

50376
1993
127

N° d'ordre : 1130

50376
1993
127

HESE

présentée par

Jean-Yves DIEULOT

Ingénieur I.D.N.

en vue de l'obtention du titre de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LILLE I EN PRODUCTIQUE, AUTOMATIQUE ET
INFORMATIQUE INDUSTRIELLE**

**Commande de systèmes difficilement modélisables : application aux
broyeurs à ciments et aux tunneliers**



soutenue le 30 juin 1993 devant la commission d'examen :

M. J.P. RICHARD
M. A. EL MOUDNI
M. A. OUSTALOUP
M. P. BORNE
M. M. STAROSWIECKI
M. M. BOUMAHDI
M. A. CHIELENS
M. Ch. MIGNONAT

Président
Rapporteurs
Examineurs

Directeur de recherche: M. le Professeur P. BORNE

A mes parents .

REMERCIEMENTS

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé dans le cadre d'un contrat Région-Nord-Pas-de-Calais-Entreprise au sein des services Electricité/Automation , (DCI/EAI) et du service Recherche de la Division Tunneliers , (DTU/R&D) de la société FCB , à Lille.

Le Laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle de l'Ecole Centrale de Lille , (L.A.I.L.) dirigé par Monsieur le Professeur J.C. GENTINA , a travaillé en liaison avec FCB pour assurer la supervision de cette étude.

La société FCB fournit des équipements dans des domaines tels que la cimenterie, la sucrerie, les tunneliers.

Je remercie très vivement Monsieur J.P. RICHARD, Professeur à l'Ecole Centrale de Lille, de bien vouloir accepter d'être président de cette commission.

Je tiens à remercier tout particulièrement Monsieur A. OUSTALOUP, Professeur à l'Université de Bordeaux , et Monsieur A. EL MOUDNI , Professeur à l'IUT de Belfort , qui me font le grand honneur de bien vouloir juger ce travail en tant que rapporteurs. Les précieux conseils qu'ils m'ont adressé ont grandement contribué à la progression de ce mémoire , ainsi que l'aide importante de M. P. LANUSSE , doctorant au L.A.P. de l'Université de Bordeaux .

Je tiens à exprimer ma plus profonde reconnaissance à Monsieur P. BORNE , Professeur et Directeur Scientifique de l'Ecole Centrale de Lille qui a dirigé ce travail, pour le soutien qu'il a su m'accorder tout au long de ces années. Son dynamisme , son immense savoir et sa bienveillance m'ont permis de mener à bien ces travaux.

Mes sincères remerciements s'adressent également à Monsieur M. STAROSWIECKI , Professeur à l'Université de Lille , qui me fait l'honneur de siéger à cette commission d'examen.

Que Monsieur A.CHIELENS , chef du service DCI/SQE à FCB , M. Ch. MIGNONAT , chef du service DMI/IEM , et M. M. BOUMAHDJ , Docteur en mécanique et Directeur de la société Géodesign , qui ont accepté de prendre connaissance de ce travail et de faire partie du jury , soient particulièrement remerciés.

Je tiens à renouveler tout particulièrement mes remerciements envers Monsieur G. MORTIER, chef du service DCI/EAI à FCB, et Monsieur M. BOUMAHDI, ancien chef du service DTU/R&D, pour leur encadrement tout au long de cette étude.

J'adresse mes plus vifs remerciements à l'ensemble de mes collègues de travail de DCI/EAI et DTU en particulier, dont le soutien amical m'a été une aide précieuse.

Je remercie enfin mes camarades du L.A.I.L. pour l'amitié qu'ils m'ont témoignée pendant ces années.

INTRODUCTION

L'objectif de nos travaux est la régulation de systèmes complexes ou fortement perturbés par des méthodes d'automatisation robustes et d'implémentation relativement simple.

Le premier chapitre a pour but de présenter divers types de problèmes présents dans les procédés industriels : non-linéarités , limites des capteurs et actionneurs , perturbations et retards importants , comportements multivariables et systèmes difficiles à identifier , paramètres variables dans le temps.

La multiplicité de ces phénomènes rend souvent l'établissement d'un modèle de commande difficile , et la simplicité de réglage d'un correcteur P.I.D. rend l'optimisation de ce dernier beaucoup plus facile que pour un autre correcteur. Celui-ci n'est toutefois plus suffisant lorsque les variations intervenant sur le procédé sont trop importantes. La caractéristique d'un correcteur performant doit donc être la robustesse par rapport aux variations des paramètres et la simplicité de réglage.

Le broyage de ciment est le premier procédé étudié . La stabilisation du débit des refus associé au broyeur permet l'optimisation de l'atelier . La deuxième partie du mémoire décrit une méthode de stabilisation du front de taille d'un tunnelier à pression de terre. Les machines, fabriquées par la société FCB, sont présentées dans le premier chapitre.

Le deuxième chapitre présente l'identification du système broyeur-séparateur par une méthode des Moindre-Carrés Récursifs : l'aspect expérimental est plus particulièrement développé . Nous soulignerons notamment la forme de la fonction de transfert utilisée pour la description du système , les phénomènes de perturbations et l'importance du retard pur.

La commande de ce système sera présentée dans le troisième chapitre: les commandes testées, commande R.S.T. , commande adaptative , commande prédictive seront décrites et analysées du point de vue de la robustesse de la commande.

Nous étudierons ensuite , dans un quatrième chapitre , un procédé plus complexe qui nous montre un autre type de problème de régulation , laquelle est susceptible d'être mise en oeuvre dans l'industrie . Le problème posé par la régulation du front de taille d'un tunnelier nous confronte à un système multivariable non linéaire dont les coefficients varient en fonction du temps et dont l'identification se révèle très difficile.

Notre approche consiste dans une première phase à utiliser une identification grossière et une régulation P.I.D. adaptée, puis à implémenter une commande floue utilisant l'erreur en boucle fermée. Ce système , appelé Commande composite floue-conventionnelle (Composite Fuzzy-Conventional Control) est particulièrement robuste par rapport à une variation des paramètres . Nous utiliserons pour des fonctionnements différents du tunnelier (taux de remplissage de la chambre) une méthode de gains programmés pour le réglage du correcteur flou.

Le caractère expérimental du déroulement des travaux nous a permis d'obtenir une bonne connaissance des procédés étudiés . Cette connaissance et l'expertise de FCB s'avèrent très utiles lors de la détermination ou de l'essai d'une commande dans un contexte de production.

Plan

Remerciements	p 1
Introduction	p 3
Chapitre I Optimisation d'un atelier de broyage et stabilisation de la pression de front de taille d'un tunnelier	p 9
<i>I.1 Introduction</i>	
<i>I.2 Présentation générale des procédés</i>	p 11
<i>I.3 Description de l'atelier de broyage</i>	p 11
I.3.1 Le matériel de broyage	p 11
I.3.2 Capteurs utilisés en cimenterie	p 14
I.3.3 Nécessité de garder une charge constante –Mill–Level	p 17
I.3.4 Méthode d'optimisation du niveau de charge en cimenterie	p 18
I.3.4.1 Optimisation	
I.3.4.2 Stabilisation des refus	
I.3.5 Difficultés rencontrées	p 21
I.3.5.1 Interaction entre les variables	
I.3.5.2 Retard pur	
I.3.5.3 Perturbations	
I.3.6. Historique de régulations existantes	p 29
I.3.6.1 Mill–Level	
I.3.6.2 Régulations robustes	
<i>I.4 Description du procédé tunnelier</i>	p 31
1.4.1 Principe des tunneliers	p 31
1.4.2 Capteurs utilisés en tunneliers	p 33
1.4.3 Le maintien de la pression de terre : paramètres mis en jeu et moyens d'action: un système complexe	p 34
I.4.3.1 Comment contrôler la pression de terre	
I.4.3.2 Paramètres influant sur le contrôle du tunnelier	
<i>I.5 Conclusion et orientation de la recherche</i>	p 38
I.5.1 Comparaison des deux études	p 38
I.5.2 Orientation de la recherche en cimenterie	p 38
I.5.3 Orientation de la recherche en tunneliers	p 40
<i>Conclusion</i>	p 41

Chapitre II Identification du broyeur	p 42
<i>II.1 Introduction</i>	
<i>II.2 Une approche process</i>	p 43
II.2.1 Considérations physiques	p 43
II.2.2 Conclusion sur la forme de la fonction de transfert	p 45
II.2.3 Hypothèse non-linéaire	p 45
<i>II.3 Réalisation de l'identification</i>	p 46
II.3.1 Considérations générales sur l'identification	p 46
II.3.2 Prétraitement	p 47
<i>II.4 Algorithme des Moindre-Carrés Récursifs</i>	p 48
II.4.1 Algorithme	p 48
II.4.2 Validation	p 52
<i>II.5 Aspects pratiques</i>	p 54
II.5.1 Méthodologie de traitement	p 54
II.5.2 Protocole d'essais	p 56
II.5.3 S.B.P.A.	p 56
II.5.4 Résultats et simulations	p 58
II.5.5 Conclusion des campagnes d'identification: algorithme simplifié pour d'autres installations.	p 60
<i>II.6 Influence des perturbations , non-linéarités et imprécisions sur l'influence d'un correcteur</i>	p 63
II.6.1 Recensement des perturbations	p 63
II.6.2 Evaluation des non-linéarités ,perturbations et imprécisions	p 64
II.6.3 Fonctions de sensibilité	p 66
II.6.4 Conclusion: influence des résultats sur l'établissement d'un correcteur	p 71
<i>Conclusion</i>	p 72

Chapitre III Commandes du broyeur	p 73
<i>III.1 Introduction</i>	
<i>III.2 Existant; P.I.D</i>	p 74
III.2.1 Insuffisance	p 74
III.2.2 Critères de robustesse	p 75
III.2.3 Etude d'algorithmes robustes	p 79
<i>III.3 Commande R.S.T</i>	p 82
III.3.1 Méthode	p 82
III.3.2 Résultats	p 84
III.3.3 Robustesse	p 86
<i>III.4 Commande adaptative</i>	p 88
III.4.1 Présentation	p 88
III.4.2 Algorithme d'adaptation	p 91
III.4.3 Algorithme de commande: Commande Prédictive Généralisée	p 94
III.4.4 Robustesse de la régulation autoadaptative:	p 97
III.4.5 Résultats	p 98
<i>III.5. Commande prédictive</i>	p 99
III.5.1 Principe et algorithme	p 99
III.5.2 Paramètres et résultats	p 106
III.5.3 Résultats	p 107
<i>Conclusion</i>	p 110

IV Commande composite floue–conventionnelle d'un tunnelier	p 111
<i>IV.1 Introduction</i>	
<i>IV.2 Généralités</i>	p 112
IV.2.1 Sous–ensembles flous	p 112
IV.2.2 Définitions	p 113
<i>IV.3 Commande floue</i>	p 115
IV.3.1 Généralités	p 115
IV.3.2 Fuzzification des variables entrée/sortie	p 118
IV.3.2.1 Fonctions d'appartenance	
IV.3.2.2 Echantillonnage	
IV.3.2.3 Mise à l'échelle et importance	
IV.3.3 Type de règles utilisées	p 121
IV.3.3.1 Méthodes de connectivité (et , ou)	
IV.3.3.2 Facteurs de quantification (coefficients de pondération des règles)	
IV.3.4 Sortie de la commande	p 122
IV.3.5 Tableau récapitulatif	p 123
IV.3.6 Analyse expérimentale du système	p 124
<i>IV.4 Utilisation d'une méthode de régulation par compensation floue de l'erreur en boucle fermée</i>	p 125
IV.4.1 Schéma de principe	p 125
IV.4.2 Remarques	p 126
<i>IV.5 Application au processus tunnelier</i>	p 127
IV.5.1 Modèle utilisé	p 127
IV.5.2 Commande	p 128
IV.5.3 Résultats	p 132
<i>Conclusion</i>	p 135
CONCLUSION	p 136
Bibliographie	p 137

Optimisation d'un atelier de broyage et stabilisation de la pression de front de taille d'un tunnelier à pression de terre

I.1 Introduction

Dans ce chapitre , nous présenterons tout d'abord les machines constituant l'atelier de broyage dont nous souhaitons améliorer les performances. Les difficultés liées à la nature complexe du procédé ou à la technologie rendent délicate la détermination d'un critère d'optimisation.

Nous verrons qu'il existe un point de fonctionnement optimum de l'atelier pour une valeur du débit du refus du séparateur dynamique , lequel a pour but de recycler la matière insuffisamment broyée . Le but de notre étude est de stabiliser ce débit autour du point de fonctionnement.

Les modifications de l'agencement de l'atelier intervenues lors de notre étude nous ont conduit à tester plusieurs schémas de régulation au cours de nos campagnes d'identification et d'essai de commandes.

Nous énumérerons les problèmes posés par la régulation du débit des refus , en particulier la recherche d'une commande robuste par rapport aux perturbations et au retard.

Le tunnelier à pression de terre est une machine permettant le creusement mécanisé de galeries souterraines en évitant la déconsolidation du terrain environnant.

Un disque de coupe , entraîné en rotation, excave le sol. Une vis sans fin extrait la matière. Afin d'éviter des effondrements de terrain , la pression au front de taille est maintenue stable grâce à un confinement du terrain excavé appelé marin , maintenu sous pression dans une chambre situé à l'arrière du disque.

La vitesse d'avance du tunnelier et la vitesse de rotation de la vis régulent la pression du front de taille . Le couple du disque doit rester en deçà d'un seuil déterminé.

Un grand nombre de paramètres influe sur la stabilité du front de taille , en particulier la nature du terrain excavé. Cette complexité interdit le recours exclusif à un correcteur traditionnel , la fonction de transfert étant difficile à obtenir.

Pour le broyeur , nous proposerons l'essai d'algorithmes robustes garantissant des performances malgré les erreurs de modélisation . Nous proposerons une commande composite floue–conventionnelle pour la régulation de la pression du front de taille , correspondant à la superposition à une régulation plus traditionnelle d'une boucle de commande floue qui tiennent compte des erreurs non modélisables .

I.2 Présentation générale des procédés

Nous avons étudié deux procédés très différents: un atelier de broyage en cimenterie, dont on cherche à optimiser le fonctionnement par stabilisation du débit des particules les plus grossières, appelé débit des refus (ces particules sont recirculées, c'est-à-dire expédiées via un transporteur , vers l'entrée du broyeur).

L'autre étude concerne la stabilisation du front de taille d'un tunnelier, procédé complexe faisant intervenir de nombreux paramètres (dont la nature du terrain). Le terrain est creusé par un disque de coupe et évacué par une vis sans fin, la terre étant confinée dans une chambre située derrière la tête. Les figures ci-dessous rendent compte du fonctionnement global de ces deux machines.

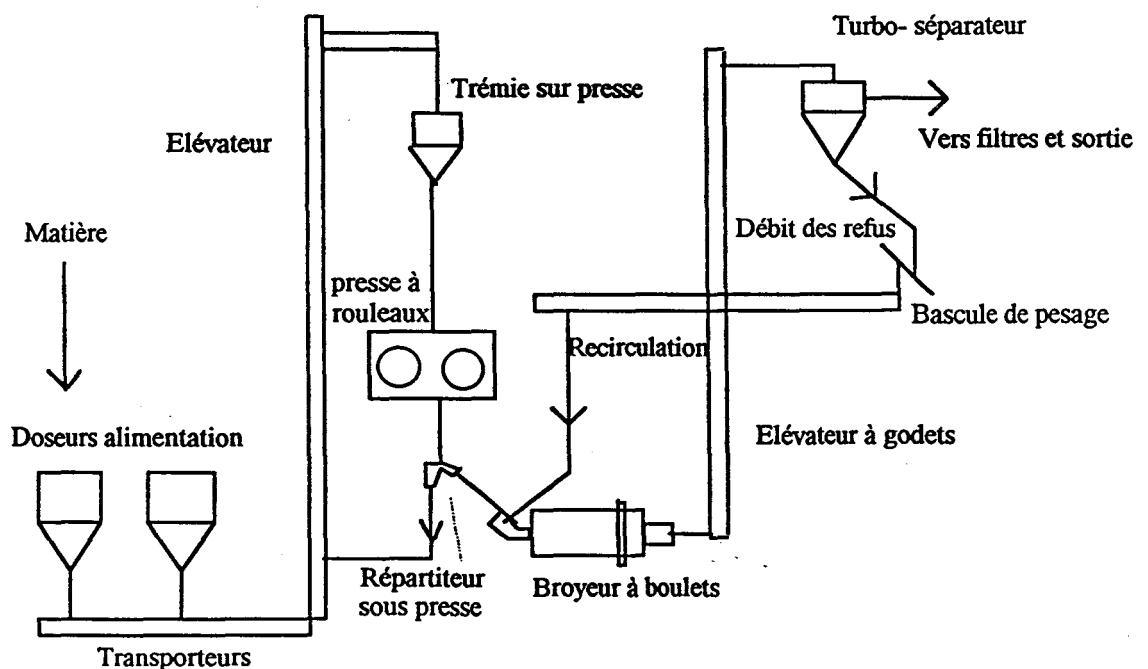
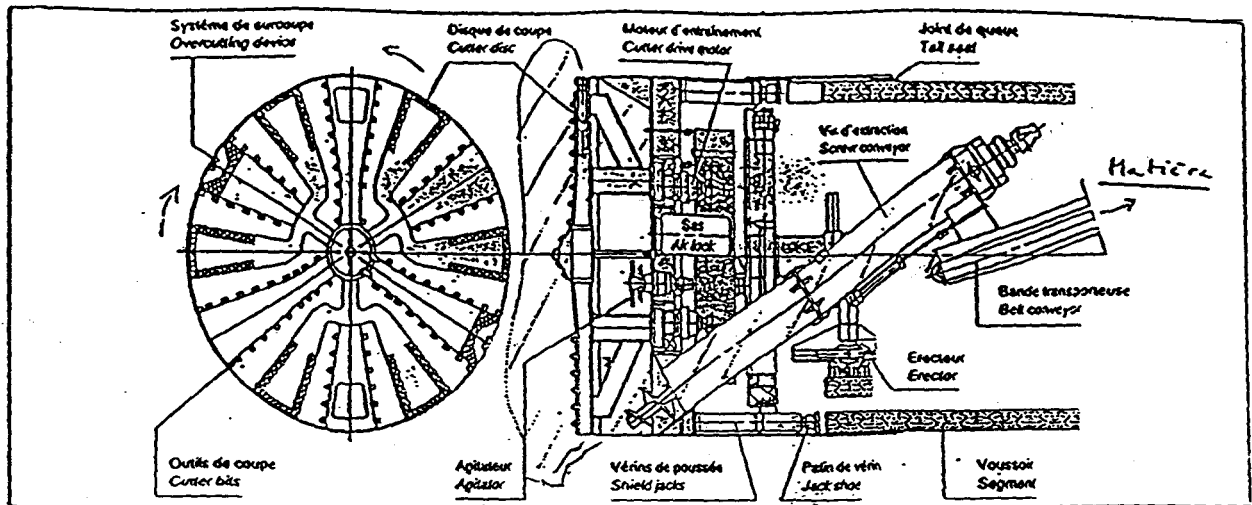


fig [I.2.1] Flowsheet très simplifié de l'atelier de Cruas



fig[I.2.2] Schéma d'un tunnelier à pression de terre

I.3 Description de l'atelier de broyage

I.3.1- Le matériel de broyage

-Ciment blanc et four

Le ciment est un mélange en proportions déterminées de silicates et d'aluminates de chaux, avec ajout de 3 à 5% de gypse pour faciliter la prise lors de l'emploi.

D'autres ajouts tels que pouzzolanes, laitiers de hauts fourneaux, cendres volantes, calcaires peuvent également être employés .

Le "cru" est le mélange homogénéisé des différentes matières premières qui est cuit à haute température dans un four tournant. Le produit sortant du four est appelé clinker , et après broyage en compagnie d'ajouts est transformé en ciment.

Le clinker arrive maintenant dans l'atelier de broyage où il sera réduit en compagnie de plusieurs autres constituants du ciment (par exemple le gypse qui favorise la régularité de la prise) d'un diamètre de quelques millimètres à quelques microns. La finesse est une composante très importante de la qualité du ciment, puisqu'elle conditionne sa résistance et sa capacité de durcissement . La réduction granulométrique et l'adjonction de plusieurs matières confère au ciment sa couleur blanche caractéristique.

L'atelier est constitué de doseurs alimentant un transporteur qui amène la matière dans une trémie; un déferrailleur permet de détecter la présence de métal dans le produit. Cette trémie se déverse dans une presse à rouleaux ; à la sortie de la presse, un répartiteur recircule les 2/3 de la matière vers la presse, le restant étant acheminé vers un broyeur à boulets. A la sortie du broyeur, un élévateur à godets alimente un séparateur dynamique . Les particules plus fines sont stockées en silo, les particules plus grossières , appelées refus du séparateur, sont recirculées vers l'entrée du broyeur, leur consigne (valant 60 T/h) étant égale au triple de l'alimentation à l'entrée du broyeur.

Le produit est constitué de 83% de clinker, de 5 à 10% de particules fines, déjà broyées, de 5% de gypse, de 2% de calcaire.

Le débit actuel est de 21 T/h, les transporteurs pouvant supporter jusque 25 T/h de matière. Ceci veut dire que l'alimentation est limitée à 25 T/h , à 30 T/h en pointe en limite supérieure , et bien sûr à 0 T/h en limite inférieure .

-La presse

Le produit est amené dans une trémie qui sert à gaver les rouleaux de la presse en maintenant un minimum de matière sur presse. Son niveau est contrôlé.

La presse est constituée de 2 cylindres en rotation écrasant la matière sous haute pression.

Cette presse fut rajoutée en 1990, soit peu avant notre étude, sur un atelier dont la capacité de broyage était de 13 T/h. Il est possible de fonctionner en broyage intégral ou d'envoyer les refus du séparateur à la presse.

La caractéristique des boulets du broyeur resta inchangée pendant ces modifications. Par contre , la consigne de finesse a pu être baissée de quelques centaines de Blaines [MLC91] (la blancheur du ciment est améliorée par le broyage à la presse et ce résultat permet de travailler à finesse plus basse .) La presse est une machine "volumétrique" , c'est-à-dire qu'elle transforme un volume de matière avec un certaine distribution granulométrique en un produit plus fin et ceci avec un retard et une constante de temps très faibles.

Le poids de matière broyé n'est toutefois pas proportionnel à la variation de l'entrefer, la matière pouvant fuser ou les cylindres s'écartant lors du passage de particules imbroyables: des problèmes liés au calcaire apportent des perturbations quand au fonctionnement de la machine.

Aucune information sur le fonctionnement de la presse n'est disponible . Un répartiteur sous presse , constitué d'un volet actionné par un servomoteur permet de répartir le produit en sortie de presse vers le broyeur ou la trémie.

Un convoyeur à bande achemine la matière jusqu'au broyeur à boulets.

-Le broyeur à boulets

Un broyeur à boulets est un cylindre divisé dans le sens de la circulation de la matière en plusieurs compartiments, séparés par des grilles, contenant des billes de métal de diamètre de plus en plus faibles au fur et à mesure de l'avancée de la matière (la surface broyante des boulets est en rapport avec celle des particules à broyer .) Dans le cas de l'atelier de Cruas, le broyeur a été ramené de 2 à une seule chambre (et donc à un seul diamètre de boulets) . Auparavant , le broyeur était constitué d'un compartiment dégrossisseur et d'un compartiment finisseur, la matière entrant par une extrémité du cylindre et sortant par l'autre.

Lorsque la vitesse de rotation est trop élevée, les boulets sont maintenus contre la paroi par la force centrifuge. La vitesse limite à laquelle intervient ce phénomène s'appelle vitesse critique. A une vitesse de rotation du broyeur comprise entre 60% et 80% de cette vitesse, [AnK92], ici 20 tr/mn, les boulets qui affleurent à la surface de la matière décollent de la paroi et retombent sur le lit de matière en l'écrasant, soit entre eux, soit contre les plaques de revêtement . Les boulets sont introduits dans le broyeur généralement au démarrage de l'installation ou lors d'une modification du processus. L'écoulement d'air entre l'entrée et la sortie du broyeur (la dépression est constante) provoque la remontée des particules comprises dans une certaine plage de granulométrie vers un élévateur à godets.

Le broyeur de Cruas mesure 2 m de diamètre, 4 m de long (c'est donc une installation de petites dimensions) et supporte un débit massique d'environ 21 T/h. Les boulets forment 90% en masse de la charge du broyeur. Cette méthode consomme donc beaucoup d'énergie, la puissance du moteur servant surtout à entraîner le broyeur et les boulets en rotation. Elle a l'avantage d'être une machine robuste.

-Séparateur dynamique

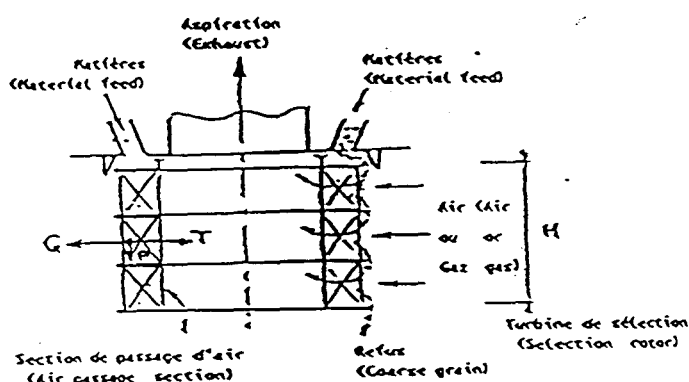
Le séparateur est constitué de cyclones équipés de godets montés sur un arbre à vitesse variable.

La matière entre par des goulottes et est dispersée par des plateaux tournants. Les particules les plus fines sont entraînées vers le bas où elles sont récupérées par un cône , les autres particules sont retenues par la force centrifuge et remontent vers le haut, le long du cylindre formé par le cyclone ; la courbe de partage du séparateur de Cruas présente l'inconvénient d'être fortement dépendante de la charge, c'est-à-dire que selon la masse de

matière entrant dans le séparateur, celui-ci fonctionnant à vitesse constante, la finesse du produit fini et donc le débit des refus vont varier.

La finesse du produit sortant du séparateur est fonction directement de la vitesse de rotation des plateaux: cette vitesse permet d'ajuster la finesse et la blancheur du ciment.

Les refus du séparateur sont directement recirculés au broyeur, qui reçoit ainsi 20 T/h environ de produit provenant de la presse et 60 T/h de produit déjà broyé mais dont la finesse n'est pas encore suffisante.



principe du broyage à boulets
(les boulets tombent sur la matière)

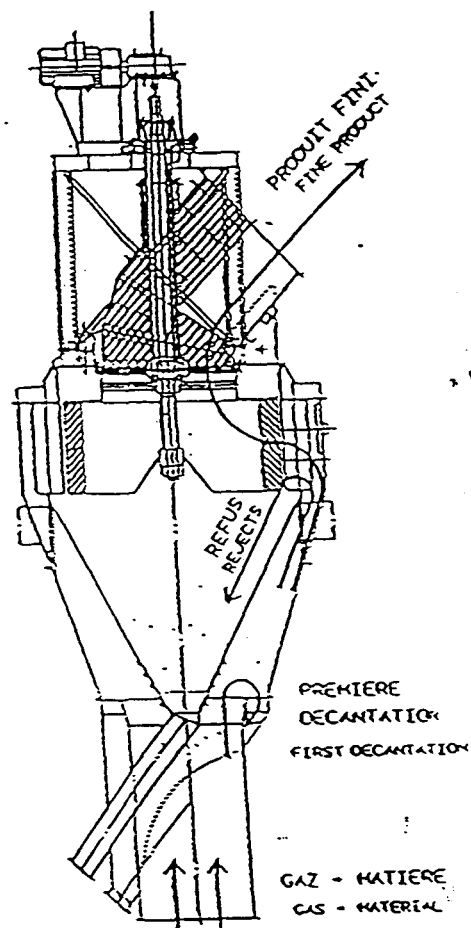
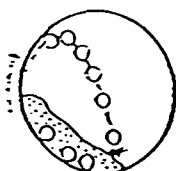


fig [I.3.1] Séparateur dynamique: principe et coupe; broyeur à boulets

I.3.2 Capteurs utilisés en cimenterie

Plusieurs capteurs et actionneurs existent sur le site de Cruas :

- Les doseurs qui fournissent jusqu'à 50 T/h pour le clinker : la somme des débits provenant des doseurs constitue l'alimentation de l'atelier de broyage et sera notée $A(t)$. Le débit nominal (à consigne de vitesse de séparateur non corrigée fixe) sera noté A_0 . En réalité, le débit ne peut dépasser 25 T/h, les transporteurs amenant la matière depuis les doseurs n'étant pas adaptés à un débit supérieur.

