans le niveau de flux. Cela conduit à des variations importantes dans la performance de la dynamique générale et, en particulier, du point de vue commande, donne lieu à un retard de temps du système, qui varie de façon significative.

Les paramètres de régulation doivent être ajustés en fonction des conditions d'exploitation, et la méthode proposée offre une approche qui peut s'adapter à une telle exigence.

III.3.Stratégie de contrôle

Pour les besoins de contrôle un modèle simple et linéaire est nécessaire qui rapporte les changements dans l'écoulement du fluide à l'évolution de la température de sortie. Dans cette section, le développement théorique est montré et l'utilisation de systèmes de premier ordre est justifiée.

III.3.1. Systèmes de premier ordre

La plupart des processus dans l'industrie, lorsque l'on considère de petits changements autour d'un point de fonctionnement peuvent être décrit par un modèle linéaire, normalement, d'ordre très élevé. C'est parce que la plupart des processus industrielle sont composés de nombreux éléments dynamiques, généralement de premier ordre, de sorte que le modèle complet est d'un ordre égal au nombre d'éléments. En effet, chaque masse ou d'énergie, élément de stockage dans le procédé fournit un élément du premier ordre dans le modèle. Considérons, par exemple, un long tuyau utilisé pour le chauffage échanger des fins, selon le cas de collecteur solaire. Le tuyau peut être modélisé en le divisant en un ensemble de petits morceaux, dont chacune peut être considérée comme un système du premier ordre. Le modèle résultant aura un ordre égal au nombre de pièces utilisées pour modéliser le tuyau, c'est un modèle d'ordre très élevé. Ces modèles de haute d'ordre très élevé seraient difficiles à utiliser pour des propositions de contrôle, mais, heureusement, il est possible de rapprocher le comportement d'un tel processus d'ordre élevé par un système avec une constante de temps et un temps mort.

Le système à contrôler peut être décrit par ce type de modèle. Si le temps d'échantillonnage est un multiple entier du retard, la fonction de transfert discrète est donnée par :

$$G_m(Z^{-1}) = \frac{bZ^{-1}}{1 - aZ^{-1}} Z^{-d} \quad (\text{III. 1})$$

Dans ce cas, la méthodologie décrite dans le chapitre 1, commande prédictive généralisée (GPC), est considérablement réduite.

III.4. Simulation

Afin de tester la méthode proposée une approche standard en utilisant un GPC une étude de simulation a été faite.

Cette section présente la simulation et la mise en œuvre du contrôleur proposé. Le modèle nominal utilisé pour la conception est le suivant, c'est un système linéaire de premier ordre avec un temps de retard de trois périodes d'échantillonnage :

$$G_m(Z^{-1}) = \frac{-0.009546Z^{-1}}{1 - 0.89654Z^{-1}} Z^{-4} \quad (\text{III. 2})$$

Le modèle présente le comportement de sortie du processus, qui est la température de sortie du champ solaire (T_{fo}) et la grandeur de réglage, qui est l'ouverture de la vanne (VM1) ainsi que les paramètres de modèle a , b et d . Les valeurs de réglage pour le contrôleur prédictif sont :

$$N_u = 10, N = 60, N_3 = 60, \lambda = 1,$$

Étant la période d'échantillonnage $T_s = 40s$.

Les paramètres de réglage du régulateur sont :

- 1) Horizon de commande : N_u .
- 2) L'horizon de prédiction : $N_1 = d + 1, N_2 = d + N$.
- 3) Facteur de pondération d'entrée : λ .

Toutes les variables de décision ont une valeur initiale égale à zéro.

Cette simulation a été effectuée dans le but d'illustrer le comportement du contrôleur sous des changements de point de fonctionnement et de consigne. Dans un premier temps, les paramètres du modèle sont $a = -0,89654$, $b = -0,009546$ et $d = 3$. Ils sont modifiés de leurs valeurs nominales à $t = 159$, en prenant les nouvelles valeurs $a = -0,627$, $b = -1$. Le temps mort n'a pas été modifié de telle sorte que le contrôleur travaille dans les mêmes conditions. Dans le but de voir, est ce que le contrôleur proposé se comporte bien dans le cas nominal et il est capable de contrôler avec les nouvelles valeurs des paramètres.