- Une oreille électronique existe , dont le rôle est de surveiller le remplissage du broyeur comme dans [Has83].

Il s'agit d'un microphone placé près du broyeur qui enregistre le bruit du choc des boulets sur la paroi ou le lit de matière. Cette mesure est peu précise et mesure le degré de remplissage du broyeur. Elle est influencée [FSC89] par l'humidité, la granulométrie de la matière, mais aussi par des bruits parasites extérieurs et par la présence de poussière sur le microphone (cf manuel oreille Hasler) ; elle est inutilisable à Cruas car le signal varie peu même en cas de perturbations importantes , ceci étant lié à l'installation de l'oreille (d'autres installations ont un signal plus significatif) cf [BCG91] ou [DiP92] .

- Puissance de l'élévateur à godets

Cet élévateur amène la matière de la sortie du broyeur au turbo-séparateur. Le produit est véhiculé à l'intérieur de godets; en l'occurrence, ce signal [BCG91] est traditionnellement utilisé pour des régulations de charge de broyeur, le constructeur et [Maa90] nous donnent les relations suivantes:

$$P_a = Q_t \cdot g \cdot h + P_s + P_l . \quad (I.3.1)$$

où Q_t représente la charge ($T \cdot s^{-1}$) , g l'accélération de la pesanteur ($m \cdot s^{-2}$) , P_a la puissance de l'élévateur (kW) .

P_s (kW) est effort de dragage et P_l (kW) la puissance à vide.

P_s dépend de la granulométrie du produit ($P_s + P_l = 3.8$ kW) de manière fortement non-linéaire; de plus, de par la nature même du processus, le signal est fortement bruité.

H est la hauteur de l'élévateur qui vaut 17 m .

Le temps de transport est d'environ 40 secondes.

Au total , P_a vaut environ 7 kW.

- Puissance du broyeur: Cette mesure est peu significative, l'amplitude de ses variations en fonction de la charge et de la qualité de la matière étant inférieure au bruit du moteur: en effet, cette puissance représente la mise en rotation de la charge et du corps du broyeur, dont plus de 95% est constitué par le broyeur et ses boulets.

Ce signal est utilisé dans certaines installations [BCG91].

- Servomoteur

Il s'agit du servomoteur actionnant le répartiteur sous presse. C'est un organe peu fiable, remplacé d'ailleurs peu après la fin de l'étude par un matériel plus précis et résistant: il faut compter un temps de 1 seconde par % d'ouverture et une précision de 0,5% soit 0.75 T/h en débit.

- Débit des refus: Il est rare d'obtenir ce signal; pour des installations de très grande capacité, la technologie n'est pas encore au point. Toutefois, ce signal est disponible dans des installations de débit plus modeste comme à Cruas.

Le signal provient d'une bascule à impacts; la matière chute sur une plaque basculante, la vitesse étant obtenue par relation de la dynamique :

$$F = q.v.c , \quad (I.3.2)$$

avec c coefficient correcteur, v la vitesse fonction de la hauteur de chute, q le débit et F la force d'impact.

On mesure par le déplacement de la plaque d'impact la force F. Le coefficient de correction est fonction du produit.

La précision est d'environ 2% soit ± 1.5 T/h pour notre point de fonctionnement.

- Mesure de finesse

Cette mesure est une mesure hors ligne permettant d'avoir une estimation de la finesse du produit , au plus toutes les demi-heures. Une mesure de blancheur est également fournie. Il est possible dans certains ateliers d'avoir une mesure en continu par granulométrie laser: cette technologie est coûteuse et de ce fait non employée à Cruas.

I.3.3-Nécessité de garder une charge constante -Mill-Level

Dans [MCG91] et [Cor90], il est conseillé de travailler avec un niveau de trémie ne dépassant pas certaines limites. De la même manière, les auteurs [FCB82] recommandent de garder un certain Mill-Level pour le broyeur (niveau de charge) . Ce Mill-level est constitué d'une pondération de signaux : oreille, refus, puissance de l'élévateur . Il doit être maintenu constant, afin d'obtenir un bon fonctionnement du broyeur et une tenue à l'usure par un fonctionnement plus régulier.

Ce Mill-Level s'écrit:

$$M= k_1.A+k_2.B+k_3.C+k_4.D ; \quad (I.3.3)$$

où A est la charge donc l' inverse du bruit de l'oreille ,

B est l'intensité absorbée par les moteurs d'entraînement ,

C est le débit des refus du séparateur ,

D est le courant absorbé par l'élévateur.

Ce Mill-Level est exprimé en % la valeur de 100% étant obtenue pour un bruit minimal et un courant d'entraînement du broyeur maximal (broyeur plein).

Les K_j sont des constantes déterminées.

On corrige alors ce Mill-Level par une action sur le débit des doseurs.

Il est difficile d'établir des relations entre débit des refus et alimentation des doseurs par les équations de la mécanique ou des considérations granulométriques. En particulier, dans [FSC83] [Obr89] et [RaH83], un modèle complexe basé sur des considérations physiques permet d'obtenir des relations en statique entre les distributions granulométriques du circuit de broyage: ces relations fort complexes ne permettent qu'un dimensionnement du broyeur et non des relations exploitables pour la régulation dudit broyeur.

Ces relations nécessitent de plus des connaissances approfondies sur les caractéristiques du broyeur, de la granulométrie de l'alimentation, et le calcul basé sur les interactions entre couches granulométriques est beaucoup trop long pour un traitement en temps réel.

I.3.4-Méthode d'optimisation du niveau de charge en cimenterie

I.3.4.1-Optimisation

Toute optimisation implique l'existence d'un critère qui doit nous permettre d'évaluer les performances du système de commande.

L'établissement de ce critère n'est pas une opération simple.

Dans le cas du broyage de ciment, plusieurs impératifs doivent d'abord être respectés:

Une première contrainte est le respect de la finesse et de la blancheur du produit.

Le coût est alors représenté par l'énergie électrique (50% de la consommation de l'atelier). L'autre aspect consiste à maximiser la quantité de ciment produit: ceci peut se faire par deux moyens: augmenter le niveau nominal du débit d'alimentation en fonction de la broyabilité du clinker (débit nominal) et éviter les arrêts se produisant sur incidents.

Ces incidents, appelés bourrages, se produisent lors d'une accumulation de matière dans le broyeur et peuvent conduire à des arrêts particulièrement pénibles.

Les critères de composition du ciment (pourcentages d'adjuvants) n'ont pas été pris en compte au cours de cette étude.

Tout d'abord, la méconnaissance de la mesure de la finesse en ligne ne permet pas de travailler à la limite des critères de qualité, ce qui pourrait permettre de gagner sur la production. On doit donc garder une certaine marge de sécurité, l'objectif qualité étant prioritaire.

Le procédé du broyage à boulets consomme principalement l'énergie nécessaire à l'entraînement en rotation du broyeur, dont le poids est constitué à plus de 90% par celui du tube et des boulets.

RAGOT [RaR82] prend pour hypothèse que la puissance consommée en fonction de la charge présente des caractéristiques décrites par la figure [I.3.2].

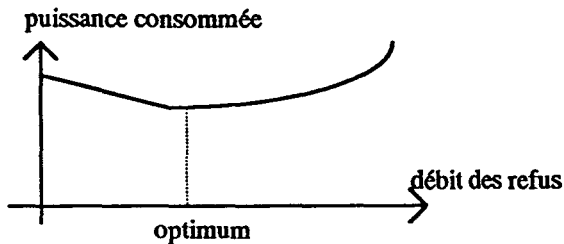


Figure [I.3.2] : Puissance consommée par le broyeur

Lorsque le broyeur est rempli, la matière a tendance à rester autour de l'axe du broyeur, le moment d'inertie varie et le broyeur consomme moins d'énergie; les gains obtenus grâce à ces variations sont toutefois très faibles. Un écart $\pm 10T/h$ de débit à l'entrée du broyeur influence cependant peu sur le rendement énergétique de l'atelier.

Ceci exclut donc une optimisation du critère énergétique, ce qui n'est pas le cas par exemple pour SCAP [BCG91].

J.RAGOT [RaR82] et H.MAA [Maa90] prennent pour hypothèse que le débit de sortie du séparateur (produit fini) est fonction de la charge du broyeur (voir courbe ci- dessous); autrement dit, il existe un point optimal de débit de sortie en fonction du débit d'alimentation et partant de débit des refus.

Il existe un point de fonctionnement optimal pour lequel la production est maximale. Ceci se comprend bien par le schéma suivant: au point optimal, une baisse de produit à l'entrée implique moins de charge résidente (on coupe mieux), moins de refus mais un niveau nominal plus faible.

Augmenter l'alimentation correspond par le jeu de la recirculation à obtenir des particules plus grossières et donc une augmentation des refus et de la charge résiduelle; moins de produit sort du broyeur qui se remplit et donc moins de produit fini arrive aux silos.

En conclusion , un point optimal existe et le but est de s'en écarter le moins possible: le but de l'optimisation va donc être de jouer sur les paramètres de commande pour se rapprocher de ce débit nominal. Contrairement aux hypothèses de BARBIER [Bar82], nous verrons qu'il est possible de se rapprocher d'un tel système.

Estimation du gain économique

Il est important d'avoir une fonction permettant d'estimer le gain d'une stabilisation des refus.

Ce gain peut se chiffrer en :

- gain de 2 à 5 % maximum d'augmentation de production ;
- gain de stabilité – fonctionnement régulier – correspondant à environ 5 à 10% d'arrêts en moins: une fonction économique calculant le gain s'écrirait donc:

(gain de production x bénéfice par tonne) + (diminution du coût des arrêts) ,ce dernier coût étant lié à des frais de personnel , de production retardée, etc...

I.3.4.2–Stabilisation des refus

Pour stabiliser la charge résidente, il s'agit de stabiliser à la fois la finesse et la granulométrie à l'entrée du broyeur , constituée à la fois de l'alimentation venant de la presse et des refus du séparateur et éventuellement des doseurs en cas de fonctionnement du déferrailleur (envoi direct au broyeur).

Il s'agit donc d'obtenir une maille de coupure le plus indépendante possible de la charge, de manière à obtenir une distribution granulométrique des refus la plus régulière possible. Ceci s'obtient en jouant sur la vitesse du turbo-séparateur, le fonctionnement du broyeur devenant plus stable : or, il n'est pas possible d'obtenir en ligne le débit de produit fini, ni la charge résiduelle du broyeur.

Nous avons vu que les données provenant de l'oreille et de l'élévateur à godets sont difficilement utilisables ; il reste le débit des refus du séparateur qui dépend à la fois (voir schéma) de la finesse du produit entrant dans le broyeur et de sa quantité. Cette donnée offre donc une mesure qualitative et quantitative à la fois du fonctionnement du broyeur: une stabilisation du débit des refus, à débit d'alimentation stable, permet de se placer au point optimal de fonctionnement de l'atelier.

Bien entendu si l'on peut dire que sur 10 heures environ les débits nominaux d'entrée et de sortie sont égaux, le temps de stabilisation de l'atelier (transitoires) est long (30 mn minimum) et une optimisation de la montée en production est donc envisageable. comme pour l'atelier de Montalieu[DiP92].

I.3.5–Difficultés rencontrées

I.3.5.1–Interaction entre les variables

Le paragraphe [I.3.4] nous montre que l'objectif est de stabiliser la maille de coupure (la finesse du produit fini mesurée par la taille de la maille d'un tamis) , puis le débit des refus.

Nous allons d'abord recenser les informations qui nous font défaut :

- finesse à l'entrée, à la sortie ou dans le broyeur, à l'entrée de l'atelier; ces mesures ne sont réalisables que par prélèvement ou essais crash (rares et coûteux);
- débit de sortie du broyeur;
- débit de sortie de la presse;
- mesure fiable du poids de la matière dans le broyeur;
- information sur le comportement de la presse (pas de Δp par exemple). Nous rappelons que la presse est constituée de rouleaux tournant à vitesses et écarts sensiblement constants , puisqu'elle est une machine volumétrique;
- information sur le débit de sortie en produit fini.

Ces manques d'information nous conduisent à considérer les paramètres suivants comme variables à commander: la finesse en sortie de séparateur, le débit des refus du broyeur, le niveau de la trémie sur presse, et comme variables de commande le débit d'alimentation de l'atelier et la position du répartiteur sous presse qui indique le pourcentage de matière recirculée vers la trémie donc , en somme , le débit d'entrée du broyeur (et non de l'atelier).

Remarquons d'abord le schéma physique de la circulation de la matière:

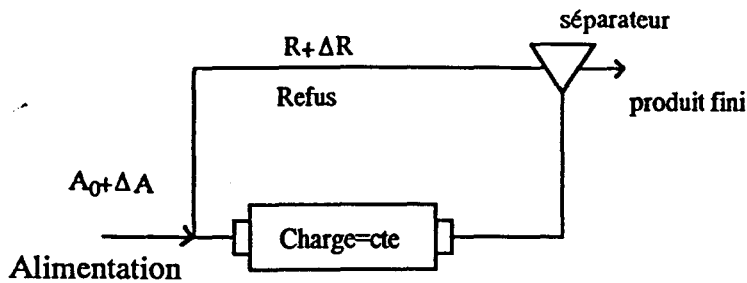


figure [I.3.3]: Schéma de circulation de la matière

Nous pouvons en déduire un premier schéma d'interactions à 3 entrées et 3 sorties:

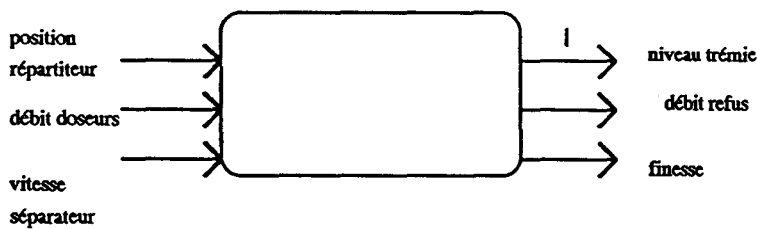


figure [I.3.4] : schéma d'interactions entre les variables

L'intervention process a conduit en 1990 à réaliser une régulation sur le séparateur , ce qui implique des essais sur la finesse $C_V = C_{0V} (1 - (R - R_0) / k)$, (I.3.4)
avec $k=50$, $R_0=50$ T/h , R débit des refus en T/h , C_{0V} consigne initiale de vitesse et C_V vitesse réelle du turbo.

La coupure est considérée comme ne dépendant alors plus de la charge et étant constante, ce qui ramène le séparateur à une courbe de partage de " troisième génération " , c'est-à-dire à coupure presque indépendante de la charge.

On peut remarquer une nette stabilisation de l'atelier. Il est toutefois difficile, compte-tenu des moyens de mesure de la qualité du produit , de faire plus qu'une stabilisation non optimisée ce qui perturbera à terme la boucle des refus.

Ceci nous conduit à supprimer deux variables soit le schéma simplifié suivant:

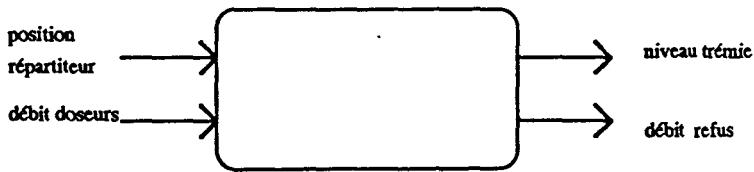
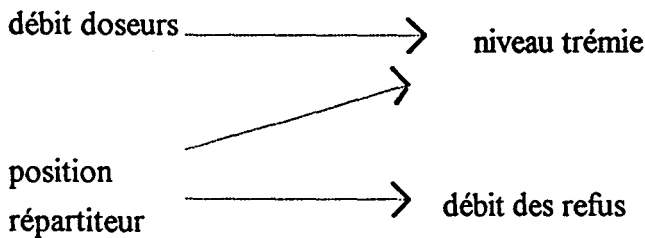


figure [I.3.5] : Schéma d'interactions simplifié

Il faut noter que des essais (Sturtevant) ont été entrepris sur d'autres installations pour réguler les refus en fonction de la vitesse du turbo-séparateur: cela est très difficile , la sensibilité des refus à la vitesse étant trop importante pour obtenir des résultats satisfaisants.

Enfin, le schéma ci-dessous montre que la valeur du débit des refus dépend essentiellement de la position du répartiteur sous presse, alors que cette position modifie le niveau de la trémie (soutirage et recirculation de matière).



figure[I.3.6] : Schéma d'interactions

Les schémas de régulation ont par conséquent été de deux types: le premier d'entre eux fut utilisé en 1990 et 1991.

Cette régulation fonctionna avec succès 3 mois puis des problèmes divers demandèrent un retour au premier schéma : fusage de la matière entre les rouleaux de la presse, passage de particules imbroyables (calcaire) et surtout un niveau trémie trop instable. Lorsque la trémie déborde, des cailloux passent dans le broyeur dont le gammage n'est plus adapté à un tel diamètre.

I.3.5.2 – Retard pur

Nous noterons ensuite la question posée par le retard pur de l'atelier.

La constante de temps est en général assez élevée pour un broyeur: celui de Cruas est de faible diamètre et on peut le considérer comme assez rapide . Un broyeur "cru", broyant la farine avant cuisson, est souvent plus lent et régulé généralement par des indicateurs de tendance (variation du bruit , oreille , etc...) sur une longue période, ces indicateurs variant très faiblement dans le temps dès que le fonctionnement nominal est atteint.

Un broyeur à ciment présente un comportement dynamique plus complexe et plus perturbé.

Un des problèmes principaux est l'existence d'un retard important: or , ces retards sont en général très mal supportés par une régulation classique, bien qu'ils interviennent dans nombre de procédés industriels.

La matière provient d'abord de doseurs: le temps entre l'ordre donné par le système de contrôle-commande régulant le processus et l'arrivée de la matière sur le transporteur est très faible eu égard au temps de retard total. Par contre , le temps d'amenée de la matière à la presse et le passage par celle-ci est déjà d'environ 30 secondes: de plus, la vitesse de vidange de la trémie dépend partiellement de son niveau.

La matière arrive alors sur un transporteur qui la conduit vers le broyeur à une vitesse de l'ordre de 1 m/s qui implique un temps total de retard pur de 30 secondes également. La matière effectue alors un certain parcours dans le broyeur et ce temps de broyage effectif est appelé temps de séjour [Obr89] de la matière. Ce temps de séjour dépend des caractéristiques du broyeur , du gammage des boulets, de la granulométrie et des propriétés de la matière. Il est actuellement à Cruas de 1 minute à une minute 30 secondes, ce qui est très faible: mais il faut considérer le prébroyage de la matière, un certain pourcentage de particules fines existant n'étant peut-être pas broyé dans le broyeur.

Il faut noter à ce sujet l'importance des compartiments, dont la présence peut doubler ou tripler un retard, ceci étant dû à l'accumulation de la matière sur les grilles ou de la baisse de la ventilation résultant de l'adjonction d'une de ces grilles. A Cruas même, les conditions de

broyage ont été changées pendant notre étude : de 2 chambres avec des boulets de gammage différents le broyeur devint monochambre (donnant un temps de séjour de 1 à 2 minutes au lieu de 4 ou 5 minutes).

Enfin la matière emprunte un élévateur à godets et le constructeur nous donne pour cet élévateur un temps de transport variant entre 35 et 40 secondes ce qui donne , en cumulant ces retards purs, un retard entre le débit d'alimentation de l'atelier et le débit des refus de 3 minutes environ (soit avec une période d'échantillonnage de 1 minute un retard pur de 3 périodes environ) .

En général , pour une même installation , même avec des matières de qualités différentes, le retard pur est quasiment constant et dépend peu des caractéristiques du clinker[DIP92] .

I.3.5.3–Perturbations

Le système est de plus perturbé; ici , nous allons recenser ces perturbations sans évaluer de façon précise leur action quantitative.

Des problèmes de marche dégradée apparaissent fréquemment . Ils sont dus à des problèmes de processus tels que des changements de silos de stockage quand ceux-ci sont pleins, ou à des défauts tels que la défection d'un doseur , etc.. : ces incidents conduisant souvent à des arrêts doivent être considérés comme formant partie intégrante du processus mais posent des problèmes pour l'identification et l'évaluation des performances.

Les perturbations proprement dites interviennent sur la qualité de la matière [Oss90b]. D'abord la granulométrie de l'alimentation (on remarque cet effet particulièrement lors d'un déclenchement du détecteur de métaux qui engendre un début de bourrage par l'arrivée dans le broyeur de matière brute) . Ensuite, la dureté ,voire l'humidité , (en particulier, le calcaire se broie mal) perturbent le processus et la presse vient également perturber (phénomène de fusage) le comportement de l'atelier.

A Cruas, le clinker est homogène mais sa dureté peut influencer de façon sensible sur le pilotage d'une installation de broyage.

Ces changements de composition, de dureté, de granulométrie de la matière sont difficilement chiffrables et posent donc un problème de robustesse de la fonction de transfert. Avec une matière de qualité assez constante comme à Cruas, leur action n'est pas déterminante.

L'autre type de perturbations est composé de perturbations liées à des organes mécaniques: nous avons déjà vu les problèmes existant sur la presse mais l'élévateur achemine la matière de manière discontinue vers le séparateur perturbant aussi le système. Le séparateur lui-même, par sa courbe de partage imparfaite, suscite des perturbations. La ventilation joue un rôle non négligeable dans le système de broyage mais il n'y a pas moyen de la modifier (limitation en débit d'air).

De plus, les perturbations peuvent être liées au fonctionnement des capteurs.

Non-linéarités

Des théories [Cor90] en particulier, déterminent un gain statique, et , par une succession de calcul de points statiques, déterminent une courbe théorique entre le débit des refus et le débit d'alimentation, dont la caractéristique est la suivante :

$$R = k.A^\beta , \quad (I.2.5)$$

avec à Cruas $\beta=1.6$.

Il faut nuancer ces affirmations: en particulier, les points trouvés sont en réalité instables. Nous verrons que le broyeur a un comportement intégrateur autour d'un point d'alimentation nominal.

Cette caractéristique ne tient pas compte du retard et les approximations successives pour le calcul supposent une charge circulante constante. La charge circulante est le rapport entre le débit des refus et l'alimentation du broyeur.

De plus, cette équation ne rend pas compte de la réalité autour du point nominal.

Nous avons vu de plus que la courbe des refus en fonction de la charge du broyeur a la forme suivante:

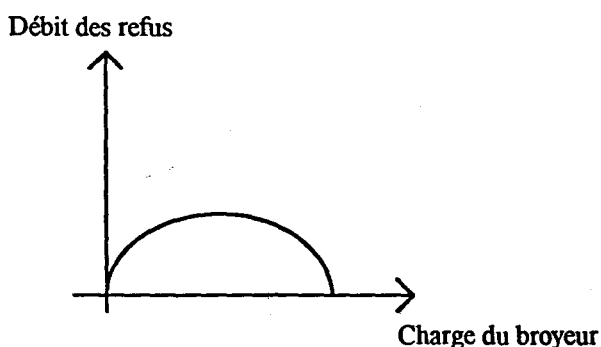


figure [I.3.9]: Optimisation du débit des refus

si on connaît exactement cette fonction [Oss90b] , on peut en déduire une relation entre les débits d'entrée et de sortie du broyeur , soit le schéma ci-dessous où

- a(t) représente l'alimentation du broyeur ,
- r(t) le débit des refus du séparateur,
- s(t) le débit de sortie en produit fini ,
- ch(t) la charge résidente dans le broyeur ,
- u(t) le débit de sortie du broyeur .

La conservation de la matière impose :

$$u(t)=r(t)+a(t)-ch(t) . \tag{I.2.6}$$

$$u(t)=s(t)+r(t) . \tag{I.2.7}$$

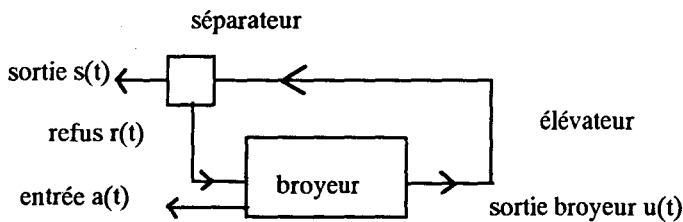


figure [I.3.10] : Schéma non-linéaire

$$\text{nous posons : } ch(t)=d(f(t))/dt=a(t)-s(t) . \tag{I.2.8}$$

$$\text{Nous obtenons } r(t)=u(t)-s(t) . \tag{I.2.9}$$

Lorsque f(t) est connue, nous pouvons connaître le débit des refus du séparateur.

Connaître une des courbes "remplissage du broyeur", "produit fini" , "sortie broyeur" permet de déterminer tous les paramètres du système; toutefois, une telle connaissance est très difficile et l'instrumentation ne permet pas de travailler sur de telles courbes. Nous devons en conclure qu'il est préférable de travailler près d'un point nominal.

Il faut aussi noter [SIB81] (broyage à échelle pilote) , que la charge du broyeur influe sur la répartition granulométrique du débit de produit broyé , donc sur le débit des refus du séparateur.

I.3.6.–Historique de régulations existantes

I.3.6.1 Mill–Level

A Cruas, la régulation consiste en la stabilisation des refus par le débit d'entrée. Elle est plus généralement , pour d'autres ateliers, une combinaison (Mill–Level) des signaux susceptibles d'informer quand au comportement du broyeur.

Ces signaux sont généralement:

- un signal rendant compte du taux de remplissage du broyeur (Δb , bruit capté par un microphone ,plus rarement la puissance du moteur d'entraînement);
- le signal de débit des refus;
- un signal correspondant à la sortie du broyeur (puissance d'un élévateur).

Le plus souvent, la régulation proposée est un simple P.I. , comme à Cruas , soit par une régulation sur les refus ou l'oreille , soit sur le Mill–Level [FCB82] , soit sur un sélecteur (par exemple sur une sélection de l'action la plus faible entre des boucles refus–alimentation , oreille–alimentation ,etc... , ce qui conduit généralement à une régulation "molle" ,c'est–à–dire avec des spécifications en temps de montée trop modestes).

I.3.6.2– Régulations robustes

Le phénomène étant déterministe et de plus quantifiable facilement, il n'est pas apparu opportun de mettre en oeuvre des régulations de type expert (utilisées par ailleurs en cimenterie [Bro90]).

De plus des essais de compromis finesse–alimentation en régulant le débit des refus par la vitesse du séparateur posent des problèmes de qualité.

Le comportement perturbé a généralement conduit à l'élaboration de modèles assez complexes et de méthodes de commande robustes;

– Optimisation de critères globaux avec découpage des variables en domaines de validité.
[Bar82]

Plusieurs types de fonctionnement du broyeur sont déterminés , une régulation étant associée à chaque domaine de fonctionnement .

- régulation par 2 boucles P.I.D. en cascade: [Has83]

Cette régulation peut se faire dans le cas où la finesse est mesurée en ligne , ce qui est rare (et cher , l'appareil utilisé étant un granulomètre laser): une boucle P.I. lente maintient la finesse constante et la deuxième maintient le débit des refus constant. Les deux régulateurs agissent sur la vitesse du séparateur actionné par un moteur à courant continu. La stabilisation du refus permet la stabilisation de la composition du produit entrant dans le broyeur et les variations quantitatives et qualitatives du ciment à l'entrée du turbo-séparateur sont faibles.

Le remplissage correct du broyeur est surveillé par une oreille placée sur celui-ci et le flux du broyeur est surveillé par la variation de puissance en sortie de broyeur. Ce type de régulation n'est pas utilisable dans notre cas (la mesure de la finesse est inexistante et le séparateur est trop sensible).

- régulation par système autoadaptatif [BoS76]

Ici , cette régulation se fait par une modélisation puis adaptation des coefficients pour un broyeur cru: nous reviendrons plus tard sur les systèmes autoadaptatifs . De même , un filtre autoadaptatif fut appliqué dans [DuH 86] , cette méthode étant toutefois trop liée à des considérations physiques.

Des algorithmes L.Q.G. multivariables furent également testés [NiY86] , ce qui est exclu dans notre étude (contrôle de finesse) .

-La régulation par un système adaptato-prédictif:

Le système utilise un modèle du processus pour prédire l'évolution des variables , le modèle étant adapté à chaque période. Pour l'atelier considéré, une première boucle asservissait le débit clinker à l'oreille. La consigne de puissance de l'élévateur est commandée par la consigne de l'oreille (niveau de remplissage). Un module permet ensuite d'examiner l'augmentation à long terme de la production, permettant de travailler à la limite du bourrage.

Toutefois, dans leur article [BCG91] , SCAP ne précise pas l'initialisation de son modèle ni le choix a priori de la structure (les coefficients étant alors ajustés par un système adaptatif) . De la même manière, le choix de l'horizon de prédiction en fonction du retard n'est pas abordé .

I.4 Description du procédé tunnelier

1.4.1 – Principe des tunneliers

- Principe général

Les méthodes de creusement avec un bouclier de type fermé ont remplacé avantageusement les méthodes traditionnelles pour le franchissement des zones sensibles et délicates : en particulier, il devient nécessaire de travailler dans des terrains meubles et de natures très diversifiées. Les machines utilisées sont constituées d'un système de coupe (un disque en rotation) et d'un système de marinage et évacuation des déblais. Il faut tenir compte de la sécurité d'emploi du tunnelier, de l'économie des coûts d'exploitation , de l'amélioration de la productivité, de la qualité des travaux, de la protection de l'environnement.

Il est surtout nécessaire d'éviter les tassements et déformations du sol en surface pendant l'excavation, particulièrement en milieu urbain: pour cela, il est nécessaire d'obtenir un équilibre de pression entre la terre et la nappe au front par contrôle de la pression dans la chambre . La chambre permet en particulier de confiner le terrain donc d'avoir la possibilité de contrôler les contraintes exercées sur le terrain en avant du bouclier. En particulier, des efforts trop importants auront dans un premier temps un effet de soulèvement du terrain, ou un effondrement si l'on rencontre une faille, suivi d'un tassement lorsque l'équilibre sera rompu entre le sol et le tunnelier après passage de celui-ci (contraintes résiduelles).

Le sol agit sur le disque de coupe par une pression active causée par sa déconsolidation pendant l'excavation et une pression passive causée par la poussée du disque lorsque celui-ci pousse sur le front et déplace le terrain. Une pression de consigne comprise entre ces deux pressions est fixée. La pression mesurée par les capteurs situés dans la chambre doit être très proche de cette pression. Le tunnelier avance en maintenant une certaine pression contre la pression du terrain et de la nappe au front de taille, maintenant le front en pressurisation et le gardant stable.

Nous noterons que ce processus nécessite une montée en production rapide, une excavation dure environ 1/2 heure à 1 heure dans de bonnes conditions , avec souvent des arrêts intermédiaires pour vider les bennes remplies de matériau, ou pour nettoyer les tuyauteries (processus " à pression de boue "). Un arrêt de la foration dont la durée est de la moitié du temps de travail permet de poser les voussoirs du tunnel.

- EPBS (Bouclier à pression de terre)

Le type de bouclier étudié, appelé bouclier à pression de terre (en anglais EPBS ou Earth Pressure Balanced Shield) est équipé d'un système d'évacuation des déblais excavés remplissant la chambre isolée par une cloison étanche (tunneliers à confinement) . L'évacuation est assurée par une vis d'Archimède qui extrait les déblais, équipement qui caractérise cette installation .

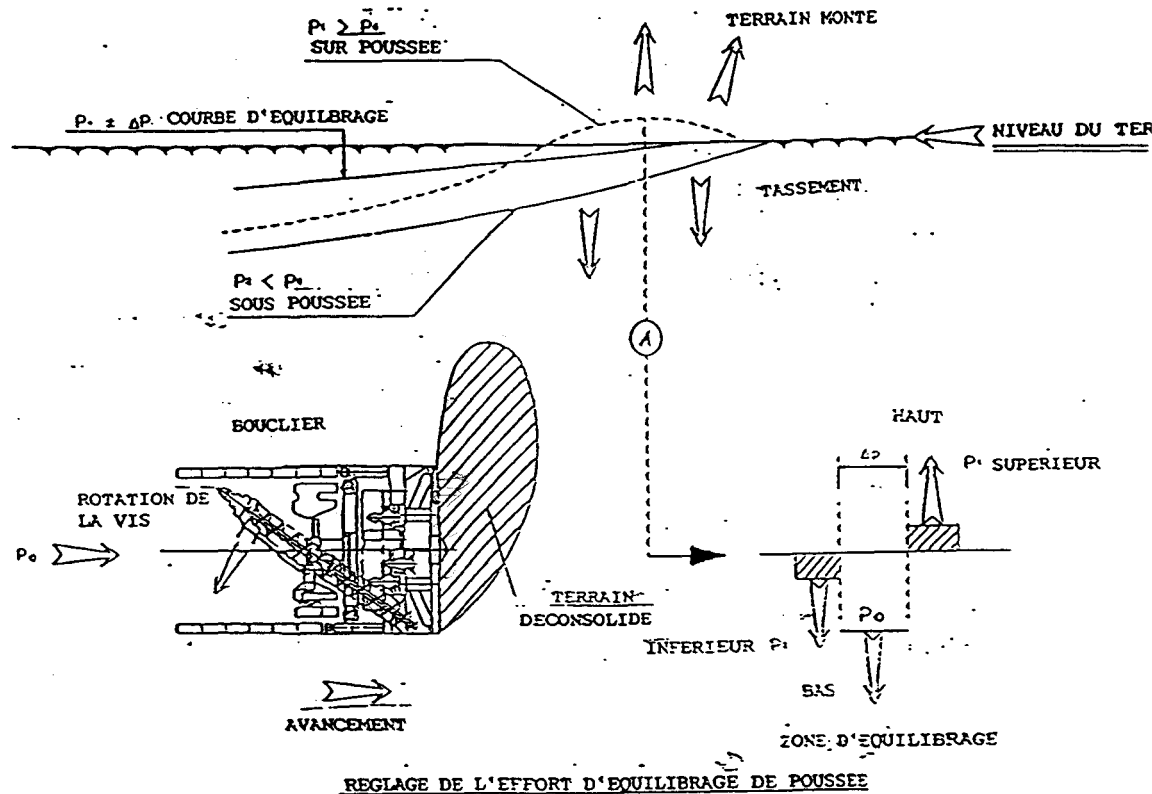


fig [I.4.1] : *Nécessité du maintien de la pression du front de taille*

L'accès au front de taille est impossible ; le terrain doit être cependant maintenu stable, une telle exécution nécessitant une compétence élevée pour répondre aux variations de qualité de terrain . Ce terrain n'est pas connu à l'avance , sauf par des sondages dans le sol qui permettent de connaître sur une certaine distance le type de matériau excavé (si les sondages sont trop espacés, le terrain trop hétérogène ou un obstacle naturel ou humain , trou , pieu , briques , cailloux , terrain trop fracturé, etc ...), peuvent venir perturber brusquement (et sans que l'on puisse toujours le prédire) le front de taille.

Le marin , (mélange de terrain à l'intérieur de la chambre) est généralement mélangé à une boue ou de la mousse injectées sous pression qui permettent soit d'améliorer ses caractéristiques soit de faciliter l'extraction de blocs de terre en les enrobant et en lubrifiant le système d'extraction .Ces apports peuvent jouer un rôle très important dans la conduite de la machine.

1.4.2 Capteurs utilisés en tunneliers

La tête est de type fermé avec des bras munis d'outils de coupe qui ramènent le matériau dans des fentes le long des bras , et des plaques d'obturation entre les bras. Les bras tournant avec la tête permettent de réduire la taille des morceaux de matériaux à évacuer.

Les mesures de pression de terre s'effectuent par l'intermédiaire de 5 capteurs 0–20 bars montés au centre, de chaque côté ,en haut et en bas de la tête.

Ceux situés sur l'axe sont généralement utilisés pour la régulation.

A l'avant et à l'arrière du corps de vis, deux capteurs de même type sont utilisés , de manière à s'assurer de l'existence d'une perte de charge suffisante dans le corps de la vis.

Ces capteurs sont en fait constitués de jauges de contraintes, placées derrière la surface du capteur sensible à la pression. Seule la pression verticale est mesurée, toutefois de légères perturbations affectent ce capteur particulièrement dans le cas où de grosses mottes d'argile appuient de façon différente sur la surface sensible. Ces capteurs nécessitent une calibration mais leur non-linéarité est de 0.05 % , leur précision (sensibilité à la température, au matériau ...) est inférieure à 0.5 % , d'après les références constructeur.

La vis elle-même est commandée par des moteurs hydrauliques eux-mêmes actionnés par des pompes. La chaîne d'action comprend donc ces moteurs dont le temps de réaction est faible . La plus grande difficulté vient des pompes à cause de problèmes divers (précision , hystérésis due au solénoïde ...) ce qui confère une certaine imprécision (variable floue) à cette commande.

I.4.3- Le maintien de la pression de terre : paramètres mis en jeu et moyens d'action: un système complexe

I.4.3.1 Comment contrôler la pression de terre

Le maintien de la pression de terre est effectué dans la chambre; celle-ci est généralement remplie de marin, la terre comprimée et donc compacte ne peut donc être chassée et remplacée par aucune autre matière. La différence entre les densités du marin et du terrain sont faibles, les boulders (blocs de matière compacts) eux-mêmes ne peuvent entrer facilement dans la chambre de coupe et les phénomènes de tassement en surface sont alors limités.

Il existe plusieurs moyens de contrôler la pression de terre:[Kaw87] et [TTS92]

- par les injections (débit d'injection de boue);
- par la vitesse d'avancement – poussée sur les vérins de poussée du disque (vitesse de la vis manuelle);
- par la vitesse de la vis d'extraction (vitesse d'avance manuelle);
- par l'asservissement de cette vitesse de vis à la vitesse d'avance –contrôle des débits excavés et extraits (en sortie de vis).

La première méthode est généralement utilisée simplement pour diminuer les couples du disque ou de la vis et donc de permettre d'extraire ou d'avancer plus vite. [TTS92]

Le mode manuel de pilotage d'un EPBS est généralement effectué de la façon suivante, en période d'excavation courante: le pilote choisit généralement la vitesse de poussée, elle est souvent maintenue pour des raisons de stabilité du front la plus constante possible. Un pilote averti commencera en général par une rampe sur cette vitesse d'avance pour éviter les problèmes d'à-coups.

Le pilote [Ser90], après avoir fait tourner le disque de manière à assouplir le marin, démarre la vis d'extraction. Il a fixé l'ouverture de la trappe de vis qui influe en réalité sur la formation d'un bouchon de terre dans la vis et donc sur la stabilité de la pression dans cette vis, et donc au front. La pression dans la vis doit diminuer linéairement au cours de l'excavation. La vitesse de la vis est ajustée en fonction des variations de la pression de terre et la vitesse d'avance est diminuée ou augmentée selon l'amplitude de ces variations.

La vitesse de la vis est en effet la variable de commande principale généralement utilisée pour contrôler un EPBS. En général, un P.I.D. contrôle la vitesse en fonction des variations de pression.

En pratique en effet, agir directement sur la vitesse d'avance pose des problèmes :

- de rapidité de réaction – moteurs hydrauliques puissants;
- de précision : cette vitesse est généralement obtenue à partir de l'élongation des vérins de poussée, et moyennée sur un certain temps (donc passée par un filtre de l'ordre de quelques secondes) ;
- de stabilité . Il est préférable de garder une vitesse constante;
- de guidage.

Nous préférons, comme tous les concepteurs de systèmes, agir en priorité sur la vis d'extraction . Pourtant, cette vis ne représente qu'une partie des moyens d'action sur la machine . En effet , les systèmes entièrement automatisés se servent par exemple de la montée anormale du couple du disque pour réduire la vitesse d'avance. [Nis92]

Souvent, la commande P.I.D. pose le problème , sauf en cas de terrain très fluide et homogène, de réglages continus des paramètres dus à la variation des types de terrain au cours de l'excavation. La pression varie en général entre ± 10 et ± 15 % autour de la pression de consigne et $\pm 5\%$ pour un terrain homogène.

Enfin, l'adéquation entre terrains extraits et excavés est un facteur important de la stabilisation du tunnelier.

Cette relation est pondérée par le phénomène de foisonnement du terrain excavé (le terrain dans la chambre est moins structuré et son volume augmente) , et par les taux de remplissages réels de la tête et de la vis.

Nous obtenons l'équation fondamentale de la régulation de la circulation du terrain par la relation de conservation de la matière:

$$\frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot v \cdot f = \frac{\pi}{4} \cdot (D_e^2 - D_i^2) \cdot (p - e) \cdot \omega \cdot \eta , \quad (I.3.1)$$

où :

D est le diamètre extérieur de la tête ,

v est la vitesse instantanée de sortie des vérins de poussée ,

D_e représente le diamètre extérieur de la vis ,

D_i est le diamètre intérieur de la vis ,

p est le pas de la vis ,

e est l'épaisseur des pales de la vis ,

ω est la vitesse instantanée de la vis ,

f est le foisonnement du terrain naturel excavé au front (le terrain déconsolidé a tendance à augmenter de volume dans la chambre) , ce coefficient valant 1,2 pour de l'argile et 1,7 pour certains sables ,

η est le rendement de l'ensemble tête-vis et vaut environ de 0.8 à 0.9 (mode confiné).

Nous remarquons tout de suite que cette équation qui est reprise par tous les articles concernant la régulation de pression dans un tunnelier [Sat92] n'est pas viable:

- il existe des paramètres inconnus tels que le foisonnement ou le rendement;
- dans les installations les plus modernes, le poids est directement obtenu par une bascule située à la sortie de la vis d'extraction . La précision de cette bascule ne dépasse pas 10 % (en considérant les conditions de travail réelles et le tarage réel du capteur , elle ne fait que "donner une idée" de la valeur de pesée et demande aussi la connaissance de masses volumiques qui ne sont pas connues a priori , et même parfois totalement inconnues).

Nous verrons plus loin la relation de problèmes physiques et d'influence sur la pression.

I.4.3.2 Paramètres influant sur le contrôle du tunnelier

Nous remarquerons tout d'abord que le phénomène étant très complexe, il est quasi-impossible d'offrir une modélisation exhaustive par une approche purement physique . On peut tout juste se baser sur une relation telle que celle proposée en [Sat92] .

La vitesse d'avance et la vitesse de la vis sont les deux variables de commande principales du tunnelier. On peut y ajouter des réglages importants effectués en début de stroke (un stroke est la pose d'un anneau de tunnel , l'excavation étant une partie de ce travail et la pose des voussoirs la seconde , une excavation durant environ de 1/2 h à une heure ou plus , à une vitesse atteignant 5 cm/mn) .

Les commandes principales concernent l'ouverture de la trappe de la vis , la vitesse du disque , les injections.

Les variables influant sur la pression proviennent du terrain , et ne sont pas modélisables: un terrain est une entité à la composition et au comportement complexes, pouvant avoir des réactions très différentes selon sa nature, même si une des caractéristiques d'un EPBS est de fonctionner avec un marin assez homogène. Donner une liste exhaustive des problèmes générés par le terrain est impossible , trop de paramètres entrant en jeu (cohésion , teneur en eau ...). La rencontre de phénomènes tels que présence de nappe phréatique , de vides , de terrain fracturé par des failles , de blocs plus durs ,etc... , n'est pas à exclure [Nis92] .

De plus , des incidents liés à des défauts processus peuvent apparaître (défauts de pompes ,etc...).

Le processus présente donc à la fois les caractéristiques d'être :

- non linéaire et "sectorisé". Prenons un exemple: une chute de la pression de terre peut signifier la rencontre d'un vide , auquel cas il ne faudra pas réagir de la même manière que si cette chute se produit parce que la vitesse de vis est trop élevée par rapport à la vitesse d'avance . Il s'agit en plus de pouvoir diagnostiquer certains cas importants;
- multivariable;
- perturbé par des perturbations souvent aléatoires;
- difficile à réguler car à variations rapides .

Ces constatations ne permettent pas d'avoir recours à un correcteur traditionnel ni à un système purement expert.

Pour obtenir une régulation plus fiable que celles existant actuellement , c'est-à-dire une action P.I.D. sur la vitesse de vis ,régulée par la pression du front de taille , et une limitation de la vitesse d'avance en fonction du couple du disque, cette dernière action étant souvent manuelle , il est difficile de calculer des fonctions de transfert simples (par exemple , la relation liant la pression de terre à la vitesse de la vis d'extraction est dépendante de la vitesse d'avance).

Il est de même difficile de créer un schéma auto-adaptatif qui s'appuie sur la détermination préalable d'un modèle.

Il nous reste une approche "système expert": une telle approche peut être soit couplée avec une régulation "traditionnelle" (utilisant une fonction de transfert) avec un découpage de l'ensemble des variables de commande et de régulation en sous-ensembles . La régulation dans les sous-ensembles pose le même problème que pour le système global (régulation multivariable complexe) .

Nous devons donc essayer d'avoir un système multivariable permettant à la fois l'introduction de règles et la régulation, tout en étant suffisamment robuste . Nous proposons donc d'utiliser des méthodes de commande floue (fuzzy control) [TTS92] pour réguler la pression de front de taille et optimiser certains paramètres, et de coupler cette commande à une commande traditionnelle.

I.5 Conclusion et orientation de la recherche

I.5.1 Comparaison des deux études

Ces deux études ont pour point commun essentiel d'être liées à du matériel fabriqué par la société FCB: ce sont des machines de dimensions respectables et dont le pilotage requiert la présence d'un opérateur averti.

Les objectifs sont toutefois différents: pour la conduite de broyeur, il existe un problème technique, généralement à l'installation de la machine (mise au point de la régulation), mais l'enjeu est d'optimiser à moyen terme la production.

En ce qui concerne les tunneliers, l'objectif de la stabilisation de pression est lui aussi, à moyen terme, de permettre d'obtenir ou de dépasser les performances nominales. Ceci n'est possible qu'à la condition de remplir un critère particulièrement sévère, en l'occurrence le maintien d'une pression au front de taille dans des limites assez contraignantes.

Le type de processus diffère également selon l'étude. En cimenterie, le système est rapidement ramené à un système monovisible linéaire, dont les problèmes majeurs sont les non-linéarités, le bruit et les incertitudes. En tunneliers, le processus est d'abord multivariable, non-linéaire, et faisant intervenir des paramètres complexes (sans compter là aussi les phénomènes de bruit).

Ils présentent tous les deux la caractéristique de régulation de flux de matière variable dans le temps, en qualité, quantité, etc...

Cette étude est un passage en revue de méthodes robustes permettant d'optimiser de tels systèmes.

I.5.2 Orientation de la recherche en cimenterie

L'étude du processus nous montre que l'optimisation est tout d'abord assez limitée: elle ne peut prétendre à un accroissement direct de la qualité, non plus que du rendement énergétique ni de la production. Elle constitue une stabilisation d'un des indicateurs, le débit des refus, qui donne à la fois une information sur la qualité et la quantité de la matière traitée par l'atelier. Un débit des refus stable permet :

- de maintenir un atelier stable en évitant les phénomènes de bourrage;
- de pouvoir se placer le plus près possible de l'alimentation nominale du broyeur et donc d'augmenter le débit moyen de la machine et donc la production finale.

Pour cela , les études précédentes nous montrent que:

- un modèle compliqué est difficile à mettre en oeuvre ;
- un modèle compliqué est de plus sensible aux perturbations assez importantes et surtout inquantifiables – aléatoires ou dépendant de la matière;
- l'algorithme de commande doit donc être robuste vis-à-vis des perturbations, des erreurs de modélisation, et être enfin suffisamment performant pour pouvoir prendre en compte les perturbations engendrées par le phénomène du retard pur.

Le système sera donc si possible décrit par un modèle linéaire , avec retard pur et d'un ordre ne dépassant pas 3. De plus, toute méthode faisant intervenir une modélisation fine de perturbations ne nous semble pas appropriée; nous verrons en effet qu'il existe des incertitudes suffisamment importantes sur la fonction de transfert (perturbations ou non-linéarités) , et difficilement modélisables. Nous pensons donc qu'il ne faut pas intégrer perturbations et incertitudes dans un modèle de perturbations qui risquerait d'être beaucoup moins fiable que la fonction de transfert et peut-être même plus du tout fiable . Nous préférons employer une commande suffisamment insensible à ces erreurs de modélisation.

Nous nous proposons de passer brièvement en revue divers algorithmes permettant de commander un tel système de manière la plus robuste possible.

Il est en effet d'après de Larminat [Lar91] difficile d'intégrer la notion de robustesse dans les méthodes récentes (basées sur les méthodes de Kalman [Bor92b]) alors qu'un P.I.D. donne par exemple un algorithme robuste.

Nous nous intéresserons surtout à la faible sensibilité aux erreurs de modèle qui est un aspect de la robustesse.

Des propriétés dont l'automaticien peut souhaiter la robustesse sont la stabilité, le temps de réponse, les amplitudes d'oscillations , etc.. et la compensation d'incertitudes.

Un phénomène est en effet robuste s'il garantit un niveau de performances malgré des incertitudes par rapport à son modèle : il faut toutefois préciser le modèle de description des incertitudes et le type de performances considéré. Nous nous limiterons à des incertitudes structurées (variations de paramètres) .

La définition de P.Borne [Bor92b] revient plus à la stabilisation d'un ensemble de processus (commande robuste) ou encore la garantie de certaines performances.

L'optimisation d'un critère énergétique va dans le sens d'un système plus robuste.

Dans [Lar91] , [LaD86] et [Bor93] , nous trouvons les propositions suivantes:

- approches dans l'espace d'état : LQ (linéaire quadratique) LQG (linear quadratic gaussian) , LTR (loop transfer recovery) ;
- méthodes fréquentielles telles que commande CRONE , commande H_{∞} , etc., où les commandes sont réellement de type robuste puisque l'on définit des gabarits d'incertitudes ;
- commandes telles que commande adaptative, commande prédictive, R.S.T. , commande floue , placement de pôles

Nous montrerons dans le chapitre III la motivation de nos choix et donnerons un bref aperçu de ces méthodes.

1.4.3 Orientation de la recherche en tunneliers

Pour obtenir une fonction fiable du système de contrôle du front de taille, il serait nécessaire de mesurer les tassements en temps réel, ce qui n'est pas fait en pratique. Il s'agit donc de maintenir la pression du front à une pression de consigne et de changer si besoin est cette pression en fonction des tassements mesurés [Kaw87] .

Il faut ensuite essayer d'abaisser les coûts et augmenter la productivité:

- abaisser les couples du disque et de la vis en minimisant les injections (consommation en énergie et adjuvants) ;
- maximiser la vitesse d'avance.

Ces objectifs peuvent être contradictoires et des impératifs ou des limitations existent: par exemple, on ne peut faire varier continuellement la vitesse d'avance (d'une part sous peine d' usure de la machine , et d'autre part à cause du temps de réaction non négligeable du matériel hydraulique qui ne constitue pas un organe de régulation . Il faut tenir compte de ce dernier aspect pour l'établissement d'une commande sur certains actionneurs , par exemple la vitesse du disque) .

Il faut de plus cerner les objectifs, certaines erreurs étant à éviter (il n'est pas nécessaire et par contre dangereux par exemple de maximiser le débit du terrain extrait , le chantier n'étant pas bénéficiaire sur l'augmentation du tonnage de matière excavée mais bien sur l'avance réalisée) .

La commande floue (fuzzy control) permet d'intégrer suffisamment de paramètres, en tenant compte de leur importance relative dans l'élaboration de la régulation. Elle permet grâce à un système de règles, à la fois de maximiser une variable et d'en stabiliser une autre

, [Bro90] et [TTS92] ,et nous verrons l'intérêt de sa composition avec une commande traditionnelle.

Conclusion

Les procédés étudiés mettent en évidence des problèmes complexes. La solution la plus acceptable est la détermination de commandes robustes adaptées au cas de figure correspondant.

L'optimisation d'un atelier de broyage dépend de la stabilisation du débit des refus du séparateur . Le retard pur des boucles de régulation et l'importance des perturbations ont été étudiés.

La modélisation du système de marinage d'un tunnelier à pression de terre est complexe. La détermination d'une commande doit donc prendre en compte l'expertise dégagée d'une connaissance empirique du procédé.

Identification du broyeur

II.1 Introduction

Nous étudierons le schéma de circulation de la matière entre l'entrée du broyeur et la sortie du séparateur. Le retour du débit des refus vers l'entrée du broyeur induit pour le système broyeur-séparateur un phénomène d'intégration autour d'une valeur nominale de débit d'alimentation.

La fonction de transfert du système alimentation -débit des refus contient donc un intégrateur et un retard pur.

Nous évoquerons le caractère expérimental lié à l'identification sur site.

La méthode des Moindre Carrés récursifs est utilisée pour la détermination du modèle.

La méthodologie utilisant une perturbation du type S.B.P.A. (Séquence Binaire Pseudo-Aléatoire) autour d'un point de fonctionnement normal ainsi que le protocole d'identification sont décrits.

La seconde partie expose les résultats obtenus : les incertitudes de mesure nous conduisent à choisir un modèle du type premier ordre avec intégrateur et retard pur. Le retard pur est particulièrement important et le niveau de perturbation élevé . Afin de contrebalancer les effets néfastes des perturbations , ainsi que des incertitudes sur le modèle , il est nécessaire de déterminer une commande robuste capable de nous garantir un certain niveau de performances .

Les derniers résultats présentés correspondent aux configurations réalisées suite aux différentes modifications survenues au cours de l'étude.

II.2 Une approche process

II.2.1 – Considérations physiques

Reprenons nos schémas [I.3.10] de circulation de la matière , entre l'entrée du broyeur et la sortie du séparateur.

Nous formulons l'hypothèse que la charge du broyeur est constante (hypothèse assez différente du phénomène réel).

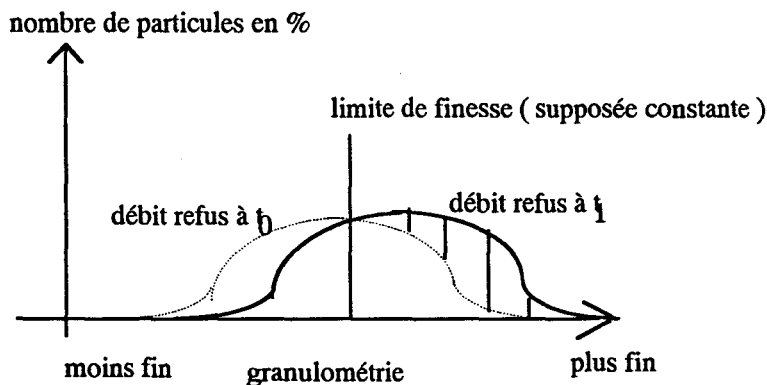
Nous formons l'hypothèse (plus juste celle-ci) , qu'il existe à réglage de maille de coupure constante (c'est-à-dire à vitesse de turbo-séparateur adaptée pour obtenir une finesse constante) , un débit d'alimentation "nominal" du broyeur pour lequel le fonctionnement du broyeur est stable.