À $t = 351$, une modification de l'échelon de consigne est effectuée, afin de tester si la stratégie proposée donne une bonne réponse en boucle fermée et présente une adaptation sous forme de fluctuations au cours d'un certain intervalle de temps.

La simulation suivante présente un test effectué pour montrer comment la stratégie proposée est capable à identifier le temps mort du système, en dehors des autres paramètres du modèle.

Et voir la GPC comment se comporte dans ce cas, si elle est capable de s'adapter à cette modification. Le modèle utilisé dans la simulation a été modifié à partir de l'équation (III.2) à l'équation :

$$G_m(Z^{-1}) = \frac{-0.9Z^{-1}}{1 - 0.6723Z^{-1}} Z^{-1} \quad \text{(III. 3)}$$

Noter comment, malgré la grande variation des paramètres (voire temps morts), la stratégie décrite dans le présent chapitre est capable de répondre aux nouveaux paramètres du modèle sans la nécessité d'une excitation persistante, et elle est capable de suivre la consigne en régime permanent quand elle est modifiée.

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre une description de l'installation solaire est présentée. La section (III.3) décrit la stratégie de contrôle proposée, qui est testé dans la simulation. Plusieurs essais ont été réalisés sur le système solaire pour montrer le comportement du contrôleur proposé, en changeant les conditions de fonctionnement. La GPC est en mesure de répondre à ces changements.

CONCLUSION

Générale

Conclusion générale

Dans ce mémoire on a étudié la commande prédictive généralisée (GPC). Cette méthode conduit à des lois de commande optimale. Donc la garantie de stabilité du système linéaire bouclé est obtenue de façon optimale.

Le travail présenté dans ce mémoire est porté sur la stabilisation par la commande prédictive d'un système linéaire. La méthode proposée est basée sur la minimisation d'un critère quadratique.

La GPC apporte des performances remarquables, notamment, en ce concerne la poursuite de la consigne imposée. Les paramètres de réglage ont une influence déterminante sur le comportement du système mais il n'est pas toujours facile de trouver des valeurs optimales pour ces paramètres.

Les techniques prédictives permettent de satisfaire des spécifications très contraignantes, en termes de stabilité et précision.

Tous les avantages listés ci-dessus font que ces techniques prédictives sont implantées dans de nombreuses applications industrielles, dans des domaines très variés, mais de préférence lorsque la trajectoire à suivre dans le futur est connue à l'avance, de façon à bénéficier pleinement de l'aspect anticipatif de cette loi de commande.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- (1) M. Marcelin Dabo, commande prédictifs généralisée non linéaire Temps Continus des Systèmes complexes. Thèse verser Obtenir le garde de docteur Délivre par l'Université de Rouen, Discipline: Automatique et Traitement du Signal , 2010.
- (2) Jean -Marie Fluas , La relation industrielle PID , prédictifs et flous , Hermes , 1994
- (3) Benbrahim Amel, commande prédictive généralisée d' Une machine stnchrone à Aimants Permanents, Mémoire verser obtenir le diplôme de Magistère en Electrotechnique , Université de Batna, 2009.
- (4) Emmanuel Godoy et coll . Régulation industrielle , Dunod , 2007.
- (5) Choisir non Procède de Traitements des COV . Décision enivrement , 38 juillet . 1995.
- (6) COV : réduction à la source destruction récupération de ous . Supplément Energie Plus , 204.3.22 Avril , 15e 1998.
- (7) Allgöwer F. Badgwell T.A , Qin . J. S. Rawlings J.B Wrigh S.J.
Les progrès dans le contrôle. Highligts de Ecc99 , Chapitre Nolisera commande prédictive et le déplacement horizon estimation Springer . 1999
- (8) Blanc D , Etude expérimentale et modélisation du Séchage et de la réticulation sous rayonnement infrarouge D'Une peinture de genre époxy - amine à aquense de base de soutien sur acier . Thèse de doctorat , Université Claude Bernard Lyon 1,1997 .
- (9) H. Chen Allgöwer F.quasi - in ni horizon non linéaire schème de commande prédictive avec Stabilité garantie , Automatisa , 34 (10) : 1205_1218.1998 .
- (10) Chu W. . Windawi H. Contrôle des COV par Chem d'oxydation cataytic . Eng Progress , pages 37_43 , mars 1996.
- (11) Ciriscioli PR Springer GS Lee W.1.An Système expert pour cyring autoclave de comosites.J . des matériaux composites , 25 : 1542_1587.1991 .
- (12) Courtial E. Commande prédictive et estimation d'état de Système non lin éaires l' hD thèse . Université Claude Bernard Lyon 1.1996
- (13) E. Camacho et C. Bordons , 2e édition . Model Predictive Control. Londres : Springer Verlag , 2004.
- (14) C. Cutler et B. Ramaker, « Matrice Contrôle dynamique -A Ordinateur Algorithme de configuration », à la Conférence de Contrôle automatique, San Francisco ,1980 .
- (15) D. Ram'irez et E. Camacho " , Caractérisation de Min-Max Avec MPC Incertitudes Mondiales , " Dans Proc . American Control Conference , ACC ,2002 .
- (16) E. Mosca , Optimal , prédictive et de Vitesse adaptatif . Prentice Hall , 1995.