Nous appelons A_0 cette valeur de l'alimentation du broyeur, $A(t)$ l'alimentation au temps t , ΔA la variation d'alimentation = $A(t) - A_0$, et $R(t)$ la valeur du débit des refus au temps t .

Considérons notre fonctionnement au point $A_0, R(t)$ au temps $t=t_0$.

On superpose alors un incrément de débit ΔA au débit nominal .

Après passage dans le broyeur , si l'on forme l'hypothèse que la distribution granulométrique est plus grossière de façon uniforme (fig [II.2.1]) , le débit des refus sera donc augmenté de la zone hachurée correspondante .



fig[II.2.1] : Réponse à un échelon d'alimentation : étude granulométrique

A $t = t_0 + t_1$, le débit nominal du broyeur sera augmenté de ΔR . Si ΔA est constant , cette même valeur va se retrouver périodiquement et le débit des refus va donc suivre une pente intégratrice , la fonction de transfert pourra donc s'écrire :

$$F(p) = \frac{\Delta R}{A - A_0} = \frac{k}{p} H_1(p) \quad , \quad (\text{II.2.1})$$

où H_1 est une fonction de transfert sans intégrateur, de gain unitaire ($H_1(0)=1$) , stable et k le gain du système .

Notons que cette caractéristique de transfert correspond à une variation autour du débit nominal A_0 . Nous verrons que ce débit peut varier avec la finesse.

Si l'on prend en compte le processus réel , nous n'avons pas considéré le retard pur propre à l'ensemble broyeur-séparateur , non plus que le retard pur doseurs-broyeur. La fonction de transfert réelle s'écrit alors:

$$F(p) = \frac{\Delta R}{A - A_0} = \frac{k}{p} H_1(p) \cdot e^{-T_r p} \quad , \quad (\text{II.2.2})$$

où T_r est le retard pur du système.

La réponse à un échelon d'une telle fonction aura bien la forme de la figure [II.2.2] . Notons que l'on a un échelon par rapport au débit nominal.

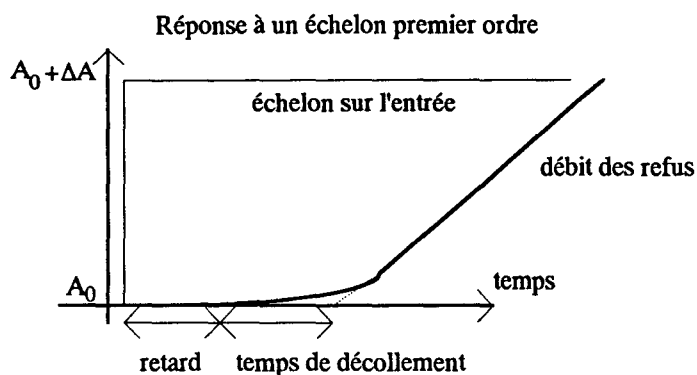


figure [II.2.2] Réponse à un échelon du premier ordre

II.2.2- Conclusion sur la forme de la fonction de transfert

Nous pouvons déduire approximativement de la réponse précédente que notre fonction de transfert est composée d'un intégrateur pur, d'un retard pur, et d'une fonction de transfert sans retard et de gain statique unité caractérisant le fonctionnement interne du broyeur et du séparateur. Cette approche simplifiée est en fait très proche de la réalité, soit :

$$F(p) = \frac{\Delta R}{A - A_0} = \frac{k}{p} H_1(p) \cdot e^{-T_p p} \quad (II.2.3)$$

Une telle approche process simple n'est pas toujours possible mais constitue encore un des meilleurs moyens d'avoir une idée sur la fonction de transfert.

II.2.3 Hypothèse non-linéaire

Les schémas [I.3.10] et [I.3.3] nous montrent que nous pouvons établir une relation entre l'entrée et la sortie du broyeur soit [Maa90] :

$$u(t) = r(t) + a(t) - ch(t) \quad (II.2.4)$$

$$u(t) = s(t) + r(t) \quad (II.2.5)$$

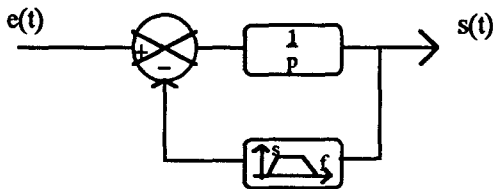
aux retards près.

$$\text{Si l'on connaît } f(t) \text{ telle que } \frac{\partial f(t)}{\partial t} = ch(t), \quad (II.2.5)$$

$$\text{on obtient } a(t) - s(t) = ch(t), \text{ et} \quad (II.2.6)$$

$$r(t) = u(t) - s(t) \quad (II.2.7)$$

En connaissant $u(f)$ ou $s(f)$, on peut trouver le schéma fonctionnel déduit des équations ci-dessus:



fig[II.2.3] : Schéma non-linéaire

dont on déduit tous les paramètres du système.

En pratique, trouver f est une tâche impossible, compte-tenu de l'absence d'information et de la difficulté d'établir une telle courbe non-linéaire: les travaux agissant dans ce sens n'ont pas été poursuivis.

II.3- Réalisation de l'identification

II.3.1- Considérations générales sur l'identification

Identifier un système revient d'abord à se donner un modèle de connaissance. Ce modèle est bien sûr dépendant du type de process, mais aussi des moyens d'identification et surtout de l'utilité du modèle. Un modèle ne saurait en effet se suffire à lui-même et l'identification doit prendre en compte un critère d'utilité. Celui que nous retiendrons est un critère de simplicité du modèle, compte-tenu des moyens de mise en place d'un algorithme de commande qui doit être peu gourmand en calculs.

De plus, notre système doit être généralisable à tout type de broyeur.

Notre première étape va donc être de caractériser le type de modèle mathématique à mettre en oeuvre: c'est le but du paragraphe [II.2.2] s'appuyant sur des considérations process. Elle ne permet pas encore de dégager un domaine de validité.

Les étapes suivantes seront caractérisées par l'identification proprement dite qui s'attachera à trouver les paramètres du modèle et enfin la vérification des résultats.

Nous allons tout d'abord:

- prétraiter le signal;
- préparer un protocole de simulation;
- estimer les valeurs des paramètres par une méthode appropriée.

II.3.2-Prétraitement

- période d'échantillonnage

La conversion analogique-digitale des signaux d'entrée sortie est réalisée toutes les périodes d'échantillonnage T_e . Le choix de la période d'échantillonnage est important, un sur-échantillonnage pouvant se révéler en particulier néfaste.

Un régulateur numérique est un filtre susceptible d'être décrit par une équation aux différences finies.

Il faut obtenir un minimum de 6 à 8 échantillons dans la sinusoïde du signal continu de plus courte période pour obtenir un signal bien échantillonné. Si la fréquence maximale est supérieure à la moitié de la fréquence d'échantillonnage, donc si cette fréquence d'échantillonnage est trop faible, on observe (fig [II.3.1]) un phénomène de repliement du spectre avec apparition de distorsions (Richalet [Ric91]). Il faut donc filtrer le signal analogique avec un filtre anti-repliement, ce qu'on n'a pu faire pour des raisons pratiques.

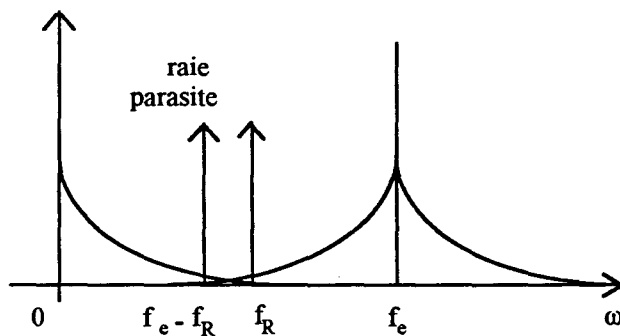


fig [II.3.1] : Raie parasite repliée $f_e - f_R$

En pratique la période d'échantillonnage sera prise de l'ordre de $\frac{T_R}{40}$ où T_R représente le temps de réponse à 95% du processus à réguler, T_R étant grossièrement évalué (par un échelon par exemple).

A Cruas, la réponse à un échelon montre que le temps de montée est de 30 mn environ ce qui nous incite à prendre une période d'échantillonnage de 1 minute (compatible avec la technologie d'enregistrement du système de contrôle-commande).

Un filtrage est effectué sur la sortie "débit des refus" par deux filtres passe-bas mis en cascade et possédant une constante de temps de l'ordre du tiers du temps de réponse . Ceci représente un filtre de décrétement $e^{-9/40} = 0.8$; nous avons pris quand cela était nécessaire un filtre de décrétement de l'ordre de 0.8 à 0.9 .

Avec une composante intégratrice, nous risquons pour une composante d'entrée non nulle , de masquer l'identification (sensibilité plus importante de l'intégrateur) . En réalité, la composante continue de nos signaux d'entrée est nulle en moyenne (autour du point nominal A_0 puisque nous utiliserons des signaux proches de bruits blancs) , ce qui nous évite ce genre de problème (Ljung [Lju87]) .

La composante continue est éliminée, mais pour l'entrée on prendra en réalité la valeur $A-A_0$ avec A_0 débit nominal (à consigne de vitesse de séparateur fixe) . (fig [II.3.2])

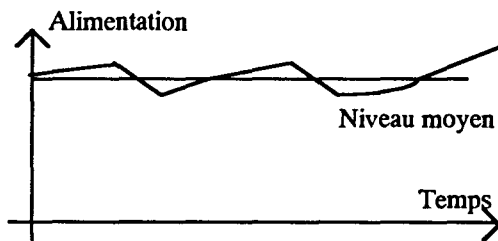


fig [II.3.2] : Débit d'alimentation

II.4- Algorithme des Moindres Carrés Récursifs

II.4.1 Algorithme

Soit un certain nombre de couples entrées sorties y , u , avec y sortie , u entrée échantillonnées .

Nous cherchons à établir entre $y(t+1)$ et les E/S précédentes une relation du type linéaire en utilisant un prédicteur du type:

$$\hat{y}(t, \theta) = \varphi^T(t) \cdot \theta , \tag{II.4.1}$$

où \hat{y} est l'estimation de y , et où θ est le vecteur des paramètres de la fonction de transfert $[a_j, b_j]$, le vecteur des variables correspondant étant φ :

$$\varphi(t) = [-y(t-1), \dots, -y(t-n_a), u(t-1), \dots, u(t-n_b)]^T , \tag{II.4.2}$$

où n_a et n_b sont les degrés des dénominateurs et numérateurs de la fonction de transfert en z , et a_i et b_i les coefficients de cette fonction .

La sortie $\hat{y}(t+1)$ estimée par le modèle s'écrit donc :

$$\hat{y}(t+1) = - \sum_{i=0}^{i=n_a} \hat{a}_i \cdot y(t-i) + \sum_{i=0}^{i=n_b} \hat{b}_i \cdot u(t-i) , \quad (\text{II.4.3})$$

L'objectif est de minimiser à chaque instant la somme $J(t)$ des erreurs quadratiques (critère des Moindres Carrés), soit

$$J(t) = \sum_{i=1}^{i=t} \left[y(i) - \hat{\theta}(t)^T \cdot \varphi(i-1) \right]^2 , \quad (\text{II.4.4})$$

et donc de trouver les valeurs des paramètres permettant de minimiser ce critère , soit:

$$\frac{\partial J(t)}{\partial \hat{\theta}(t)} = -2 \cdot \sum_{i=1}^{i=t} \left[y(i) - \hat{\theta}(t)^T \cdot \varphi(i-1) \right] \cdot \varphi(i-1) = 0 \quad (\text{II.4.5})$$

et

$$\hat{\theta}(t) = \left(\sum_{i=1}^{i=t} \varphi(i-1) \cdot \varphi(i-1)^T \right)^{-1} \cdot \sum_{i=1}^{i=t} y(i) \cdot \varphi(i-1) . \quad (\text{II.4.6})$$

Le gain d'adaptation $F(t)$, vaut au temps $t+1$:

$$\hat{\theta}(t+1) = F(t+1) \cdot \sum_{i=1}^{i=t+1} y(i) \cdot \varphi(i-1) , \quad (\text{II.4.7})$$

$$\text{avec } F(t+1)^{-1} = F(t)^{-1} + \varphi(t) \cdot \varphi(t)^T . \quad (\text{II.4.8})$$

Nous tirons de cette équation la valeur du vecteur des paramètres, en utilisant le lemme d'inversion des matrices, ce qui nous donne récursivement les équations suivantes:

$$\hat{\theta}(t+1) = \hat{\theta}(t) + F(t) \cdot \varphi(t) \cdot \varepsilon(t+1) , \quad (\text{II.4.9})$$

$$F(t+1) = F(t) - \frac{F(t) \cdot \varphi(t) \cdot \varphi(t)^T \cdot F(t)}{1 + \varphi(t)^T \cdot F(t) \cdot \varphi(t)} \quad (\text{II.4.10})$$

$$\text{et } \varepsilon(t+1) = \frac{y(t+1) - \hat{\theta}(t)^T \cdot \varphi(t)}{1 + \varphi(t)^T \cdot F(t) \cdot \varphi(t)} \quad (\text{II.4.11})$$

L'algorithme utilisé peut être amélioré en introduisant des séquences de pondération dans la formule de l'inverse du gain d'adaptation, ce qui conduit aux équations suivantes:

$$F(t+1)^{-1} = \lambda_1 \cdot F(t)^{-1} + \lambda_2 \cdot \varphi(t) \cdot \varphi(t)^T, \quad (\text{II.4.12})$$

avec $0 < \lambda_1(t) \leq 1$ et $0 \leq \lambda_2(t) < 2$.

Si $\lambda_2 = \lambda_1$ et si λ_1 est prise quelconque, nous obtenons une formule à oubli fixe (pondération plus faible sur les données anciennes)

$$F(t+1) = \frac{1}{\lambda_1(t)} \left(F(t) - \frac{F(t) \cdot \varphi(t) \cdot \varphi(t)^T \cdot F(t)}{\frac{\lambda_1(t)}{\lambda_2(t)} + \varphi(t)^T \cdot F(t) \cdot \varphi(t)} \right) \quad (\text{II.4.13})$$

Les conditions initiales devraient être $F(t)^{-1} = 0$, à $t=0$ θ arbitraire, ce qui ne peut être utilisé. Une possibilité est d'initialiser l'algorithme à $t > \{\text{retard pur}\}$ lorsque $F(t)$ est inversible.

Un choix plus simple est d'initialiser $F(t)$ à P_0 ; si dans l'équation ci-dessous, P_0 ou t sont grands, la différence entre les algorithmes récursif et non récursif est négligeable:

$$\hat{\theta}(t) = \left[P_0^{-1} + \sum_{k=1}^{k=t} \varphi(k) \cdot \varphi(k)^T \right]^{-1} \cdot \left[P_0^{-1} \cdot \theta_I + \sum_{k=1}^{k=t} \varphi(k) \cdot y(k) \right] \quad (\text{Ljung [LjS83]}) \quad (\text{II.4.14})$$

Nous pouvons donc trouver les paramètres du modèle à partir des données; nous pouvons ensuite utiliser les autres méthodes de P.I.M (procédure d'identification utilisée) qui sont toutes basées sur le même principe.

Nous avons aussi utilisé sur quelques expériences les méthodes des Moindres Carrés Etendus et des Moindres Carrés Généralisés, à titre de comparaison; le résultat ne s'est pas

avéré très intéressant – sensiblement le même que celui obtenu par les Moindres Carrés, ou des critères de validation moins bons.

Nous rappelons que la méthode des M.C.E donne un modèle procédé–perturbation de la forme:

$$A(z^{-1}).y(z^{-1}) = z^{-d}B(z^{-1}).u(z^{-1}) + C(z^{-1}).\varepsilon(z^{-1}) . \quad (\text{II.4.15})$$

On identifie simultanément le modèle de la perturbation et celui du procédé. L'équation finale sera la même que celle des Moindres Carrés Récursifs, à ceci près que ([DuL83]) :

$$\hat{\theta}^T = [\hat{a}_1(t), \dots, \hat{a}_n(t), \hat{b}_1(t), \dots, \hat{b}_n(t), \hat{c}_1(t), \dots, \hat{c}_n(t)] \quad (\text{II.4.16})$$

$$\text{et } \varphi^T(t) = [-y(t), \dots, -y(t - n_a + 1), u(t), \dots, u(t - n_b + 1), \varepsilon(t), \dots, \varepsilon(t - n_c + 1)] . (\text{II.4.17})$$

La méthode des M.C.G. identifie une structure de la forme:

$$A(z^{-1}).y(z^{-1}) = z^{-d}B(z^{-1}).u(z^{-1}) + \frac{1}{C(z^{-1})}(z^{-1}).\varepsilon(z^{-1}) . \quad (\text{II.4.18})$$

On définit cette fois-ci une quantité α telle que

$\alpha(t) = A(t, z^{-1})y(t) + z^{-d}B(t, z^{-1})u(t)$ (II.4.19) et on va chercher à identifier à la fois α et la sortie du procédé, ce qui nous donne le même type d'algorithme qu'avec une méthode type Moindre Carrés :

$$\hat{\theta}^T = [\hat{a}_1(t), \dots, \hat{a}_n(t), \hat{b}_1(t), \dots, \hat{b}_n(t), \hat{c}_1(t), \dots, \hat{c}_{n_c}(t)] \quad (\text{II.4.20})$$

$$\varphi^T(t) = [-y(t), \dots, -y(t - n_a + 1), u(t), \dots, u(t - n_b + 1), \alpha(t), \dots, \alpha(t - n_c + 1)] . (\text{II.4.21})$$

Nous remarquerons que nous utilisons un modèle de la perturbation: nous verrons qu'il est plus intéressant de modéliser de manière "implicite" dans le correcteur que d'obtenir un modèle de perturbation dont les coefficients ne seront vraisemblablement jamais constants (en prenant des coefficients relatifs à un enregistrement, les résultats seraient alors non généralisables , les perturbations n'étant pas déterministes dans notre cas).

II.3.2-Validation

La méthode des Moindres Carrés, bien que simple, permet d'identifier correctement beaucoup de modèles: elle appelle cependant plusieurs commentaires.

Nous appelons $R(t) = F(t)^{-1}$ et la sortie est effectivement générée par :

$$\hat{y}(t, \theta) = \varphi^T(t) \cdot \theta + v_0(t), \quad (\text{II.4.22})$$

$v_0(t)$ étant une séquence de bruit quelconque. Notons θ_0 une valeur exacte du vecteur des paramètres.

Nous obtenons alors:

$$\begin{aligned} \hat{\theta}(t) &= F(t) \cdot \sum_{k=1}^t \varphi(k) \cdot [\varphi^T(k) \cdot \theta_0 + v_0(k)] \\ &= \theta_0 + F(t) \cdot \sum_{k=1}^t \varphi(k) \cdot v_0(k) \end{aligned} \quad (\text{II.4.23})$$

Pour que l'algorithme donne des résultats satisfaisants, il faudrait que $\hat{\theta}$ soit proche de θ_0 , et qu'il converge vers θ_0 lorsque t tend vers l'infini. (Ljung [Lju87]).

Si $v_0(t)$ est faible par rapport à $\varphi(t)$, le terme d'erreur sera faible.

Si $v_0(t)$ est stationnaire et aléatoire, et l'entrée quasi-stationnaire, la matrice $R(t) = F(t)^{-1}$ convergera vers une valeur R^* quand t tend vers l'infini.

De même

$$\sum_{k=1}^t \varphi(k) \cdot v_0(k) \xrightarrow{t \rightarrow \infty} h^* \quad (\text{II.4.24})$$

Donc, si R^* est non-singulière:

$$\hat{\theta} \xrightarrow{t \rightarrow \infty} \theta_0 + F^* \cdot h^* \quad (\text{II.4.25})$$

En conclusion, pour que $\hat{\theta}$ converge vers θ_0 , il faut :

- R^* non-singulière (par exemple si u et $v_0(t)$ indépendants);
- $h^* = 0$. Ceci sera vrai si $v_0(t)$ est un bruit blanc, ou si u est indépendante du bruit de moyenne nulle v_0 , et $n_a = 0$.

Il existe donc un biais, si la perturbation n'est pas un bruit blanc, ou si les conditions ci-dessus ne sont pas requises, ce qui explique que la méthode des Moindres Carrés soit généralement complétée par d'autres méthodes, afin de vérifier sa validité.

En pratique, la méthode des Moindres Carrés donne cependant des résultats suffisants pour que l'on puisse l'utiliser (tout du moins dans un cas comme le notre).

Dans le progiciel d'identification, la validation d'un modèle est effectuée lorsque l'erreur décrite ci-dessus est un bruit blanc ,soit (Landau [Lan88]) :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} E(e(t)e(t-i)) = 0, \quad (\text{II.4.26})$$

où E est l'espérance mathématique et $i=1,2,3 \dots$

Autrement dit l'erreur est considérée comme étant aléatoire, de faible amplitude , de moyenne nulle (ce n'est pas le cas pour le processus réel , mais la séquence de perturbations est intégrée dans l'établissement du modèle!) .

Le critère pratique retenu par P.I.M. (puisqu'en réalité les conditions ci-dessus ne sont jamais vérifiées) est, si

$$R(0) = \sum_{t=1}^{i-1} \epsilon^2(t), \quad (\text{II.4.27})$$

où $\epsilon(t)$ est la séquence des erreurs de prédiction résiduelles:

$$R(i) = \sum_{t=1}^{i-1} \epsilon(t) \cdot \epsilon(t-i) \quad (\text{II.4.28})$$

$$\text{avec } RN(i) = \frac{R(i)}{R(0)}, \quad (\text{II.4.28})$$

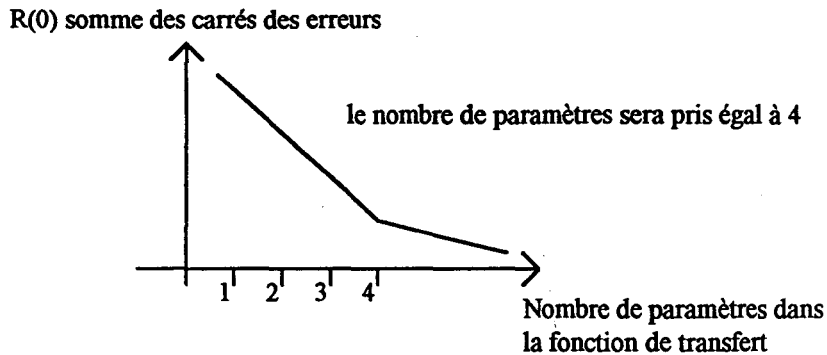
de considérer empiriquement comme "bon" un modèle tel que $RN(i) = \frac{R(i)}{R(0)} < 0.17$ pour tout i . Un critère trop bon implique une simplification du modèle (ordre inférieur) .

Ceci nous montre que le modèle ne peut être qu'approché. De plus, il semble difficile d'éliminer le biais sur les paramètres sauf en faisant intervenir une modélisation de la perturbation, ce que nous n'avons pas voulu faire.

Il faut signaler la difficulté à connaître l'ordre du modèle [NaM87]. En effet, pratiquement, pour connaître l'ordre du modèle , si n est le nombre total de paramètres à déterminer soit $n=$ (degré du numérateur de la fonction de transfert+degré de son

dénominateur), la courbe représentant $R(0)$ en fonction du nombre de paramètres de la fonction de transfert doit présenter pour une valeur de n une cassure, c'est-à-dire qu'à partir de ce n le modèle n'est plus sensiblement amélioré (fig [II.4.1]).

En toute rigueur, le système est d'ordre infini, le critère ci-dessus n'est qu'un critère à partir duquel on peut considérer que l'ordre supérieur est "inutile".



fig[II.4.1] Détermination de l'ordre du modèle

En pratique, nous pouvons remarquer que notre traitement est effectué autour d'un point de consigne. Toutefois, notre résultat s'avère généralisable sur une large plage de fonctionnement.

II.5 Aspects pratiques

II.5.1 Méthodologie de traitement

P.I.M., Progiciel d'Identification des Modèles de la société ADAPTECH, est un outil permettant d'identifier un modèle linéaire quelconque. Nous n'utilisons pas les structures de modèle faisant intervenir les perturbations, afin d'obtenir un modèle certes moins fin mais plus robuste. Le modèle n'étant pas tout à fait linéaire, un modèle des perturbations est entaché d'erreur.

Nous choisissons une structure du type $y = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} u$, où y est la sortie, u l'entrée, B et A polynômes, du type $y = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} u + w(t)$, où $w(t)$ est la perturbation.

Les autres structures de modèles qui font intervenir des modélisations de perturbations et des méthodes d'identification telles que les Moindres Carrés Généralisés ne sont pas appliquées car le modèle est trop fin compte-tenu des incertitudes estimées.

Une identification commence systématiquement par la détermination des ordres n_a et n_b des polynômes A et B , la méthode des Moindres Carrés Récursifs avec gain décroissant est appliquée. Cette méthode permet de déterminer le retard pur du système. Le degré n_a est initialisé à 2 car cette valeur permet en pratique de caractériser correctement la plupart des processus industriels et n_b est initialisé à 10 pour prendre en compte d'éventuels retards. Quand les d premiers caractères de $B(z^{-1})$ sont négligeables devant le $d+1$ ème ,le retard est pris égal à d . n_b est alors réinitialisé à 2 et l'on pose alors $y = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} z^{-d} u$.

Nous faisons ensuite varier n_b et surtout n_a , ordre du système.

Le progiciel calcule alors par l'algorithme décrit en [II.4] les paramètres de la fonction de transfert. Dans les mêmes conditions, l'ordre du système est pris égal à 1,2,3 puis 4 et après validation, la valeur du critère est comparée à celle des ordres inférieurs et supérieurs. Par exemple, sur le fichier de 484 données E/S ayant servi à la validation , le critère $R(0)$ égal à la somme des carrés des erreurs sortie modèle/sortie réelle valait 89 (en T/h) pour un ordre 1 , 61 pour un ordre 2 , 60 pour un ordre 3 . L'ordre du système (entrée répartiteur , sortie refus) est donc manifestement 2 , puisque le critère n'est pas amélioré de façon sensible en passant à un ordre supérieur (avec un retard pur nul).

Si la validation est insatisfaisante (valeur du critère trop élevée) , le gain d'adaptation est changé (trace constante puis facteur d'oubli de 0.985, 0.98 ,0.97 successivement) toujours avec la méthode des Moindres Carrés Récursifs.

Si cela ne s'avère pas suffisant, la méthode puis la structure peuvent être changées. Nous n'avons jamais eu à le faire et les tests effectués avec ces méthodes n'ont pas montré une amélioration sensible de la valeur du critère. L'expérience montre de la même manière qu'un deuxième ordre est suffisant pour modéliser le système et que dans certains cas, [DiP92] ,un premier ordre (ou même un intégrateur pur , l'inverse de la constante de temps étant négligeable) permet une modélisation correcte.

Nous remarquerons que plusieurs expériences ,avec des jeux de données différents, permettent de valider le modèle .

II.5.2 Protocole d'essais

Le protocole [Ric91] influence pour un niveau d'iso-distance donné les fonctions de sensibilités, donc le conditionnement puis l'incertitude sur les paramètres.

L'influence du bruit dépend aussi du protocole.

Le protocole permet de déterminer :

- l' horizon de l'essai;
- le niveau d'excitation;
- la structure du signal.

L'horizon est limité par la non-stationnarité du système, l'objectif de sécurité, le temps imparti, ainsi que par le risque de perturbation dû aux incidents de production.

Il faut toutefois exciter les basses fréquences du processus [II.5.4] et en particulier le régime permanent (gain statique).

On est limité en amplitude par la non-linéarité du système, les impératifs de production et de stabilité, toutefois, il faut une excitation détectable par les capteurs.

Le protocole le plus intéressant consiste à identifier une première fois grossièrement et d'ajuster ensuite l'horizon et le spectre des signaux.

Enfin, une identification sur ce type de produit requiert des sécurités informatiques programmées dans le système de contrôle-commande , permettant de rebasculer immédiatement sur la régulation normale.

On peut essayer d'optimiser le protocole en envoyant par exemple un signal permettant de déterminer le gain statique puis des signaux de fréquence plus élevée pour trouver plus finement la constante de temps, en faisant un compromis entre les deux types d'expériences.

Nous allons montrer ci-dessous la manière de trouver des signaux d'entrée appropriés.

II.5.3-S.B.P.A

Pour valider les modèles , une entrée suffisamment "riche" en fréquences est nécessaire . Nous allons en rappeler la justification [Lju87] :

Nous cherchons à ce que les expérimentations soient significatives, c'est-à-dire à ce que l'ensemble des données soit suffisamment riche en information par rapport à l'ensemble des modèles possibles du processus. Il est donc nécessaire , pour un ensemble de données Z , et deux modèles W_1 et W_2 appartenant à l'ensemble des modèles déterminés pour notre processus, que:

$$\overline{E}[W_1(q) - W_2(q).Z(t)]^2 = 0 \rightarrow W_1(e^{j\omega}) = W_2(e^{j\omega}) \quad \forall \omega , \quad (\text{II.5.1})$$

avec q opérateur avance , et \overline{E} espérance mathématique.

Si on est en boucle ouverte on montre que, si ΔG est la différence entre les fonctions de transfert en ω de deux modèles d'un même système:

$$|\Delta G(e^{j\omega})|^2 \Phi_u(\omega) = 0 \quad \forall \omega , \quad \text{où } \Phi_u \text{ est le spectre de } u . \quad (\text{II.5.2})$$

$\Delta G(e^{j\omega}) = 0$ si $u(t)$, quasi-stationnaire, est une excitation persistante soit:

$$\Phi_u(\omega) > 0 \quad \forall \omega. \quad (\text{II.5.3})$$

Ljung[Lju87] montre que l'expérience est suffisamment riche en information si l'entrée est une excitation persistante. Si le numérateur et le dénominateur sont de degré n , le spectre de l'entrée doit être non nul en $2n$ points (en fait une entrée excitation persistante d'ordre $2n$), ce qui est vrai par exemple si u est constituée de n sinusoïdes de fréquences différentes.

Nous avons réalisé la génération d'un pseudo-bruit blanc: nous avons repris pour cela l'algorithme donné par Landau [Lan88].

Toutefois, l'expérience ne permet qu'exceptionnellement, compte tenu de sa durée (de l'ordre de quelques heures) la réalisation des conditions d'expérience normales. Une perturbation, liée le plus souvent à un incident de production, vient souvent altérer les données obtenues: très généralement, le protocole SBPA est gardé mais un ajustement est effectué en cours de route (incrément supplémentaire pendant un certain temps).

Le véritable incident est constitué par l'arrêt de la machine qui peut alors fausser l'expérience.

Les SBPA sont engendrées par des registres à décalage bouclés (en fait, on obtient une séquence de créneaux de longueurs variables, chaque séquence étant répétée périodiquement) (fig [II.5.1]) (Borne [Bor92a]).

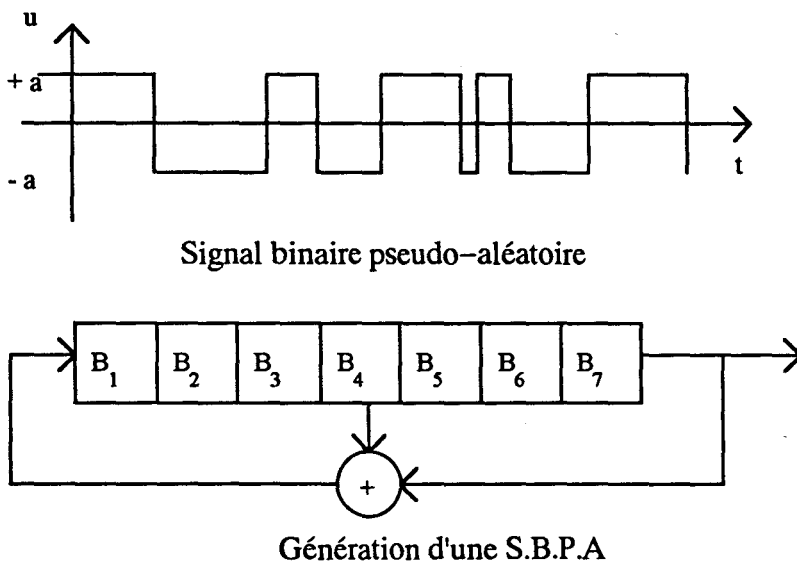


fig [II.5.1] Séquence Binaire Pseudo-Aléatoire

Pour bien identifier, il faut que l'impulsion de durée maximale permette d'identifier le gain statique, donc que cette durée soit supérieure au temps de montée du procédé.

En réalité, cette condition conduit généralement à des durées d'expériences prohibitives : en effet , la longueur de l'essai doit être au moins égal à celui de la S.B.P.A. de manière à bien exciter toutes les fréquences du broyeur . La longueur de la SBPA étant égale à 2^n-1 , n étant égal au quotient de la division du temps de montée par la période d'échantillonnage , il est généralement impossible d'effectuer l'essai dans sa totalité sans incident lié à la marche normale du broyeur .

En pratique, la période de la SBPA est un multiple de la période d'échantillonnage, ce qui est en fait un préjudice pour les fréquences les plus élevées, qui risquent de ne pas être excitées (la longueur du créneau de base étant plus élevée) .

Nous avons donc utilisé la méthodologie suivante: envoi d'un échelon, puis de SBPA avec une amplitude suffisamment élevée pour que l'entrée excite convenablement le système sans toutefois perturber les impératifs de production [DiP92].

II.5.4–Résultats et simulations

Plusieurs résultats ont été établis , et cela pour 2 types de fonctions de transfert.

Tout d'abord , pour la fonction de transfert entre le débit des refus du séparateur dynamique et le débit de l'alimentation formé par la somme des débits des doseurs .

Plusieurs changements de process ont demandé des campagnes d'identification:

– Au lancement de l'étude , le broyeur travaillait seul. Il lui fut adjoint une presse [I.2] en 1990: dans [Oss90a] et [Maa90] , 2 fonctions de transfert furent établies, du premier ordre avec constante de temps et retard pur, par une méthodologie "excitation par SBPA en boucle ouverte et traitement par la méthode des Moindres Carrés".

– broyeur seul :

$$\frac{y(z^{-1})}{u(z^{-1})} = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} = \frac{0.18 \cdot z^{-1}}{1 - 0.991 \cdot z^{-1}} \cdot z^{-6}, \quad (\text{II.5.4})$$

avec y le débit refus , u le débit d'alimentation des doseurs .

- broyeur+presse :

$$\frac{y(z^{-1})}{u(z^{-1})} = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} = \frac{0.2 \cdot z^{-1}}{1 - 0.999 \cdot z^{-1}} \cdot z^{-6} \quad (\text{II.5.5})$$

Ces résultats appellent quelques commentaires: la presse change d'abord le débit nominal A_0 qui est passé de 13 T/H à 18.5 T/h . On remarque un caractère plus perturbé avec la presse. Les résultats ne sont pas extrêmement différents entre les deux types de fonctionnement , ce qui laisse supposer que la presse est une machine influant peu sur le système de manière quantitative et que son action se porte sur une réduction granulométrique régulière. On rappelle aussi que la période d'échantillonnage est de 1 minute.

D'autre part, le retard pur est très élevé, ce qui laisse présager des difficultés non pour stabiliser (la chaîne d'action contient déjà un intégrateur pur) mais pour maîtriser le problème des variations.

Nous signalons qu'à ce moment, le séparateur n'était pas encore stabilisé, ce qui peut fausser les résultats.

La deuxième campagne permettant d'identifier a montré [Die91] l'effet des cloisons sur l'établissement de la fonction de transfert, la cloison séparant les deux compartiments ayant été enlevée. La fonction de transfert n'est pas non plus sensiblement différente, mais le retard pur chute de 3 minutes , ce qui est énorme, et le système est moins perturbé.

Cette fonction de transfert fut confirmée par la suite (lancement d'échelons lors de campagnes de commande):

$$\frac{\Delta R(z^{-1})}{(A - A_0)(z^{-1})} = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} = \frac{0.141 \cdot z^{-1} + 0.152 \cdot z^{-2}}{(1 - z^{-1}) \cdot (1 - 0.805 \cdot z^{-1})} \cdot z^{-3}, \quad (\text{II.5.6})$$

avec ΔR =variation des refus et A Alimentation doseurs , la période d'échantillonnage restant égale à 1 minute .

- en juin 1991 l'alimentation A_0 était amenée à 21,5 T/h , la constante de temps et le retard pur étant inchangés mais le gain variant soit une fonction de transfert :

$$\frac{\Delta R(z^{-1})}{(A - A_0)(z^{-1})} = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} = \frac{0.045 \cdot z^{-1} + 0.047 \cdot z^{-2}}{(1 - z^{-1}) \cdot (1 - 0.847 \cdot z^{-1})} \cdot z^{-3}. \quad (\text{II.5.7})$$

- Fonction de transfert entre débit des refus et répartiteur sous presse .

Le retard pur étant très important, nous avons essayé, la presse étant considérée comme une machine " volumétrique", à mieux stabiliser le broyeur lui-même, nous avons donc obtenu une fonction de transfert entre le débit des refus et la position du répartiteur sous presse, soit:

$$\frac{\Delta R(z^{-1})}{(Pr_0 - Pr)(z^{-1})} = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} = \frac{0.228.z^{-1} + 0.126.z^{-2}}{(1 - z^{-1})(1 - 0.56.z^{-1})} \quad (II.5.8)$$

avec ΔR la variation de débit refus, Pr la position du répartiteur, Pr_0 la position nominale.

Le retard pur est très faible, ce qui est surprenant puisque normalement un retard d'au moins 1 mn 30 devrait être observé : je n'ai pas d'explication physique du phénomène mais sur des courbes (échantillonnage toutes les 10 secondes), la réaction du système à une perturbation est quasi-immédiate.

Le tableau ci-dessous permet un récapitulatif de l'identification de la boucle des refus $y = B/A u$, y et u étant explicités dans le tableau " TABLE I : Résultats d'identification "

type	broyeur seul bichambre	broyeur +presse bichambre	broyeur+ presse monochambre	broyeur monochambre répartiteur
$y = \frac{B}{A} u$ y sortie , u entrée	y=débit refus u=débit alimentation	y=débit refus u= débit alimentation	y= Δ refus u= $A - A_0$ A=débit alimentation	y= Δ refus u= $Pr - Pr_0$ Pr=position répartiteur
A_0 (T/h) débit nominal	13	18.5	18.5 et 21.5	21.5 $Pr_0 = 57\%$
fonction de transfert	$\frac{0.18.z^{-1}}{1 - 0.991.z^{-1}} \cdot z^{-6}$	$\frac{0.2.z^{-1}}{1 - 0.999.z^{-1}} \cdot z^{-6}$	$\frac{0.141.z^{-1} + 0.152.z^{-2}}{(1 - z^{-1})(1 - 0.805.z^{-1})} \cdot z^{-3}$ et $\frac{0.045.z^{-1} + 0.047.z^{-2}}{(1 - z^{-1})(1 - 0.847.z^{-1})} \cdot z^{-3}$	$\frac{0.228.z^{-1} + 0.126.z^{-2}}{(1 - z^{-1})(1 - 0.56.z^{-1})} \cdot z^{-3}$

" TABLE I : Résultats d'identification "

Résultats de simulations:

Nous montrons à titre d'exemples les courbes réelles et des simulations avec un modèle faisant intervenir $A_0=18.5$ T/h et une fonction de transfert avec retard pur de 3 unités de temps.

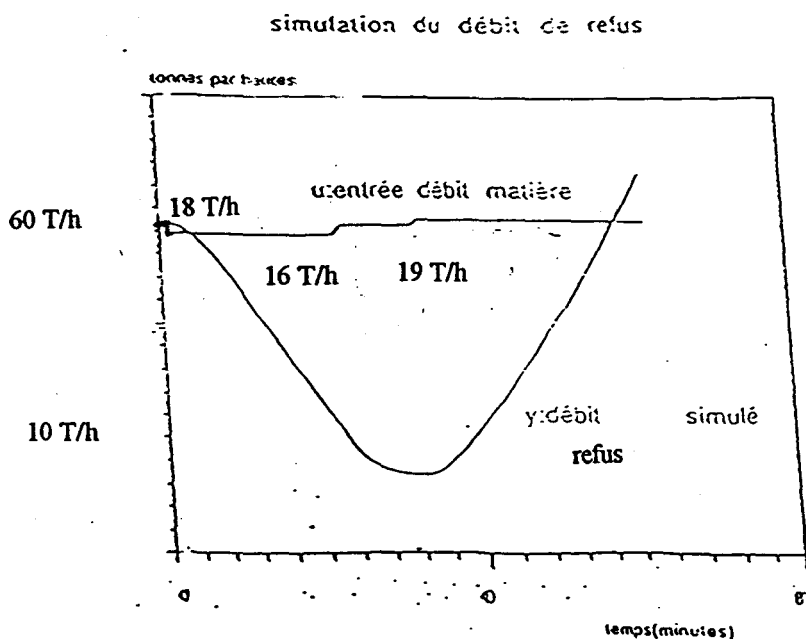
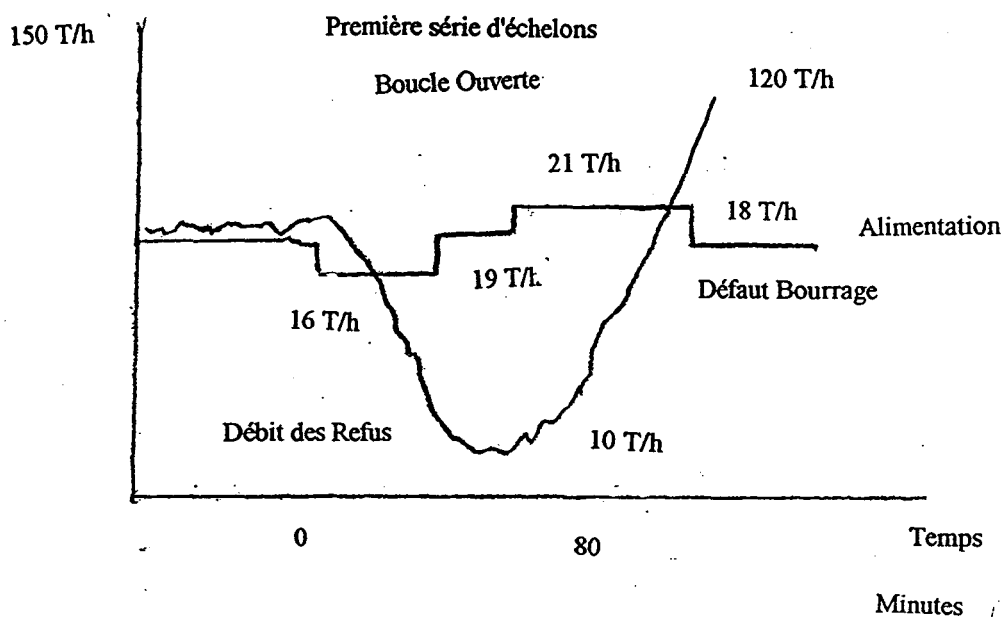


fig [II.5.2] Résultats de simulations de modèle

II.5.5– Conclusion des campagnes d'identification: algorithme simplifié pour d'autres installations.

La campagne d'identification sur un broyeur de la société Vicat à Montalieu (Isère) [DiP92] nous montre que pour un broyeur à clinker la fonction de transfert peut s'écrire:

$$\frac{\Delta R(z^{-1})}{(A - A_0(\text{vitesse} - \text{turbo}))(z^{-1})} = \frac{a_1 \cdot z^{-1} + a_2 \cdot z^{-2}}{(1 - T \cdot z^{-1})(1 - z^{-1})} z^{-d} \quad , \quad (\text{II.5.9})$$

où ΔR est la variation des refus , A l'alimentation du broyeur .

où A_0 dépend du type de ciment, autrement dit du réglage de la consigne de la vitesse du turbo-séparateur (la coupure étant indépendante de la charge à Montalieu) .

On peut donc identifier simplement le retard pur et le gain statique par des méthodes telles celle de Broïda , avec intégrateur pur.

Sur la figure [II.2.2] , nous pouvons estimer le retard pur comme étant de 3 minutes (par exemple) et de la même façon nous pouvons en déduire le gain statique, et ensuite passer par la transformée en Z à une fonction de transfert en discret . Une telle méthode a donné en comparaison des résultats corrects sur le site de Montalieu. La valeur des coefficients est égale à celle obtenue par une méthode des Moindres Carrés à 10 % près sur la majorité des fonctions. Nous n'implanterons pas une telle fonction dans un programme automatique (danger d'instabilité dû à l'échelon) mais cette procédure peut permettre une identification rapide et le test d'un correcteur au cours de la même campagne.

Nous pouvons également remarquer qu'à Cruas un seul type de ciment est utilisé, ce qui donne une seule fonction de transfert entre débit d'alimentation et débit des refus . Dans des cas différents, on se trouve face à un ensemble de fonctions de transfert avec des coefficients dépendant de la vitesse du turbo-séparateur. La modélisation décrite ci-dessus reste valable, si l'on prend bien soin de spécifier une fonction de transfert pour chaque type de ciment (la proportion variable des constituants selon les ciments influe assez peu sur la fonction de transfert dans la mesure où ces variations de proportion sont assez faibles) .

Dans le cas où sont produits plusieurs types de ciment, le retard pur est constant, seule la détermination d'une loi pour le gain pourra poser problème. On pourra passer d'un ciment à un autre en tenant compte des méthodes utilisées. Si l'on passe d'un ciment fin à un autre moins fin, le produit intermédiaire , pendant la baisse de vitesse , sera mis dans les silos de produit plus grossier. Pour l'opération contraire, le passage à un ciment plus fin, la même opération sera effectuée jusqu'à ce que les contrôles de finesse donnent des résultats positifs; une conduite par un opérateur averti peut réduire les temps de transitoires parfois

de 50%, mais généralement l'opérateur n'a pas le temps de prendre l'installation en main (il doit piloter le reste de l'usine).

II.6 Influence des perturbations , non-linéarités et imprécisions sur l'influence d'un correcteur

II.6.1 Recensement des perturbations

Nous rappelons l'origine des perturbations et incertitudes intervenant sur un système:

- les bruits de mesure affectant l'instrumentation elle-même : dans notre cas nous aurons la précision des capteurs , débit refus essentiellement , dont le fonctionnement peut être perturbé également par la granulométrie du produit, dans une proportion très faible . Nous noterons aussi le problème de la fiabilité au niveau étalonnage et reproductibilité.
- les bruits de mesure dus au système de transmission: théoriquement, les signaux ayant été ramenés en salle de commande par câbles blindés, les perturbations dues à la transmission et au codage des données sont négligeables.
- des entrées secondaires que nous allons définir plus bas: ces entrées sont difficiles à connaître et surtout à évaluer;
- des défauts de caractérisation du modèle: dans le cas d'une non-linéarité flagrante, il peut y avoir une perturbation grave de l'identification. Les résidus de la linéarisation , s'ils sont non négligeables, vont se comporter comme des entrées secondaires fortement corrélées au signal.

En général , les essais n'ont pas de corrélation avec une perturbation naturelle. Toutefois, comme dans [DiP92], les hasards du déroulement de la campagne peuvent amener à travailler dans des conditions particulières (qualité de clinker différente de la qualité habituelle).

L'identification sera affectée par contre si les bruits sont corrélés d'une manière projective ,avec la sortie du modèle, (ceci d'autant plus que la durée de l'essai d'identification est courte), c'est-à-dire si :

$$\sum_{n=1}^N (s_M^*(n) - s_0^*(n)).b(t) \neq 0, \quad (\text{II.6.1})$$

avec $b(t)$ bruit, s_m sortie du modèle et s_0 sortie du système.

Nous allons essayer de caractériser les perturbations dues au process et à la mesure.

II.6.2 Evaluation des non-linéarités ,perturbations et imprécisions

La plage de résultats est de 7 T/h à 130 T/h pour la valeur du débit des refus . Le système est considéré vu la précision comme parfaitement linéaire (la structure utilisée est validée). En réalité, il se peut que l'on change la vitesse du turbo-séparateur de quelques tours. A_0 est alors changé; cette valeur de A_0 varie elle-même fortement en fonction de la vitesse du turbo-séparateur et est susceptible de faibles variations, de l'ordre de 0.25 t/h maximum pour 21 T/h . Mais ce problème pose une question de calibrage de la valeur de A_0 qui est difficile à résoudre étant donné la difficulté à évaluer A_0 (débit nominal et moyen) sur une courte plage de temps.

Les imprécisions portent sur les plages de tolérance des capteurs et actionneurs , ainsi que sur la structure même du modèle et dépendent du protocole d'identification.

Examinons d'abord le premier point. Les erreurs de tolérance des actionneurs (doseurs) sont de 1 à 2% de la valeur mesurée et de 2 % pour la position du servomoteur ce qui est énorme puisque la plage de fonctionnement se situe entre 54% et 70% d'ouverture du servomoteur. Pour le débit refus, la précision est d'environ 2% , ce qui représente un écart inférieur à 1 T/h, ce qui peut laisser penser que l'on peut réguler sur ± 3 T/h. Toutefois, le positionneur ne permet pas de faire une optimisation réellement correcte. Nous nous trouvons face à une perturbation aléatoire $w(t)$, $w(t)$ étant comprise dans la plage d'incertitude de l'actionneur, et intégrable directement dans la fonction de transfert.

Les perturbations les plus significatives sont causées par :

- La variation de qualité de la matière qu'il n'est pas possible d'évaluer; cette qualité variant de plus très peu à Cruas , la matière étant suffisamment homogène , il est difficile de connaître son influence, qui reste très faible pour l'atelier considéré . La variation la plus importante pour une fonction de transfert est celle de la finesse. Cette finesse correspond souvent à une consigne de charge circulante et à un type de ciment. Il vaut mieux donc , le nombre de produits étant limité, écrire une fonction de transfert pour chaque type de ciment (A Cruas, seul un type est fabriqué) .

- les perturbations en amont du process (doseurs, presse, déferrailleur) : ces variations peuvent être modélisées par $\delta(t)+v(t)$, $\delta(t)$ étant une impulsion , et $v(t)$ une séquence du type bruit ;

– les perturbations dues à l'élévateur , au turbo-séparateur et au circuit de retour: elles sont inchiffrables puisque l'on n'a pas de renseignements permettant de les quantifier . Toutefois, les perturbations dues à l'élévateur introduisent un phénomène de "passage de la matière par paquets" et entretiennent des comportements oscillatoires de l'entrée du broyeur;

– les perturbations dues au broyeur et à ses compartiments : de la même façon, aucun capteur ne peut nous renseigner exactement sur la nature des perturbations dans le broyeur. Ces perturbations sont principalement dues à des problèmes process dans la machine . Nous noterons que la présence d'une cloison introduit des comportements erratiques.

En résumé, si la fonction de transfert est modélisable par

$$\frac{\Delta \text{refus}(z^{-1})}{(A - A_0(\text{vitesse} - \text{turbo}))(z^{-1})} = \frac{a_1 \cdot z^{-1} + a_2 \cdot z^{-2}}{(1 - T \cdot z^{-1})(1 - z^{-1})} z^{-\text{retard}}, \quad (\text{II.6.2})$$

la fonction de transfert réelle est modélisable par :

$$\frac{(\Delta \text{refus} + \delta \text{Re fus})(z^{-1})}{\text{entrée - broyeur}(z^{-1}) + \delta A \text{ limentation} - A_0(\text{vitesse} - \text{turbo}) - \delta A_0} = \frac{(a_1 + \delta a_1) \cdot z^{-1} + (a_2 + \delta a_2) \cdot z^{-2}}{(1 - (T + \delta T) \cdot z^{-1})(1 - z^{-1})} z^{-(\text{retard} + \delta \text{retard})} + v$$

(II.6.3) , où v est la perturbation résiduelle due à différents éléments (dureté, humidité du ciment, perturbations process stochastiques) .

Nous avons déterminé:

$$\delta A_0 \approx 0.2 \text{ T/h},$$

$$|\delta \text{Re fus}| = 1.5 \text{ T/h},$$

$$|\delta A \text{ limentation}| = 0.5 \text{ T/h}, \text{ et des écarts relatifs sur les coefficients :}$$

$$\frac{\delta a_i}{a_i} = \frac{\delta T}{T} = 0.1 \text{ maximum (en fait 0.05 environ)}.$$

Pour des atelier à ciments multiples , l'écart peut atteindre entre 30 % et 75 % selon les expériences .

II.6.3 Fonctions de sensibilité

Il n'a pas été du ressort de notre étude de déterminer les iso-distances d'état: une iso-distance est définie par ([Ric91]) :

$$D(P, M) = \int_{D_T} (s_M - s_p)^2 dt = \text{constante} \quad , \quad (\text{II.6.4})$$

avec s_p sortie du système et s_M sortie du modèle, et D_T domaine de travail.

$$\text{En notant } D = \frac{\int_{D_T} (s_M - s_p)^2 dt}{\int_{D_T} s_p^2 dt} \quad (\text{II.6.5}) \quad \text{la distance normalisée, l'iso-distance est}$$

l'hypercube de l'espace paramétrique pour lequel D est constante.

Pour identifier globalement un système, il faut rechercher le niveau minimal d'iso-distance atteignable par le système.

Les fonctions de sensibilité correspondent à la sensibilité de cette distance, donc de l'erreur process-modèle, par rapport aux paramètres.

Au voisinage d'un point θ (ensemble des paramètres), le développement limité de $D(\theta)$ (nous considérons que celui-ci existe) s'écrit :

$$D(\theta + \Delta\theta) = D(\theta) + g^T \Delta\theta + \frac{1}{2} \Delta\theta^T \cdot H \cdot \Delta\theta \quad , \quad (\text{II.6.6})$$

$$\text{avec } H \text{ hessien de } D : H = \left\{ \frac{\partial^2 D}{\partial \theta_i \cdot \partial \theta_j} \right\}_{i,j} \quad , \quad (\text{II.6.7})$$

$$\text{et } g \text{ son gradient} \quad g = \frac{\partial D}{\partial \theta} \quad . \quad (\text{II.6.8})$$

$$g \text{ vaut: } 2 \cdot \int_D (s_M - s_p) \cdot \sigma_k \cdot dt \quad . \quad (\text{II.6.9})$$

Les σ_k , intervenant dans le calcul du gradient , sont définies comme les fonctions de sensibilité de la sortie du modèle par rapport aux paramètres.

Le gradient de la surface d'erreur [Ric91] dépend donc directement des fonctions de sensibilité.

De la même manière H peut s'écrire :

$$H = \left\{ 2 \cdot \int_D (s_M - s_p) \cdot \frac{\partial^2 s_M}{\partial \theta_i \cdot \partial \theta_j} \cdot dt + 2 \cdot \int_D \sigma_i \cdot \sigma_j \cdot dt \right\}_{i,j}, \quad (\text{II.6.10})$$

et ne dépend que des fonctions de sensibilité si $s_M = s_p$.

Les fonctions de sensibilité permettent donc de relier la distance process-modèle aux paramètres du modèle en déterminant l'influence de ceux-ci sur ceux-là.

Les niveaux de distance process-modèle ne dépendent en cas de coïncidence que des fonctions de sensibilité.

Calcul des fonctions de sensibilité de la sortie par rapport aux paramètres du modèle

De façon générale, on a à l'instant n :

$$\sigma_k(n) = \frac{s_M(n, \theta_k + \delta \theta_k) - s_M(n, \theta_k)}{\delta \theta_k} \quad (\text{II.6.11})$$

Ceci étant posé pour tous les paramètres θ_k , les autres paramètres restant fixes.

Pour σ_k , il faut simuler le système pour δk petit. La procédure peut paraître lourde (puisqu'il faut rechercher les fonctions de sensibilité pour tous les n et chacun des paramètres de la fonction de transfert) même si nous n'avons que quatre paramètres à traiter en discret, ce qui représente tout de même plusieurs simulations et un choix judicieux des δ_k à effectuer.