- (17) E. Camacho , M. Berenguel , et F. Rubio , Contrôle avancé de solaire Centrales . Springer- Verlag , London, 1997.
- (18) K. Åström et B. Wittenmark , Adaptive Control . Addison-Wesley , 1989.
- (19) M. Shouche , H. Genceli , et M. Nikolaou , " Modèle de contrôle prédictif de Effet de mise en ligne Techniques Opti -tion et d' identification (MPCI) , " Automatica , vol . 23/2 , pp 137-160 , 2002.
- (20) G. Goodwin et K. Sin , le Filtrage adaptatif : la Prévision et de Contrôle . Prentice Hall , 1984 .
- (21) A. Nu 'n ~ ez- Reyes , J. Normey - Rico , C. Bordons , et E. Camacho , " A Smith prédictive basée MPC Dans Une climatisation solaire usine , " Journal de contrôle de processus , vol . 15/1 , pp 1-10 , 2005.
- (22) N. Filatov et H. Unbehauen , Adaptive Dual Control . Springer -Verlag , 2004.
- (23) D. Clarke , C. Mohtadi , ET PSTuffs , " Commande prédictive Généralisée . Partie I. L' algorithme de base " Automatica , vol . 23, no . 2 , pp 137-148 , 1987.
- (24) P. Deshpande et R. Ash , éléments de Contrôle du Processus de Travail . ISA 1981.
- (25) B. Anderson , " Adaptive Systems, Manque d ' excitation persistante et débordant Phénomène " Automatica , vol . 21 , pp 247-258 , 1985.
- (26) R.B. Bitmead, M. Gervers et V. Wertz, " Adaptive optimal control, The thinking Man's GPC ", Prentice Hall International Series, Englewood Cliffs, N.J. 1990.
- (27) Sadhana Ghidrawar, balasahab patre and laxman waghman " neural generalized predictive control for industrial process " SGGS " Institute of engineering and technology, nanded (MS) 431 – 606 INDIA.
- (28) TAO – ZHENG. Model predictive control, janeza Trdine 9, 51000 Rijeka Croatia 2010.
- (29) J.M.MACIEJOSKI, Prédictive control with constraints prentice hall 2003.

ANNEXE

Annexe

Paramètres de la modèle de Commande prédictive d'une installation de climatisation solaire :

Les seuls paramètres de réglage du régulateur sont :

- (1) λ : coefficient de pondération sur la commande.
- (2) N_u : horizon de prédiction sur la commande.
- (3) N_2 : horizon de prédiction supérieur sur la sortie.
- (4) N_1 : horizon de prédiction inférieur sur la sortie.
- (5) : coefficient de prédiction sur la commande ;
- (6) w_1 : Consigne du système global.
- (7) w_2 : Consigne du système interne ou consigne interne.
- (8) u : Commande appliquée sur l'ensemble du système.
- (9) y_1 : Sortie du système globale.
- (10) N_3 : horizon d'identification.
- (11) i : Sortie facteur de pondération .
- (12) i : Entrée facteur de pondération.
- (13) i : Identification facteur de pondération .