On a donc tout intérêt à calculer analytiquement les fonctions de sensibilité, dans la mesure où cela est possible, d'autant plus que nous avons une fonction de transfert discrète ce qui nous facilite la tâche.

Soit la fonction de transfert discrète générale de notre broyeur, avec s la sortie, u l'entrée, d le retard pur et b_i et a les coefficients respectivement du numérateur et du dénominateur de la fonction de transfert.

$$\frac{s(z^{-1})}{u(z^{-1})} = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} = \frac{b_1 \cdot z^{-1} + b_2 \cdot z^{-2}}{(1 - z^{-1}) \cdot (1 - a \cdot z^{-1})} \cdot z^{-d} \quad (\text{II.6.12})$$

On remarque que ce modèle comporte un intégrateur pur, une constante de temps et un retard pur.

Posons :

$$\frac{\kappa(z^{-1})}{u(z^{-1})} = \frac{1}{(1-z^{-1}).(1-a.z^{-1})}, \quad (\text{II.6.13})$$

$$\text{soit } \kappa(n)=(a+1).\kappa(n-1)-a.\kappa(n-2)+u(n) \text{ et } s(n) = \sum_{i=1}^{i=2} b_i.\kappa(n-i-d). \quad (\text{II.6.14})$$

Nous pouvons en déduire :

$$\sigma_{b_i}(n) = \frac{s_M(n, b_i + \delta b_i) - s_M(n, b_i)}{\delta b_i}, \quad (\text{II.6.15})$$

soit :

$$\sigma_{b_i}(n) = \frac{(b_i + \delta b_i).\kappa(n-i-d) + \sum_{j=i} b_j.\kappa(n-j-d) - (b_i.\kappa(n-i-d) + \sum_{j=i} b_j.\kappa(n-j-d))}{\delta b_i}, \quad (\text{II.6.16})$$

$$\text{et } \sigma_{b_i}(n) = \kappa(n-i-d), \quad (\text{II.6.17})$$

ce qui ne nécessite plus, pour connaître σ_{b_i} , que de simuler le système $\frac{\kappa}{u}$.

De la même manière,

$$\sigma_a(n) = \frac{s_M(n, a + \delta a) - s_M(n, a)}{\delta a}, \quad (\text{II.6.18})$$

soit :

$$\sigma_a(n) = \frac{\frac{b_1.z^{-1} + b_2.z^{-2}}{(1-z^{-1}).(1-(a+\delta a).z^{-1})}.z^{-d} - \frac{b_1.z^{-1} + b_2.z^{-2}}{(1-z^{-1}).(1-a.z^{-1})}.z^{-d}}{\delta a} u(n), \quad (\text{II.6.19})$$

et en simplifiant:

$$\sigma_a(n) = \frac{(b_1.z^{-1} + b_2.z^{-2}).z^{-d}.z^{-1}}{(1-z^{-1}).(1-(a+\delta a).z^{-1}).(1-a.z^{-1})} u(n), \quad (\text{II.6.20})$$

soit encore :

$$\sigma_a(n) = \frac{z^{-1}}{(1-a.z^{-1})} s(n). \quad (\text{II.6.21})$$

Donc , en posant

$$\frac{\psi(z^{-1})}{s(z^{-1})} = \frac{1}{(1-a.z^{-1})} , \quad (\text{II.6.22})$$

on obtient :

$$\psi(n)=a.\psi(n-1) +s(n) , \quad (\text{II.6.23})$$

soit

$$\sigma_a(n)=\psi(n-1) . \quad (\text{II.6.24})$$

Il ne reste plus de même qu'à simuler le modèle en ψ , qui nous donne immédiatement les valeurs des fonctions de sensibilité en a.

Il reste enfin à caractériser la sensibilité par rapport au retard pur d.

Ce retard est faible et non entier ($d < 1$) .

$$\sigma_d(n) = \frac{s_M(n, d + \delta d) - s_M(n, d)}{\delta d} \quad (\text{II.6.25})$$

$$\text{Donc , } \sigma_d(n) = \frac{\frac{b_1 \cdot z^{-1} + b_2 \cdot z^{-1}}{(1-z^{-1}) \cdot (1-a \cdot z^{-1})} \cdot z^{-(d+\delta d)} - \frac{b_1 \cdot z^{-1} + b_2 \cdot z^{-1}}{(1-z^{-1}) \cdot (1-a \cdot z^{-1})} \cdot z^{-d}}{\delta d} \cdot u(n) \quad (\text{II.6.26})$$

$$\text{et } \sigma_d(n) = \frac{\frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} \cdot z^{-d} \cdot (z^{-\delta d} - 1)}{\delta d} \cdot u(n) . \quad (\text{II.6.27})$$

En faisant un développement limité de $z^{-\delta d}$ on obtient, si δd est très petit:

$$z^{-\delta d} - 1 = 1 - T_e \cdot \delta d \cdot s + o(T_e \cdot \delta d \cdot s) - 1 , \quad (\text{II.6.28})$$

$$\text{donc : } \sigma_d(n) = -\frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} \cdot z^{-d} \cdot T_e \cdot s \cdot u(n) = -T_e \cdot \dot{s}(n) , \quad (\text{II.6.29})$$

avec T_e la période d'échantillonnage du système.

On pourrait également chercher une sensibilité par rapport à A_0 : une telle sensibilité est représentée par une réponse à l'échelon de valeur δA_0 .

Nous avons calculé les fonctions de sensibilité pour le système :

$$\frac{\Delta R(z^{-1})}{(A - A_0)(z^{-1})} = \frac{0.045 \cdot z^{-1} + 0.047 \cdot z^{-2}}{(1-z^{-1}) \cdot (1-0.847 \cdot z^{-1})} \cdot z^{-3} , \quad (\text{II.6.30})$$

avec R refus et A alimentation . Nous avons calculé les fonctions de sensibilité pour une réponse impulsionnelle (fig [II.6.1]) .

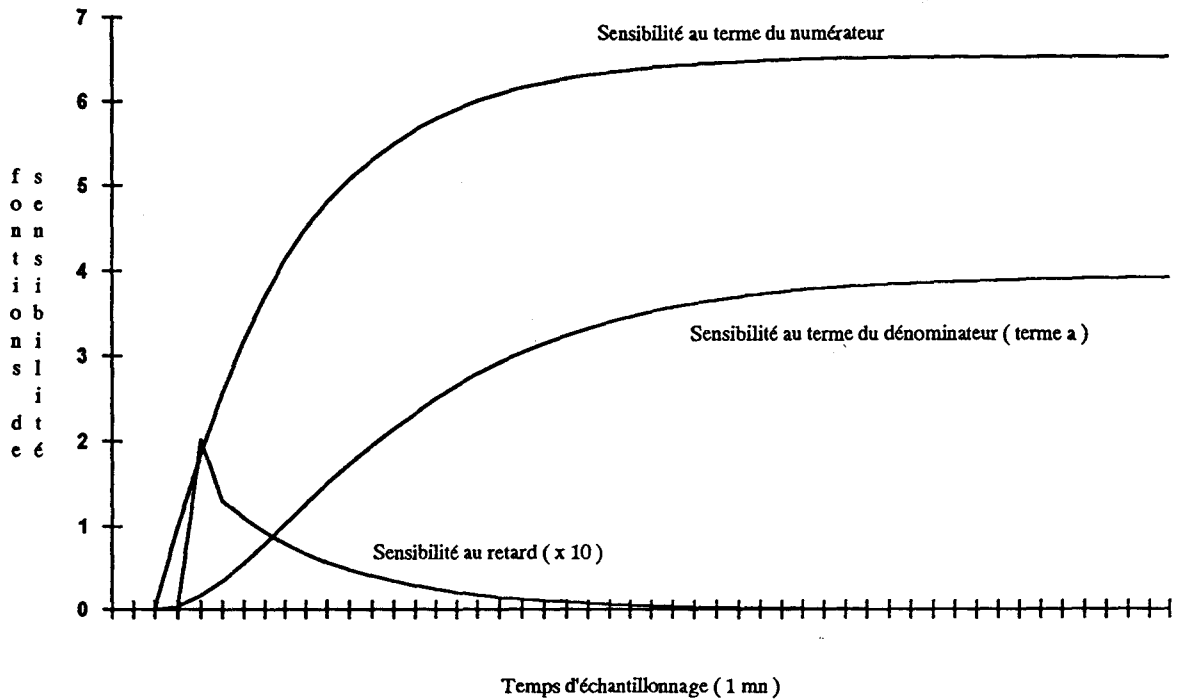


fig [II.6.1] : *Sensibilité de la sortie du modèle par rapport aux paramètres de la fonction de transfert débit refus-débit d'alimentation avec pour entrée une réponse impulsionnelle*

Nous avons ensuite calculé la même fonction pour le système suivant:

$$\frac{\Delta R(z^{-1})}{(Pr_0 - Pr)(z^{-1})} = \frac{0.228 \cdot z^{-1} + 0.126 \cdot z^{-2}}{(1 - z^{-1}) \cdot (1 - 0.56 \cdot z^{-1})}, \quad (II.6.31)$$

avec Pr position du répartiteur , soit la figure [II.6.2] .

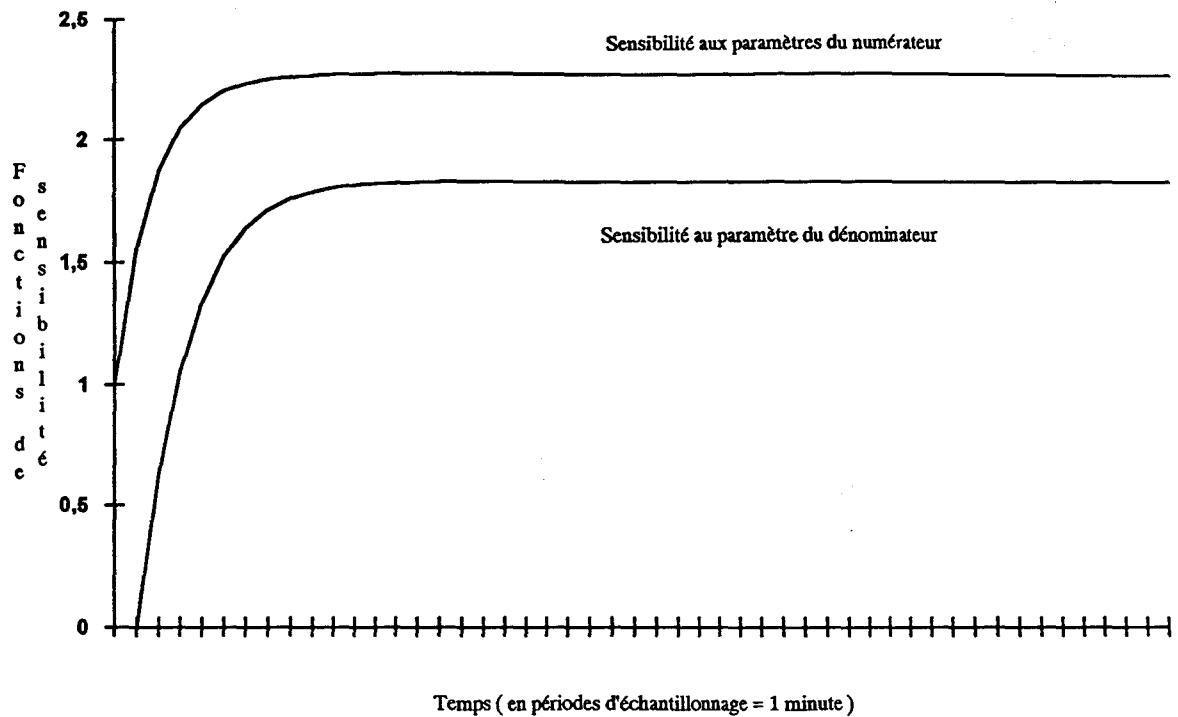


fig [II.6.2] : Sensibilité de la sortie du modèle par rapport aux paramètres de la fonction de transfert débit refus-position répartiteur avec pour entrée une réponse impulsionnelle

On remarque la sensibilité importante des termes du numérateur par rapport à la constante de temps (ce qui semble logique) et celle moins importante du retard pur.

II.6.4 Conclusion: influence des résultats sur la réalisation d'un correcteur

Nous reprenons l'équation

$$\frac{\Delta \text{refus}(z^{-1}) + \delta(\Delta \text{Re fus})}{(A + \delta A - A_0(vt) - \delta A_0(vt))(z^{-1})} = \frac{(a_1 + \delta a_1) \cdot z^{-1} + (a_2 + \delta a_2) \cdot z^{-1}}{(1 - (T + \delta T) \cdot z^{-1})(1 - z^{-1})} z^{-(\text{retard} + \delta \text{retard})} + v, \text{ (II.6.32)}$$

avec A débit d'entrée du broyeur et vt vitesse du turbo-séparateur.

Notre correcteur doit donc être capable de rejeter les perturbations ci-dessus, c'est-à-dire d'être assez robuste pour commander une classe de modèles compris dans la plage de variation énoncée en [II.6.2]. Il doit pour cela :

- rester stable;
- garder un niveau de performances minimum et notamment le débit des refus doit rester dans une plage de ± 3 T/h.

Conclusion

L'identification nous conduit à trouver une fonction de transfert entre alimentation et débit des refus constituée d'un premier ordre avec intégrateur et d'un retard pur . Ce type de fonction de transfert se retrouve dans tout atelier contenant un broyeur à boulets .

La longueur des manipulations est souvent un obstacle à la détermination d'un modèle qui ne peut être qu'approché.

Nous avons réalisé dans ce chapitre une estimation des paramètres de la fonction de transfert ainsi que du niveau des perturbations.

La détermination d'une commande est envisagée dans le chapitre III .

Commandes du broyeur

III.1 Introduction

L'incertitude des modélisations présentées au chapitre précédent nous conduit à constater l'insuffisance d'un correcteur P.I.D. pour la stabilisation du débit des refus du séparateur.

Afin de pallier à cette difficulté , nous allons essayer de mettre en oeuvre d'autres types de commande . A titre d'exemple , lorsqu'il est possible d'obtenir un modèle sans retard du type fonction de transfert , le théorème de Kharitonov permet de donner des conditions de stabilité robuste connaissant la plage d'incertitude sur les paramètres de la fonction de transfert.

Nous passerons ensuite en revue un certain nombre de commandes .

Nous utiliserons d'abord une commande R.S.T. , dont la robustesse est étudiée par le théorème de Kharitonov.

Nous étudions également la détermination d'une commande adaptative indirecte pour laquelle l'algorithme de commande utilisé est du type prédictif généralisé.

Le mécanisme d'adaptation est réalisé par une méthode des Moindre Carrés.

Des difficultés de mise en oeuvre nous ont conduit à essayer une commande prédictive à base de modèle . Le principe est là aussi le ralliement d'une trajectoire de consigne sur un certain horizon , en minimisant un critère quadratique relatif à la commande future . L'originalité de la méthode consiste en une autocompensation d'erreur processus-modèle qui est modélisée et réinjectée dans l'algorithme de commande.

Cette approche permet de compenser des perturbations assez importantes , sans devoir en fournir un modèle précis a priori.

Ces commandes ont été testées sur site . Nous dégageons quelques tendances pour le réglage des paramètres des algorithmes.

III.2 Existant; P.I.D

III.2.1 Insuffisance

Le P.I.D. présent à Cruas n'est pas un véritable P.I.D. numérique . Ce dernier fonctionne comme suit ([Top88]) :

$$u_k - u_{k-1} = K_p \cdot (e_k - e_{k-1} + \frac{T_c}{T_i} \cdot e_k) \quad , \quad (III.2.1)$$

avec u_k commande au temps k , e_k écart mesure consigne, K_p coefficient de proportionnalité, T_c période d'échantillonnage et T_i constante d'intégration .

Il reproduit presque exactement le comportement d'un P.I.D. pour un système continu (que nous ne rappellerons pas) .

Un tel algorithme présente le défaut de ne pas pouvoir compenser l'effet des perturbations en présence d'un retard pur . La fonction de transfert avec un P.I.D possède alors , pour notre système en boucle fermée, la forme suivante:

$$H_{BF} = \frac{\frac{B}{A} z^{-d} H_{PID}}{1 + \frac{B}{A} z^{-d} H_{PID}} = \frac{B \cdot z^{-d} H_{PID}}{A + B \cdot z^{-d} H_{PID}} \quad . \quad (III.2.2)$$

Il est donc impossible de compenser les problèmes liés à la présence d'un retard pur, la fonction de transfert du P.I.D n'étant que du 2^{ème} ordre, ce qui va ainsi amener un comportement perturbateur vis-à-vis du système à corriger (qui ne sera jamais "en phase" avec le correcteur) , ce que nous montre la fig [III.2] :

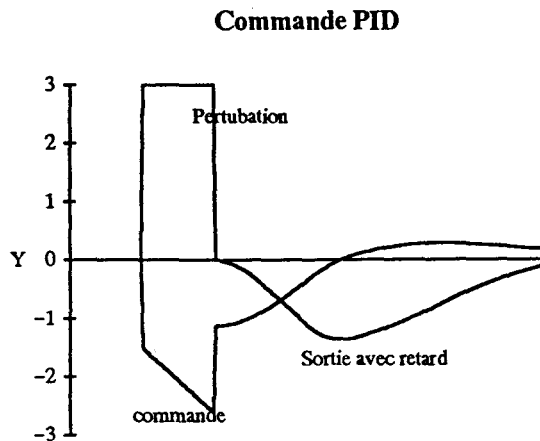


fig [III.2] : Réponse d'un P.I.D. à une perturbation avec un système à retard

Il faut noter toutefois que le P.I.D. correspond à un algorithme facile à mettre en place et à régler (Åström [AHP92]) et qu'il existe des formules généralisant les réglages de Ziegler et Nichols. Des compensations peuvent être introduites pour supprimer l'effet du retard pur (retard de phase de transmittance, prédicteur de Smith donc retard artificiel sur la boucle de réglage) ([LaT77]).

Le P.I.D. nous permet d'étalonner les autres types de commandes.

III.2.2 Critères de robustesse

Un système est dit robuste s'il garantit un niveau de performances malgré des incertitudes par rapport au modèle utilisé pour la commande.

La robustesse , contrairement à la sensibilité, est un concept global. Il faut toutefois préciser [Bor92b] :

- le mode de description des erreurs;
- les performances considérées;
- le domaine des incertitudes.

Nous considérerons le comportement face aux incertitudes structurées (variations des paramètres d'un modèle).

La robustesse du correcteur est souvent liée à la notion de faible sensibilité aux erreurs de modèle. Il est en particulier intéressant de reconnaître les critères qualitatifs de robustesse permettant de choisir les paramètres appropriés pour l'établissement de la commande.

Nous remarquerons aussi que la robustesse des modèles discrets est en général plus difficile à évaluer.

Dans le cas d'une fonction en z , le nombre réduit de paramètres permet de travailler éventuellement sur des intervalles indépendants, ou avec une norme sur les écarts sur les paramètres.

On aura intérêt, par exemple pour un système décrit par une équation d'état, à trouver des relations de la forme ([Lar91]) :

$$\Delta A = \sum_{i=1}^{i=k} \theta_i \cdot A_i, \quad (\text{III.2.3})$$

avec $\{A_j\}$ matrices données et $\|\theta\| \leq r$.

Il est tentant de prendre pour mesure de niveau de performances la variance de l'écart mesure – consigne.

La définition d'un seuil serait plus difficile (problème des perturbations), c'est pourquoi la robustesse est fortement couplée à la notion de stabilité (pas d'ambiguïté sur le seuil de rejet).

La robustesse consiste donc à garder un certain niveau de performance et une stabilité en boucle fermée malgré les variations du système.

Ces performances sont souvent exprimées sous forme de réduction du temps de montée, augmentation de la largeur de bande, réjection des perturbations.

Souvent [Bor92b], on montre que l'optimisation d'un critère énergétique corrélé à l'évolution du processus a tendance à renforcer la robustesse d'un correcteur.

Nous allons rappeler deux méthodes de détermination de la stabilité robuste.

– le théorème de Zhou et Karkonegar [ZhK87]

Soit le système sous forme d'état:

$$\dot{x} = (A + \Delta A)x, \quad (\text{III.2.4})$$

$$\text{avec } \Delta A = \sum_{i=1}^{i=m} k_i A_i, \quad (\text{III.2.5})$$

où ΔA est la matrice des perturbations et les A_i sont des matrices constantes données.

Soit P la solution positive de $A^T P + P A + 2I = 0$.

On rappelle tout d'abord le théorème fondamental:

$$\|\Delta A\| < \frac{1}{\|P\|} \Rightarrow \dot{x} = (A + \Delta A)x \text{ est asymptotiquement stable,}$$

où $\| \cdot \|$ est la norme euclidienne et $\|P\|^2 = \lambda_{\max}(P^T P)$.

Ou si A d'ordre n et $\varepsilon = \sup(A_{i,j})$:

$$\varepsilon < \frac{1}{n \cdot \|P\|} \Rightarrow \text{le système est stable.} \quad (\text{III.2.6})$$

On définit $P_i = \frac{1}{2}(A_i^T \cdot P + P A_i)$ et $P_c = [P_1, P_2, \dots, P_m]$.

Si ΔA a la forme $\Delta A = \sum_{i=1}^{i=m} k_i A_i$, on a les conditions suffisantes de stabilité suivantes, avec

les k_i paramètres incertains et faibles :

$$\sum_{i=1}^{i=m} k_i^2 \leq \frac{1}{P_c^2}, \quad (\text{III.2.7})$$

$$\text{ou } \sum_{i=1}^{i=m} |k_i| \cdot \|P_i\| \leq 1, \quad (\text{III.2.8})$$

$$\text{ou } |k_i| \leq \frac{1}{\sum_{j=1}^{j=m} \|P_j\|}. \quad (\text{III.2.9})$$

Il faut remarquer que ces conditions ne sont que suffisantes et sont des variantes du théorème fondamental rappelé plus haut, leur intérêt provenant essentiellement d'un moindre conservatisme.

- Le théorème de Kharitonov [Kha78] et [BoS87].

Supposons que notre matrice A (système $\dot{x} = (A + \Delta A)x$) se mette sous forme compagne:

$$A = \begin{bmatrix} -a_1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ -a_2 & 0 & \ddots & 0 & \cdot \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \ddots & 1 \\ -a_n & 0 & \dots & \dots & 0 \end{bmatrix},$$

avec $0 < \underline{a}_i \leq a_i \leq \bar{a}_i$.

Le polynôme $A(s)=s^n+a_1.s^{n-1}+\dots+a_n$ est de racines à partie réelle négative si et seulement si les quatre polynômes suivants sont stables:

$$\begin{aligned} & \bar{a}_n + \bar{a}_{n-1}.s + \underline{a}_{n-2}.s^2 + \underline{a}_{n-3}.s^3 + \bar{a}_{n-4}.s^4 + \bar{a}_{n-5}.s^5 + \dots \\ & \bar{a}_n + \underline{a}_{n-1}.s + \underline{a}_{n-2}.s^2 + \bar{a}_{n-3}.s^3 + \bar{a}_{n-4}.s^4 + \underline{a}_{n-5}.s^5 + \dots \\ & \underline{a}_n + \underline{a}_{n-1}.s + \bar{a}_{n-2}.s^2 + \bar{a}_{n-3}.s^3 + \underline{a}_{n-4}.s^4 + \underline{a}_{n-5}.s^5 + \dots \\ & \underline{a}_n + \bar{a}_{n-1}.s + \bar{a}_{n-2}.s^2 + \underline{a}_{n-3}.s^3 + \underline{a}_{n-4}.s^4 + \bar{a}_{n-5}.s^5 + \dots \end{aligned}$$

Lorsque les paramètres sont dépendants linéairement (Barmish [Bar89]), il est possible d'obtenir des conditions moins dures (liens entre les paramètres, voir figure [III.2.2]). Il existe des liens entre les paramètres avec plusieurs types de ciments qui permettent de corrélérer les gains et les constantes de temps; dans le cas de Cruas, il est plus difficile de trouver des liens entre les paramètres .

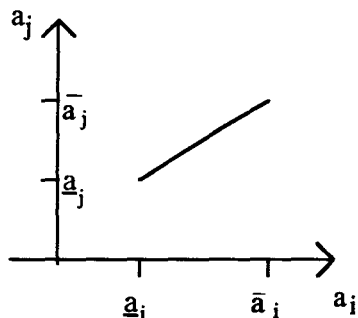


fig [III.2.2] Paramètres liés

Malheureusement, à notre connaissance ,ce théorème n'a pas d'équivalent discret simple et les articles existant dans la littérature ne permettent pas d'appliquer un théorème comparativement aussi simple.

Nous ferons donc intervenir une transformation en w pour passer du discret à un polynôme en w (passage au continu) soit :

$z = \frac{1+w}{1-w}$, qui donne une idée de la représentation fréquentielle de la fonction de transfert discrète .

Si nous avons une fonction de transfert du type:

$$H(z^{-1}) = \frac{b_1.z^{-1} + b_2.z^{-2}}{1 + a_1.z^{-1} + a_2.z^{-2}} , \tag{III.2.10}$$

$$H(w) = \frac{b_1 \cdot \left(\frac{1-w}{1+w}\right)^{-1} + b_2 \cdot \left(\frac{1-w}{1+w}\right)^{-2}}{1 + a_1 \cdot \left(\frac{1-w}{1+w}\right)^{-1} + a_2 \cdot \left(\frac{1-w}{1+w}\right)^{-2}} = \frac{N(w)}{(1+a_1+a_2) + (2-2 \cdot a_2) \cdot w + (1+a_2-a_1) \cdot w^2}$$

(III.2.11)

Si $a_1 - \delta a_1 \leq a_1 \leq a_1 + \delta a_1$ avec $\delta a_1 > 0$ on aura pour une fonction de transfert :

$$\frac{N(w)}{A_0 + A_1 \cdot w + A_2 \cdot w^2} \quad (III.2.12)$$

$$1 + a_1 - \delta a_1 + a_2 - \delta a_2 \leq A_0 \leq 1 + a_1 + \delta a_1 + a_2 + \delta a_2 \quad (III.2.13)$$

$$2 - 2 \cdot a_2 - 2 \cdot \delta a_2 \leq A_1 \leq 2 - 2 \cdot a_2 + 2 \cdot \delta a_2 \quad (III.2.14)$$

$$1 + a_1 - \delta a_1 - a_2 - \delta a_2 \leq A_2 \leq 1 + a_1 + \delta a_1 - a_2 + \delta a_2 \quad (III.2.15)$$

et on peut alors appliquer le théorème de Kharitonov sur le polynôme $w^2 + A_1/A_2 w + A_0/A_2$.

Il est enfin possible d'étudier la stabilité dans le plan de Nyquist ou dans le plan de Black par simulation du système pour dégager le compromis robustesse-performance.

En effet, on peut remarquer que l'approche consistant à demander une performance maximale pour un système est souvent réalisée aux dépens de la robustesse. Il est inutile de concevoir un régulateur performant fonctionnant à la limite de la stabilité si l'incertitude sur les paramètres ne risque pas justement de nuire à cette stabilité.

III.2.3 Etude d'algorithmes robustes

Plusieurs types d'algorithmes sont susceptibles de nous intéresser dans l'optique d'une commande robuste: nous allons en évoquer quelques uns et d'abord énoncer quelques uns des critères permettant de retenir et de tester un algorithme:

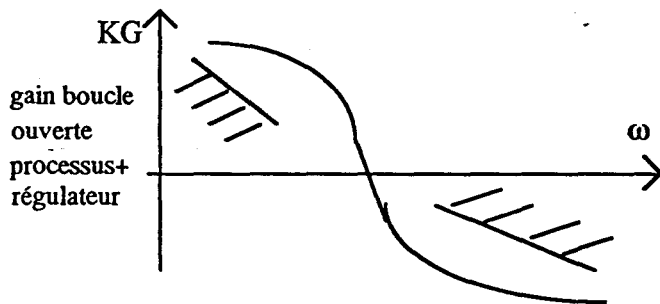
- nous cherchons d'abord un algorithme garantissant une certaine robustesse (stabilité et niveau de performances par rapport à des incertitudes sur les paramètres du modèle);
- nous cherchons un algorithme capable de tenir compte d'un retard pur élevé;
- nous cherchons enfin un algorithme suffisamment simple pour pouvoir être implanté dans un système informatique assez rudimentaire et dont les paramètres de conception soient suffisamment aisés à manier, ceci en vue de la maintenance du produit;
- nous recherchons également un algorithme transposable à d'autres systèmes, avec des paramètres différents, sans que le réglage soit trop compliqué à effectuer.

remarque: ces deux derniers points sont importants pour proposer un produit qui, s'il n'est pas obligatoirement facile à dépanner par le client, doit permettre une intervention rapide du concepteur, d'une part, et d'autre part ne doit pas exiger un temps de réglage de paramètres et de mise en service trop long.

Nous devons enfin assurer le compromis performance stabilité comme décrit en fig[III.2.3] ([Lar 91]).

Sans entrer dans les détails, une condition de stabilité sera $|KG| < \frac{1}{l(\omega)}$, avec $l(\omega) \gg 1$ étant un majorant de l'incertitude relative sur $G(j\omega)$. La spécification de performances nominales peut être effectuée en se donnant $m(\omega)$, tel que $\left| \frac{1}{1+KG} \right| < m(\omega)$, soit, si $m(\omega) \gg 1$: $|KG| > \frac{1}{m(\omega)}$.

La satisfaction simultanée de ces deux conditions ne pourra se faire que sur des gammes de fréquence bien distinctes. Il en résulte le gabarit performances – robustesse ci-dessous.



fig[III.2.3] Compromis performances – stabilité représenté dans le lieu de Bode

Plusieurs types de commandes robustes existent:

- Les approches R.S.T. (y compris la méthode P.I.D. qui peut être considérée comme un cas particulier du R.S.T et qui est une méthode robuste pour un certain type de fonction de transfert).

- Les approches dans l'espace d'état, telles que LQ (Linear Quadratic), LQG (Linear Quadratic Gaussian), LQG-LTR(LQG-Loop Transfer Recovery) où il faut minimiser un critère énergétique de la forme $J = E(y^2 + \rho u^2)$, (avec μ bruit de l'observateur), en utilisant une norme du type H_2 , ce qui donne un critère [StA87] :

$$J = \left\| \frac{G}{1+K.G} \right\|_2^2 + (\mu + \rho) \cdot \left\| \frac{G.K}{1+K.G} \right\|_2^2 + (\mu \cdot \rho) \cdot \left\| \frac{K}{1+K.G} \right\|_2^2,$$

le système $y=G(s).u$ étant contrôlé par retour de sortie $u=-K(s).y$ (fig [III.2.4]),

$$\text{et } \|H(s)\|_2^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} |H(j\omega)|^2 \frac{d\omega}{2\pi} .$$

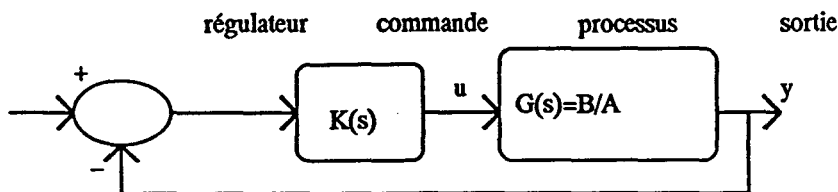


Fig [III.2.4] *Commande par retour de sortie*

On peut alors minimiser J par rapport à K . Le choix de μ et ρ permet de maîtriser le compromis performance – robustesse.

Toutefois, l'algorithme nous a semblé moins facile à régler que d'autres. Nous ne l'avons pas retenu. De plus, le concept de robustesse n'est pas défini explicitement. Une commande telle que la commande prédictive permet, par une méthodologie plus directive, d'assurer de bonnes performances et une bonne robustesse.

- Des approches fréquentielles (CRONE, H_∞): la commande H_∞ trouve $K(s)$ minimisant la norme $\left\| \frac{W}{1+KG} \right\|_\infty$ tout en stabilisant $G(s)$ où W est une pondération fréquentielle, et $H_\infty(G) = \text{Max}_\omega (|G(j\omega)|)$ (donc la limite quand $i \rightarrow \infty$ des normes H_i)

La commande CRONE (Commande Robuste d'Ordre Non Entier) [Ous83] et [Ous91] permet en utilisant des systèmes d'ordre fractionnaire de maintenir le facteur d'amortissement malgré les perturbations intervenant sur les paramètres du procédé.

- Des approches telles que commande prédictive, commande floue, commande adaptative

Nous pouvons éliminer toute commande de type "expert", type logique floue, puisque la fonction de transfert est bien déterminée et qu'on n'a pas d'intérêt à "fuzzifier" le système.

Il nous reste les commandes type adaptato-prédictif, qui permettent à la fois de travailler avec des systèmes à fort retard pur et d'obtenir des commandes dont les performances s'avèrent intéressantes.

III.3 Commande R.S.T

III.3.1 Méthode

La méthode du correcteur R.S.T. (Retour-Simplification-Tracking) consiste à effectuer le placement de pôles et de zéros d'une fonction de transfert fixe.

La structure d'un tel correcteur (en fait un P.I.D. généralisé) est donnée par la figure ci-dessous:

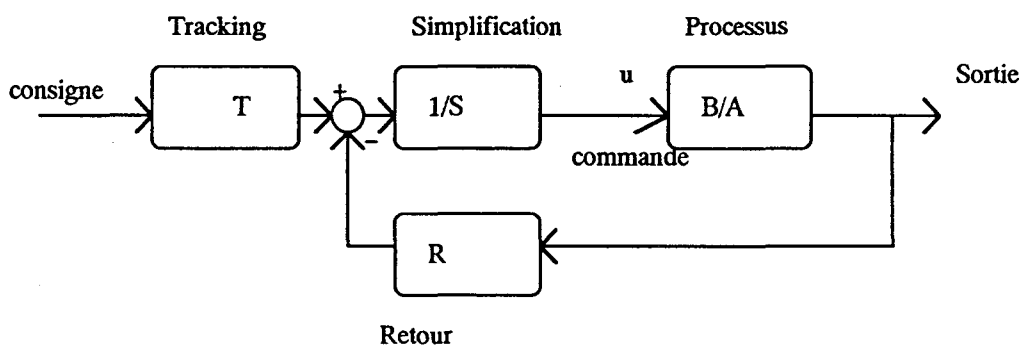


fig [III.3.1] Schéma de principe du correcteur R.S.T

En réalité, toute commande linéaire peut se mettre sous une forme R.S.T., donc d'un régulateur composé de 3 éléments, dont les actions sur la fonction de transfert en boucle ouverte (supposée fixe) sont les suivantes :

- un polynôme $S(z^{-1})$ permettant de simplifier les zéros stables de la fonction de transfert;
- un polynôme $R(z^{-1})$ qui permet de faire du placement de pôles , en spécifiant la fonction de transfert en boucle fermée;
- un polynôme $T(z^{-1})$ permettant de spécifier le comportement en poursuite donc le comportement transitoire et les performances en temps de montée du système régulé.

Le calcul du R.S.T ([Lan88] , [LaT77] et [Bor93]) reproduit les actions énumérées ci-dessus .

La fonction de transfert en boucle ouverte entre y et u s'écrit :

$$\frac{y(z^{-1})}{u(z^{-1})} = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} z^{-d}, \text{ soit en boucle fermée : } H(z^{-1}) = \frac{B(z^{-1}) \cdot z^{-d}}{A(z^{-1}) \cdot S(z^{-1}) + B(z^{-1}) \cdot R(z^{-1}) \cdot z^{-d}} \quad (\text{III.3.1}).$$

Nous n'aurons pas besoin, ici, de placer d'un intégrateur dans la chaîne d'action puisque A en contient déjà un. En appliquant le premier point, si $S(z^{-1})=S'(z^{-1}) \cdot B^*(z^{-1})$, avec $B^*(z^{-1})=b_1+b_2 \cdot z^{-1}$, la fonction de transfert en boucle fermée H_{BF} s'écrit:

$$H_{BF}(z^{-1}) = \frac{z^{-(d+1)}}{A(z^{-1}) \cdot S'(z^{-1}) + R(z^{-1}) \cdot z^{-(d+1)}} = \frac{z^{-(d+1)}}{P(z^{-1})} \quad (\text{III.3.2})$$

On applique le deuxième point (on spécifie un polynôme $P(z^{-1})$ dont les performances sont suffisantes pour rejeter les perturbations de la boucle fermée).

En identifiant les coefficients, il vient:

$$A(z^{-1}) \cdot S'(z^{-1}) + R(z^{-1}) \cdot z^{-(d+1)} = P(z^{-1}). \quad (\text{III.3.3})$$

L'identité de Bezout nous montre que pour $\deg(P) \leq d + \deg(A)$ on a une solution unique à notre problème; (avec $\deg(S')=d$ et $\deg(R)=\deg(A)-1$). Pour notre application, l'équation se met sous la forme d'un système de Cramer triangulaire et se résout donc très facilement.

En appliquant le troisième point, la recherche d'un suivi parfait conduit à choisir $T(z^{-1})=P(z^{-1})$.

L'équation de commande peut donc se mettre sous la forme:

$$S(z^{-1}) \cdot u(t) = T(z^{-1}) \cdot c(t+d+1) - R(z^{-1}) \cdot y(t), \text{ avec } c \text{ consigne,} \quad (\text{III.3.4})$$

$$\text{d'où on déduit } u(t) = \frac{1}{S(0)} (-S^*(z^{-1}) \cdot u(t-1) + T(z^{-1}) \cdot c(t+d+1) - R(z^{-1}) \cdot y(t)), \quad (\text{III.3.5})$$

$$\text{avec } S^* = \text{polynôme } S \text{ tronqué de son premier terme, soit } S(z^{-1}) = S(0) + S^*(z^{-1}). \quad (\text{III.3.6})$$

III.3.2 Résultats

Si nous voulons imposer une réponse indicielle caractérisée par une pulsation naturelle de 1 rd.s^{-1} et un coefficient d'amortissement de 0.9 en poursuite, il vient pour une période d'échantillonnage T_e de 1 minute les résultats suivants.

Pour une fonction de transfert $H(z^{-1})$ entre le débit des refus et l'alimentation des doseurs :

$$H(z^{-1}) = \frac{0.141 \cdot z^{-1} + 0.152 \cdot z^{-2}}{(1 - z^{-1}) \cdot (1 - 0.805 \cdot z^{-1})} \cdot z^{-3}, \quad (\text{III.3.7})$$

on obtient :

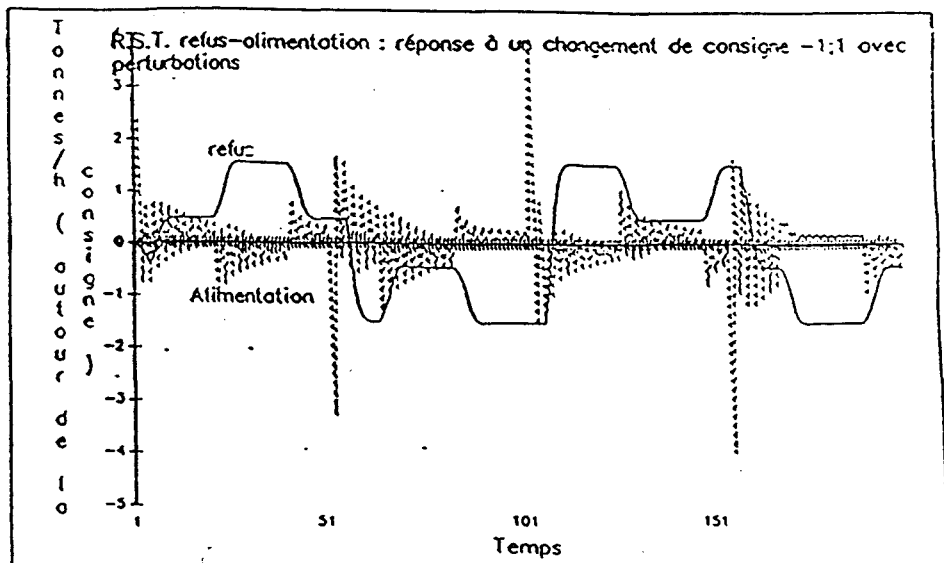
$$R = 1.68 - 1.22 z^{-1} \quad (\text{III.3.8})$$

$$S = 0.15 + 0.3 z^{-1} + 0.35 z^{-2} + 0.42 z^{-3} + 0.215 z^{-4} \quad (\text{III.3.9})$$

$$T = 1 - 0.74 z^{-1} + 0.2 z^{-2} \quad (\text{III.3.10})$$

La figure [III.3.2] nous montre la simulation de la réponse à des changements de consigne de durée 50 périodes et de valeur ± 1 , avec perturbations.

On remarque les problèmes de pics d'alimentation (inférieurs toutefois aux 5 T/h permis par la limite supérieure des doseurs), et le caractère oscillant de la commande, qui sont nuisibles aux performances et difficiles à mettre pratiquement en oeuvre.



fig[III.3.2] Réponse à un changement de consigne -1 1 avec perturbations pour un R.S.T refus-alimentation

Pour une fonction de transfert $H(z^{-1})$ entre répartiteur et refus:

$$H(z^{-1}) = \frac{0.228.z^{-1} + 0.126.z^{-2}}{(1-z^{-1}).(1-0.56.z^{-1})} \quad (\text{III.3.11})$$

On obtient:

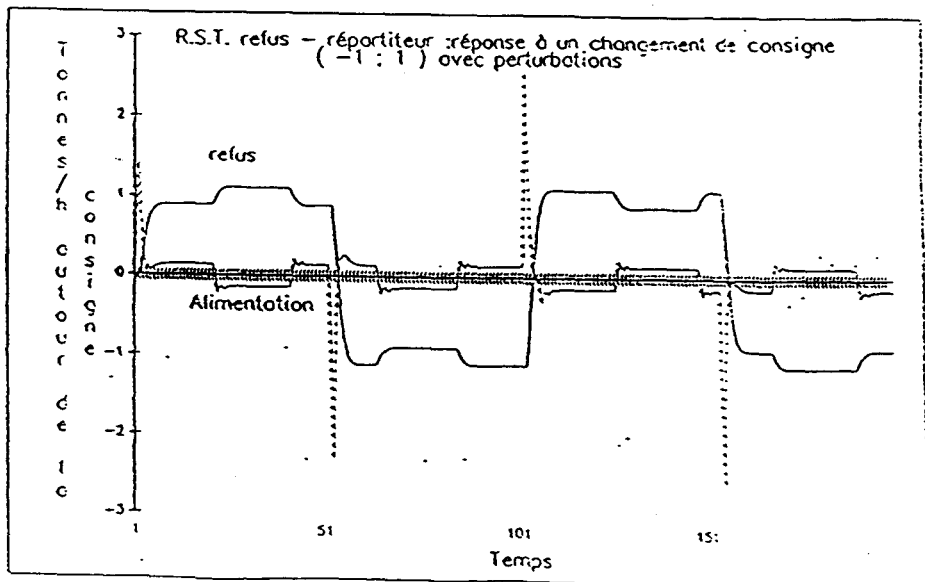
$$R = 0.82 - 0.36 z^{-1} \quad (\text{III.3.12})$$

$$S = 0.23 + 0.126 z^{-1} \quad (\text{III.3.13})$$

$$T = 1 - 0.74 z^{-1} + 0.2 z^{-2} \quad (\text{III.3.14})$$

Ceci correspond en fait à un P.I.D. filtré (puisqu'un P.I.D. est un cas particulier de correcteur R.S.T. régulant un système caractérisé par une fonction de transfert en boucle ouverte du 2^{ème} ordre , sans retard).

La figure [III.3.3] nous montre la simulation de la réponse à des changements de consigne de durée 50 périodes et de valeur ± 1 , avec perturbations .



fig[III.3.3]

Cet algorithme est facile à implanter dans un contrôle-commande ; il reste très sensible à des perturbations et légers changements de structure(lorsque les refus sont très faibles, la structure n'est plus tout-à-fait linéaire) en particulier lors de perturbations importantes , ce qui n'a pas permis de conserver l'algorithme.

Le principe en est toutefois plus intéressant que celui d'un P.I.D. mais la plus grande difficulté reste un réglage suffisamment fin qui est beaucoup plus complexe que celui d'un P.I.D.

III.3.3 Robustesse

Le théorème de Kharitonov ne nous permet pas de travailler directement en discret: nous allons donc devoir passer par une transformée en w pour pouvoir appliquer ce théorème .

Nous appellerons δB l'incertitude sur le polynôme B , et δA l'incertitude sur A ($\pm\delta A$ caractérisant l'incertitude sur les coefficients de A) , en travaillant avec une fonction de transfert $\frac{y}{u} = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})}$.

Avec un correcteur R.S.T. , on a en boucle fermée , en notant $B^*=B+\delta B$ et $A^*=A+\delta A$:

$$H_{BF} = \frac{T \cdot B^*}{A^* \cdot S + B^* \cdot R} = \frac{P \cdot B + P \cdot \delta B}{(A + \delta A) \cdot S + B + R \cdot (\delta B)} = \frac{P \cdot B + P \cdot \delta B}{P \cdot B + \delta A \cdot S + B + R \cdot \delta B} \quad (\text{III.3.15})$$

(on rappelle que $A \cdot S + R = P$; on a pris dans notre cas un retard pur nul)

On en déduit :

$$H_{BF} = \frac{N(z^{-1})}{D(z^{-1})} \quad (\text{III.3.16})$$

avec :

$$D(z^{-1}) = (b_1 + (p_1 b_1 + b_2) \cdot z^{-1} + (p_1 b_2 + b_1 p_2) \cdot z^{-2} + b_2 \cdot p_2 \cdot z^{-3}) + (b_1 + (b_1 \cdot \delta a_1 + b_2) \cdot z^{-1} + (b_1 \cdot \delta a_2 + b_2 \cdot \delta a_1) \cdot z^{-2} + b_2 \cdot \delta a_2 \cdot z^{-3}) + (\delta b_1 \cdot r_1 + (\delta b_2 \cdot r_1 + \delta b_1 \cdot r_2) \cdot z^{-1} + \delta b_2 \cdot r_2 \cdot z^{-2}) \quad (\text{III.3.17})$$

en notant $B(z^{-1}) = b_1 \cdot z^{-1} + b_2 \cdot z^{-2}$; $A(z^{-1}) = 1 + a_1 \cdot z^{-1} + a_2 \cdot z^{-2}$;
 $P(z^{-1}) = 1 + p_1 \cdot z^{-1} + p_2 \cdot z^{-2}$; $R(z^{-1}) = r_1 + r_2 \cdot z^{-1}$.

On peut alors écrire cette fonction sous la forme :

$$H_{BF} = \frac{N(z^{-1})}{A_1 + A_2 \cdot z^{-1} + A_3 \cdot z^{-2} + A_4 \cdot z^{-3}} \quad (\text{III.3.18})$$

et , en remplaçant par l'expression en w :

$$H_{Br} = \frac{N\left(\frac{1-w}{1+w}\right)}{A_1 + A_2 \cdot \frac{1-w}{1+w} + A_3 \cdot \left(\frac{1-w}{1+w}\right)^2 + A_4 \cdot \left(\frac{1-w}{1+w}\right)^3} \quad (\text{III.3.19})$$

En réduisant au même dénominateur on obtient:

$$H_{Br} = \frac{N\left(\frac{1-w}{1+w}\right) \cdot (1+w)^3}{(A_1 + A_2 + A_3 + A_4) + (3 \cdot A_1 + A_2 - A_3 - 3 \cdot A_4) \cdot w + (3 \cdot A_1 - A_2 + A_3 + 3 \cdot A_4) \cdot w^2 + (A_1 - A_2 - A_3 - A_4) \cdot w^3}$$

(III.3.20), soit

$$H_{Br} = \frac{N\left(\frac{1-w}{1+w}\right) \cdot (1+w)^3}{A'_1 + A'_2 \cdot w + A'_3 \cdot w^2 + A'_4 \cdot w^3} \quad (\text{III.3.21})$$

On peut alors appliquer le théorème de Kharitonov avec une fonction en w.

Si pour la fonction de transfert entre débit des refus et répartiteur on a l'expression :

$$H(z^{-1}) = \frac{0.228 \cdot z^{-1} + 0.126 \cdot z^{-2}}{(1 - z^{-1}) \cdot (1 - 0.56 \cdot z^{-1})} \quad (\text{III.3.22})$$

$$R = 0.82 - 0.36 z^{-1} \quad (\text{III.3.23})$$

$$S = 0.23 + 0.126 z^{-1} \quad (\text{III.3.24})$$

$$T = 1 - 0.74 z^{-1} + 0.2 z^{-2}, \quad (\text{III.3.25})$$

avec :

$$\delta b_1 = \pm 0.03$$

$$\delta b_2 = \pm 0.02$$

$$\delta a_1 = \pm 0.07$$

$$\delta a_2 = \pm 0.03 ,$$

on étudie le polynôme A(w) :

$$A(w) = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot w + \alpha_3 \cdot w^2 + w^3 = \frac{A'_1}{A'_4} + \frac{A'_2}{A'_4} \cdot w + \frac{A'_3}{A'_4} \cdot w^2 + w^3 .$$

On obtient :

$$0.59 \leq \alpha_3 \leq 0.86$$

$$0.82 \leq \alpha_2 \leq 1.12$$

$$0.15 \leq \alpha_1 \leq 0.29 ;$$

il suffit donc d'avoir la stabilité des 4 polynômes suivants :

$$0.29 + 1.12 \cdot s + 0.59 \cdot s^2 + s^3$$

$$0.15 + 1.12.s + 0.86.s^2 + s^3$$

$$0.15 + 0.82.s + 0.86.s^2 + s^3$$

$$0.29 + 0.82.s + 0.59.s^2 + s^3$$

Soit les tableaux de Routh correspondants:

0.29	0.59	0.15	0.86	0.15	0.86	0.29	0.59
1.12	1	1.12	1		0.82	1	0.82
0.33			0.73		0.68		0.24
1	1		1		1		1

Pour les incertitudes considérées (5 à 10%), on a bien un correcteur stable.

En conclusion, nous pourrions dire que les calculs sont assez longs et qu'ils pourraient être informatisés, ce qui simplifierait la procédure.

III.4 Commande adaptative

III.4.1 Présentation

Les expériences réalisées dans le cadre de l'étude " régulation de broyeur " faisant intervenir ce type de commande font partie des travaux de Maa [Maa90] et Osselin [Oss90].

Une commande adaptative consiste en la réalisation d'un régulateur ajustable en temps réel , de manière automatique. Elle est généralement appliquée lorsque les paramètres du processus sont mal connus ou varient en fonction du temps [Bor91] .

On spécifie les performances en boucle fermée (le plus généralement représentées par l'optimisation d'un critère) , et on définit ensuite la structure et le type du régulateur utilisé.

Enfin, le type d'adaptation permettant d'ajuster au mieux les paramètres du régulateur est déterminé.

L'intérêt d'une commande adaptative apparaît essentiellement dans le cas où les perturbations sont paramétriques, c'est-à-dire lorsqu'elles agissent sur les caractéristiques du procédé à commander, l'effet des perturbations agissant sur les variables à réguler ou à commander pouvant être éliminé par d'autres types de commandes ([Bor91]) .

Nous rappelons ci-dessous le schéma de principe d'une telle commande (fig[III.4.1]) .

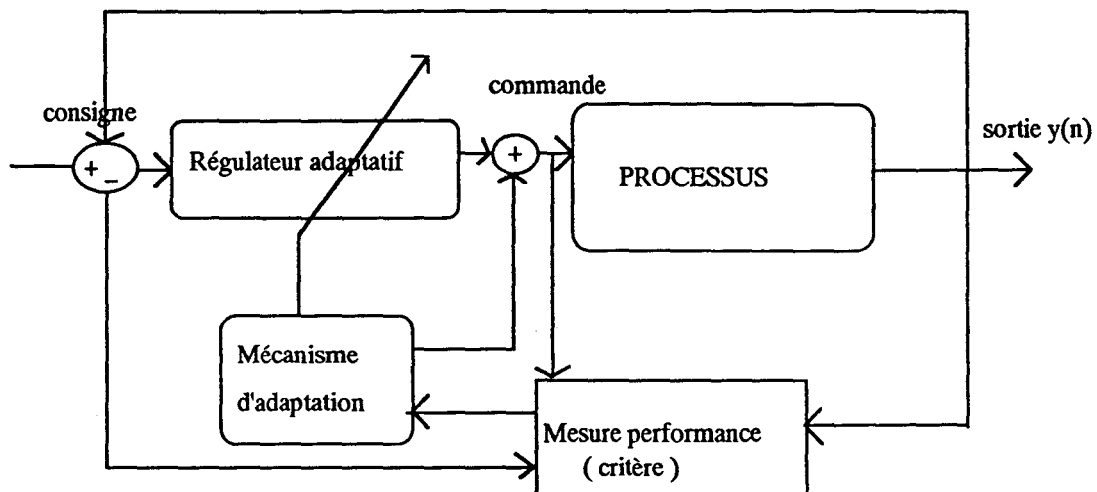


fig [III.4.1] Principe de la commande adaptative

Deux approches existent pour ce type de commande ([Lan79]):

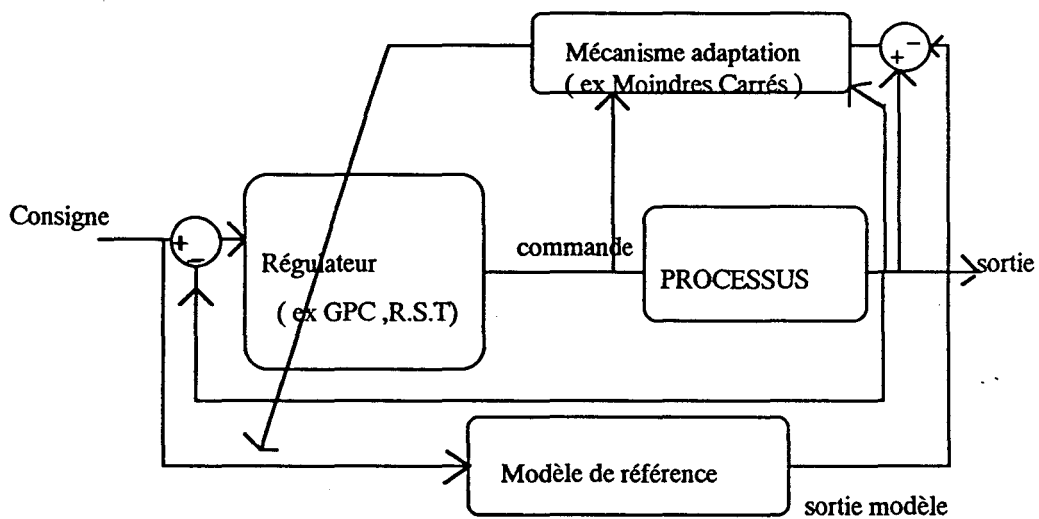
- la commande adaptative directe, dans laquelle les paramètres du régulateur sont ajustés directement par comparaison entre les performances réelles et désirées, par le biais par exemple d'un indice de performance;
- la commande adaptative indirecte, supposant l'estimation et la modification des paramètres du processus, ce qui revient à une identification en temps réel. Le régulateur est alors calculé à partir des paramètres réactualisés.

M.R.A.C. (commande adaptative directe)

Si l'on veut obtenir $C(z^{-1}) y(t+1) = 0$, pour éliminer une perturbation initiale avec la dynamique C , on minimise par exemple le critère $J = C.[y(t+1) - y_M(t+1)]^2$, où y sortie réelle et y_M sortie du modèle [Lan86].

S'il existe des incertitudes sur les paramètres du procédé, la structure du régulateur reste inchangée, mais, par contre, les paramètres du régulateur deviennent ajustables, le critère étant minimisé par rapport aux paramètres du régulateur. On recherche θ tel que $\frac{\partial J}{\partial \theta} = 0$ (par exemple par algorithme du gradient), d'où l'algorithme d'adaptation paramétrique sur θ (où θ représente les paramètres du régulateur).

En conclusion, le modèle de notre étude est suffisamment précis pour ne pas devoir être réétalonné constamment. Toutefois, dans le cas d'une perturbation importante où le modèle ne serait plus assez robuste, il est intéressant d'avoir un modèle interne et une adaptation du régulateur. Cette adaptation permet de compenser la perturbation en ajustant les paramètres du régulateur. Cette approche n'a pas été développée mais elle semble néanmoins séduisante (fig [III.4.2]).

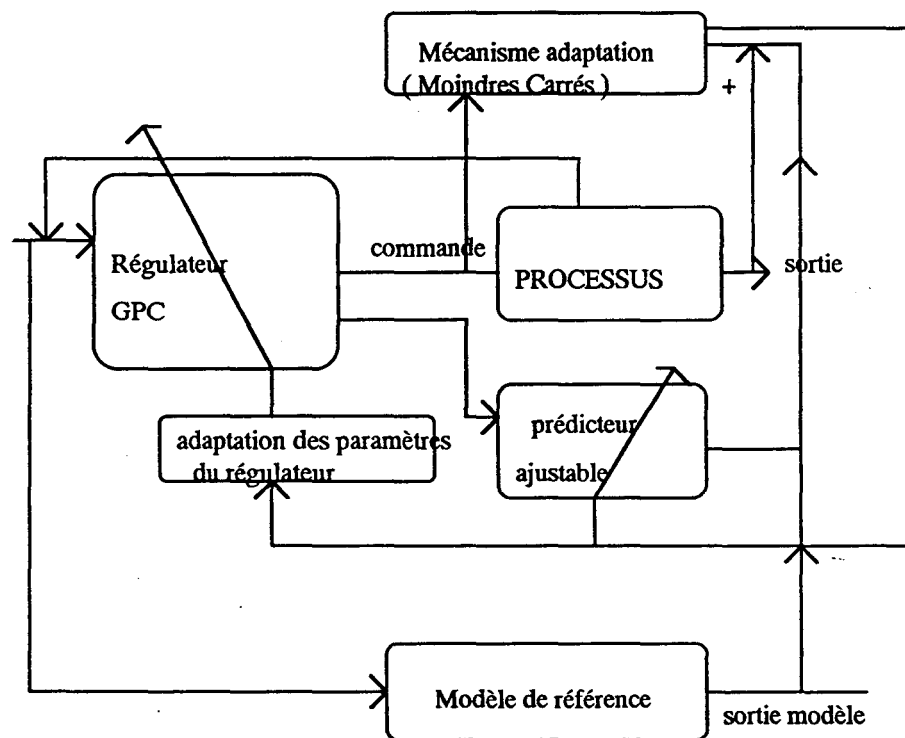


fig[III.4.2] *Commande M.R.A.C.*

Kurz ([Kur88]) nous montre en particulier que les performances des algorithmes adaptatifs dépendent beaucoup de la structure en boucle ouverte du procédé commandé (retard, stabilité...) et qu'il n'existe pas d'algorithme miracle.

III.4.2 Algorithme d'adaptation

Le schéma de la commande est donné ci-dessous; (fig[III.4.3])



fig[III.4.3] Schéma de principe d'Expert-AD

La méthode utilisée pour réguler notre broyeur est celle associée au progiciel de la société ADAPTECH: il s'agit d'une commande adaptative indirecte. L'algorithme d'adaptation du modèle est une méthode des Moindre-Carrés Récursifs avec contraction des paramètres et la méthode utilisée pour réguler est la Commande Prédicative Généralisée (Generalized Predictive Control , GPC).

Le schéma de principe du correcteur est le même que celui du correcteur adaptatif indirect. Il existe toutefois en plus une mesure de vraisemblance de l'information courante par rapport à l'information contenue dans le procédé permettant de modifier les paramètres du modèle interne.

Il faut noter la spécificité de l'existence d'une modélisation a priori de la perturbation externe.

Le régulateur peut commander des modèles du type:

$$A(z^{-1}).y(z^{-1})=B(z^{-1}).z^{-d-1}.u(z^{-1})+C(z^{-1})v(z^{-1})/(1-z^{-1}). \quad (\text{III.4.1})$$

On appelle v la perturbation externe, modélisée par un bruit blanc, y la sortie et u l'entrée.

Le terme en $(1-z^{-1})$ permet d'incorporer une action intégrale dans la régulation.

Les hypothèses retenues par le régulateur sont ([Ada88]) :

- le procédé est stabilisable;
- les perturbations sont suffisamment faibles en moyenne.

Le but du paragraphe suivant est de présenter le mécanisme d'adaptation, qui revient à estimer les paramètres du modèle en ligne par une méthode du type des Moindres Carrés; comme l'information, dans le cas où le processus est bien régulé, est moins riche qu'une identification par S.B.P.A. par exemple, nous introduisons des variantes de cette méthode afin de suppléer au manque d'information.

On cherche donc à déterminer des paramètres θ tels que :

$$y(n) = \theta^T \varphi(n-1) + v(n) \quad (\text{III.4.2})$$

$$\theta = [a_1, \dots, a_{n_a}, b_1, \dots, b_{n_b}]^T,$$

$$\text{En posant } \varphi(n) = [-y(n), \dots, -y(n-n_a+1), u(n-d), \dots, u(n-d-n_b)]^T.$$

On normalise les données de manière à ce que la quantité $C(z^{-1}).v(n)/(1-z^{-1})$ soit bornée (en passant par un filtre du type $\frac{1-\mu}{1-\mu.z^{-1}}$ avec μ constante).

Enfin, on essaie d'obtenir le modèle par un algorithme d'adaptation robuste permettant d'adapter le modèle continûment donc l'obtention :

- d'un modèle avec des paramètres bornés par un scalaire choisi;
- d'un modèle dont le critère des Moindres Carrés soit inférieur à une valeur choisie;
- d'un modèle dont les paramètres évoluent lentement.

Les algorithmes d'adaptation sont:

- l'algorithme des Moindres Carrés avec contraction des paramètres estimés .

On appelle $\theta(n)$ le vecteur des paramètres estimés, $F(n)$ le gain d'adaptation , $f(n)$ le facteur d'oubli , avec $0 < f(n) \leq 1$. σ et $\theta_p(n)$ définissent la dynamique d'évolution des paramètres du procédé. On obtient :

$$F(n+1) = \frac{\sigma^2}{f(n)} \left(F(n) - \frac{F(n) \cdot \varphi_f(n) \cdot \varphi_f(n)^T \cdot F(n)}{1 + \varphi_f(n)^T \cdot F(n) \cdot \varphi_f(n)} \right) \quad (\text{III.4.3})$$

et

$$\theta(n+1) = \sigma \cdot \theta(n) + (1 - \sigma) \cdot \theta_p(n+1) + \frac{F(n) \cdot \varphi_f(n) \cdot (y_f(n) - \theta^T(n) \varphi_f(n))}{1 + \varphi_f(n)^T \cdot F(n) \cdot \varphi_f(n)} \quad (\text{III.4.4})$$

- l'algorithme des Moindres Carrés avec projection des paramètres estimés .

On appelle $\theta(n)$ le vecteur des paramètres estimés, $F(n)$ le gain d'adaptation , $f(n)$ le facteur d'oubli . Nous avons $0 \leq \sigma \leq 1$, $0 < f(n) \leq 1$. θ_p est le centre de la sphère de projection et R_p son rayon. On obtient :

$$\theta(n+1) = \theta(n) + \frac{F(n) \cdot \varphi_f(n) \cdot (y_f(n) - \theta^T(n) \varphi_f(n))}{1 + \varphi_f(n)^T \cdot F(n) \cdot \varphi_f(n)} \quad (\text{III.4.5})$$

$$F(n+1) = \frac{1}{f(n)} \left(F(n) - \frac{F(n) \cdot \varphi_f(n) \cdot \varphi_f(n)^T \cdot F(n)}{1 + \varphi_f(n)^T \cdot F(n) \cdot \varphi_f(n)} \right) \quad (\text{III.4.6})$$

$$\theta(n+1) = \theta_p(n+1) + \min \left(1, \frac{R_p}{\|\theta(n+1) - \theta_p(n+1)\|} \right) (\theta(n+1) - \theta_p(n+1)). \quad (\text{III.4.7})$$

Ces algorithmes permettent d'éviter un effet de dérive propre aux Moindres Carrés. Ils nécessitent néanmoins :

- la détermination du facteur d'oubli et de la matrice d'initialisation ;
- la connaissance de σ et de $\theta_p(n)$ ou de la sphère de projection selon la méthode.

Nous définissons $\sigma(n) = f(n) \cdot \varphi_f^T(n-1) \cdot F(n) \cdot \varphi_f(n)$.

Si $\sigma(n) < \sigma_0$ avec σ_0 prédéfini, on utilise un algorithme des Moindres Carrés récurrents. Dans le cas contraire, l'information courante ressemblant trop à l'information ancienne, la mesure de vraisemblance de l'information σ nous permet d'introduire une projection des paramètres (on se trouve dans un cas où l'on est en régulation et où un algorithme de Moindres Carrés risque de ne pas être efficace).

Cette procédure de gain d'adaptation permet effectivement d'obtenir des résultats même en cas de pauvreté de l'information. Elle présente plusieurs côtés critiquables:

- une telle recherche est délicate, car elle suppose une bonne initialisation de l'algorithme et donc finalement une bonne connaissance a priori du procédé;
- dans notre cas, une telle adaptation n'est pas utile; elle nous oblige de plus à modéliser la perturbation ce qui n'est pas facile pour le procédé étudié.

III.4.3 Algorithme de commande: Commande Prédictive Généralisée (Clarke [CMT87])

Reprenons notre modèle:

$$A(z^{-1}) \cdot y(n) = B(z^{-1}) \cdot z^{-d-1} \cdot u(n) + C(z^{-1}) \cdot v(n) / (1 - z^{-1}).$$

Nous appelons v la perturbation externe considérée comme un bruit blanc, d le retard pur, u la commande et y la sortie

Le terme en $1 - z^{-1}$ permet d'introduire une intégrale dans la commande.

Le principe de la commande prédictive généralisée (GPC) est de minimiser le critère quadratique :

$$J(n, h_p, h_c, h_i) = \sum_{i=h_i}^{h_p} (y(n+i))^2 + \lambda ((1 - z^{-1}) \cdot u(n+i+h_i))^2 \quad (\text{III.4.8})$$

$$(1 - z^{-1}) u(n+i) = 0 \quad \forall i \geq h_c,$$

où h_p, h_i, h_c représentent les horizons, de prédiction, d'initialisation et de commande (explicités dans le sous-chapitre suivant).

Nous définissons n comme la période courante.

$\lambda > 0$ permet de pondérer l'effet de l'entrée.

On calcule $u(n+1)$ que l'on applique à l'instant suivant (n est la période courante).

Pour cela, nous allons d'abord rechercher la valeur de la sortie prédite à des temps supérieurs à n , et nous découpons cette sortie prédite en :

– une sortie libre $y_i(t+i | t)$ avec donc une entrée de modèle $\Delta u(t+i)=0$ où Δ est l'opérateur $1-z^{-1}$;

– une sortie forcée qui est la réponse aux commandes futures $u(t+i)$;

La première étape commence avec la résolution de l'équation Diophantine :

$$C(z^{-1})=E_i(z^{-1}).A(z^{-1}).(1-z^{-1})+z^{-i}F_i, \text{ avec } E_i \text{ et } F_i \text{ polynômes.} \quad (\text{III.4.9})$$

On multiplie l'équation du modèle par $E_i z^i$ et on remplace $A(z^{-1}).E_i(z^{-1}).(1-z^{-1})$ par son expression dans l'équation Diophantine soit :

$$C(z^{-1}).y(n+i | n)=E_i(z^{-1}).B(z^{-1}).z^{-i}.\Delta u(n-d-1)+F_i(z^{-1}).y(n)-E_i(z^{-1}).C(z^{-1}).v(n+i) \quad (\text{III.4.10}).$$

On remarque que $C(1)=F_i(1)$, donc on a :

$$F_i(z^{-1})=C(z^{-1})+F_i(z^{-1}).(1-z^{-1}). \quad (\text{III.4.11})$$

Nous décomposons $E_i.B$ en introduisant L_i et M_i tels que :

$$E_i(z^{-1}).B(z^{-1})=L_i(z^{-1}).C(z^{-1})+z^{-i}.M_i(z^{-1}). \quad (\text{III.4.12})$$

On peut écrire les sorties prédites par :

$$C(z^{-1}).y(n+i)=C(z^{-1}).L_i(z^{-1}).\Delta u(n+i-1)+M_i(z^{-1}).\Delta u(n-1)+C(z^{-1}).y(n)+F_i(z^{-1}).\Delta y(n)+E_i(z^{-1}).v(n+i). \quad (\text{III.4.13})$$

Il est nécessaire de filtrer y et u par $u_f=u.\Delta/C(z^{-1})$ et $y_f=y.\Delta/C(z^{-1})$.

Ce filtrage nous assure que les prédictions sur les erreurs futures, valant alors $E_i.v(n+j)$ sont indépendantes des données disponibles au temps n .

En effet, en divisant par $C(z^{-1})$ on obtient les sorties prédites:

$$y(n+i)=L_i(z^{-1}).\Delta u(n+i-1)+M_i(z^{-1}).u_f(n-1)+y(n)+F_i(z^{-1}).y_f(n)+E_i(z^{-1}).v(n+i). \quad (\text{III.4.14})$$

La sortie se décompose alors en un terme fonction des données existantes
 $y_1(n+i | n) = M_i(z^{-1}).u_f(n-1) + y(n) + F_i(z^{-1}).y_f(n),$ (III.4.15)

en un terme fonction de la commande future:
 $y_2(n+i | n) = L_i(z^{-1}).\Delta u(n+i-1),$ (III.4.16)

et en un terme fonction de l'erreur future :
 $E_i(z^{-1}).v(n+i).$ (III.4.17)

On peut alors minimiser le critère J défini plus haut par :

$$J(n, h_p, h_c, h_i) = \sum_{i=h_i}^{h_p} (y(n+i))^2 + \lambda((1-z^{-1}).u(n+i+h_i))^2$$
 (III.4.18)
$$(1-z^{-1}).u(n+i) = 0 \quad \forall i \geq h_c.$$

Par dérivation , on obtient :

$$\frac{\partial J}{\partial u} = 0 .$$

Pour $v(t+i)=0$, on obtient si l'on appelle \bar{u} le vecteur des incréments de commande futurs $\Delta u(t+i)$, et L la matrice des L_i , c le vecteur consigne :

$$\bar{u} = (L^T.L + \lambda.I)^{-1}.L^T.(c - y_1),$$
 (III.4.19)

La dimension de \bar{u} étant de h_c .

On prend bien sûr la première composante de \bar{u} qui est $\Delta u(t)$ et l'on recommence le calcul à chaque pas.

On peut écrire cette commande sous forme R.S.T. :

$$S(z^{-1}).(1-z^{-1}).u + R(z^{-1}).y = T(z^{-1}).c,$$
 (III.4.20)

en décomposant les matrices dans l'expression de \bar{u} .

Remarques et commentaires: on remarque que l'on s'attache à donner un modèle de perturbation , ce qui explique qu'avec une mauvaise initialisation , une des expériences de Cruas ait échoué.

Le système est stable asymptotiquement si S et R rendent le système en boucle fermée asymptotiquement stable .

III.4.4 Robustesse de la régulation autoadaptative:

Un régulateur autoadaptatif comporte une partie commande linéaire et une partie adaptative proprement dite , qui peut être non-linéaire. Ce dernier aspect pose a priori plus de problèmes que le premier.

Ortega [OrP86] nous montre que si aucun des régulateurs de la classe d'adaptation n'est stabilisant pour le système, celui-ci ne sera jamais régulé correctement; en particulier, il faut que nos polynômes R, S, et T stabilisent le système en boucle fermée.

Les perturbations bornées déstabilisent également l'adaptation, en particulier pour un système discret. Dans Ortega,[OrP86], il est donné un certain nombre d'exemples montrant les problèmes de stabilité posés par l'adaptation sur un système stable en boucle fermée sans adaptation.

Praly [OrP86] nous montre que si les erreurs de modélisations peuvent être bornées de façon affine par une norme des entrées-sorties, alors un schéma indirect de placement de pôles (ce à quoi revient notre cas) pourra donner un comportement stable.

La GPC [CMT87] elle-même est une méthode qui donnera un comportement stable si :

- la perturbation v est nulle en moyenne;
- si les paramètres de synthèse sont bien choisis (voir chapitre suivant)

On trouve en pratique (Clarke [CMT87]) que $h_i=1$, $h_p=10$, $h_c=1$, $\lambda=0$ est un bon point de départ;

si $h_p \rightarrow \infty$, $h_c=h_i=1$, on montre que le processus est stable et que la loi de commande est particulièrement robuste.

On remarquera toutefois que la commande adaptative n'offre pas de garanties de robustesse . En pratique , les performances sont bonnes . La faiblesse de la commande provient de la difficulté à recalibrer le modèle après une période de fonctionnement avec un niveau d'excitations faible . Le modèle n'est alors souvent plus adéquat et la commande risque de mal répondre à une sollicitation brutale .

III.4.5 Résultats

Avec un modèle de processus :

$$\frac{y(z^{-1})}{u(z^{-1})} = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} = \frac{0.2 \cdot z^{-1}}{1 - 0.99 \cdot z^{-1}} \cdot z^{-6}, \quad (\text{III.4.21})$$

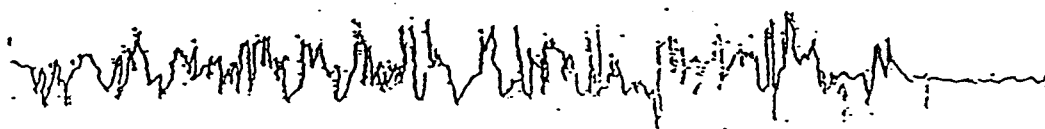
(débit refus-débit alimentation)

et les caractéristiques suivantes: $h_j=8$, $h_p=16$, $h_c=1$, $D(z^{-1})=1-z^{-1}$, pas de filtrage , un précompensateur $\frac{B_m}{A_m} = \frac{0.15}{1 - 0.85 \cdot z^{-1}}$ et un comportement en régulation $P= 1-0.7 z^{-1}$, on

obtient des résultats assez satisfaisants puisque les variations ont atteint $\pm 3T/h$ en débit des refus (fig [III.4.4]) (on n'a pas de filtrage ni de modélisation de perturbations).

Commande Expert-AD avec
et sans adaptation

débit alimentation atelier (20 T/h)



consigne=40 T/h

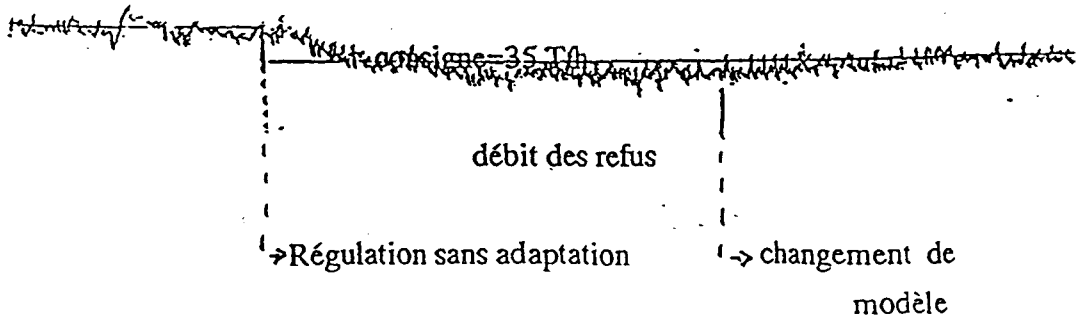


fig [III.3.4] Résultats Expert-AD

Une deuxième expérience a néanmoins conduit à une divergence de l'algorithme.

III.5 Commande prédictive

III.5.1 Principe et algorithme

Nous avons utilisé une commande prédictive à base de modèle (MBPC) . Cette commande possède plusieurs propriétés intéressantes qui ont retenu notre attention.

- elle intègre explicitement un modèle du type de celui que nous avons identifié;
- elle permet de traiter un retard important;
- elle permet de traiter des perturbations sans donner un modèle a priori mais en identifiant la perturbation a posteriori (autocompensation de l'erreur);
- son concept est simple ;
- elle est robuste même avec des réglages non optimaux.

Le principe consiste , connaissant la sortie du processus à commander, à trouver la commande permettant de lui faire rallier une trajectoire de référence(fig[III.5.1]) .

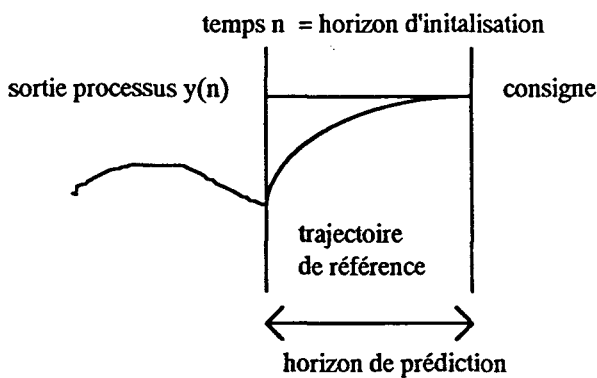
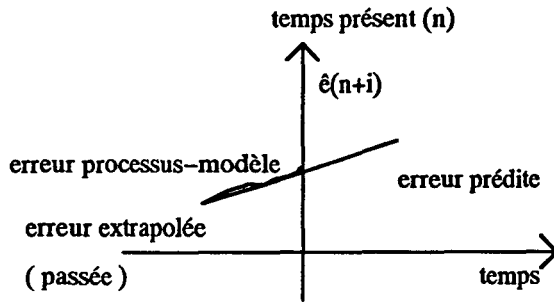


fig [III.5.1] Ralliement de consigne à partir de la trajectoire de référence

Il faut donc pouvoir prédire l'effet d'une séquence de commande sur les sorties futures du processus, la prédiction étant réalisée par un modèle de sortie ou un modèle interne d'état. La commande est alors définie en minimisant un critère de distance entre trajectoire et sortie , sur un certain horizon de commande [Bor93] .

La sortie du modèle étant différente de celle du processus, il en résulte une erreur qui sera utilisée pour modifier en temps réel le modèle utilisé, en effectuant une prédiction de l'évolution de l'erreur , et en corrigeant en conséquence l'objectif visé pour la sortie du modèle.

Nous avons pris en première approximation une erreur évoluant en rampe (fig[III.5.2]) .



fig[III.5.2] Evaluation de l'erreur future

$\hat{e}(n+i)$ est l'erreur prédite au temps $n+i$, n le temps présent, y la sortie du processus, y_m la sortie du modèle .

Dans ces conditions, la commande à calculer doit être telle que la dérive soit compensée, donc que la sortie du modèle soit diminuée de l'erreur prédite.

Nous supposons, si y désigne la sortie processus et y_m la sortie du modèle, que l'évolution de l'erreur est modélisable sous la forme:

$$\hat{e}(n+i) = y(n) - y_m(n) + e_1 \cdot i. \quad (\text{III.5.1})$$

Extrapoler e_1 revient à calculer l'autocompensateur.

On filtre l'erreur par un premier ordre, cela pour éviter un risque d'instabilité du polynôme d'erreur [AbE90] .

En réalité, nous avons un processus avec retard pur, donc la sortie est une sortie retardée, soit la sortie est $y_{\text{ret}}(n)$ si $y(n)$ représente l'estimation de la sortie d périodes plus tard (d est le retard):

$$y(n) = y_m(n) + \hat{e}(n), \quad (\text{III.5.2})$$

$$y_{\text{ret}} = y_{m\text{ret}} + \hat{e}(n-d), \quad (\text{III.5.3})$$

$$e(n-d) = \hat{e}(n) - e_1(n) \cdot d, \quad (\text{III.5.4})$$

$$\text{donc } y(n) = y_{\text{ret}}(n) + y_m(n) - y_m(n-d) - e_1(n) \cdot d, \quad (\text{III.5.5})$$

ce qui nous ramène au système sans retard en ayant calculé ainsi $y(n)$.

Nous cherchons donc à extrapoler l'erreur, ce qui revient, à partir des erreurs processus-modèle filtrées $e_f(n-i)$, $0 \leq i \leq h_a$, à calculer $e_0(n)$ et $e_1(n)$ tels que :

$$\hat{e}_f(n+i) = e_0(n) + e_1(n) \cdot i \quad (\text{fig [III.5.3]}) \quad (\text{III.5.6})$$

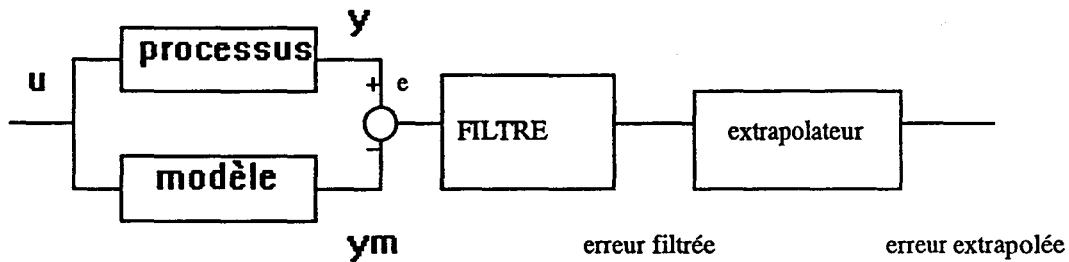


fig [III.5.3] Extrapolation d'erreur

Nous appelons $s(i) = e_f(n-i)$, les erreurs e_f étant définies sur l'horizon h_a .

Nous disposons de h_a équations $s(i) = e_0(n) - i \cdot e_1(n)$ $0 \leq i \leq h_a$.

On obtient les inconnues $e_1(n)$ par une méthode des Moindres Carrés.

Centrons d'abord les données :

Nous appelons $s^*(i)$ la différence entre $s(i)$ et la moyenne des $s(i)$ (sur un horizon h_a)

qui est donc une variable centrée . La moyenne \bar{s} des erreurs s'écrit :

$$\bar{s} = \frac{1}{1+h_a} \cdot \sum_{i=0}^{h_a} s(i) = e_0(n) - \frac{h_a}{2} \cdot e_1(n) \quad (\text{III.5.7})$$

$$\text{Donc la variable centrée } s^*(i) \text{ vaut } s^*(i) = e_1(n) \cdot \left(-i + \frac{h_a}{2}\right) \quad (\text{III.5.8})$$

$$\text{Posons : } a = \sum_{i=0}^{i=h_a} \left(-i + \frac{h_a}{2}\right)^2$$

$$\text{et } b = \frac{1}{a}$$

On obtient la solution Moindres Carrés pour le terme du premier ordre de l'erreur extrapolée e_1 :

$$e_1(n) = b \cdot \sum_{i=0}^{i=h_a} \left(-i + \frac{h_a}{2}\right) \cdot s^*(i) \quad (\text{III.5.9})$$

Le terme constant vaut :

$$e_0(n) = \frac{1}{h_a} \sum_{i=0}^{i=h_a} s(i) + e_1(n) \cdot \frac{h_a}{2} \quad (\text{III.5.10})$$

Pour notre système à retard, on pose :

$$e_f(n-d-i) = e_0(n) + e_1(n) \cdot (-i-d), \text{ et on suit la même procédure} \quad (\text{III.5.11})$$

(en effet , on dispose simplement les erreurs retardées comme indiqué plus haut).

Nous disposons maintenant d'un algorithme nous permettant de calculer l'erreur prédite:

$$\hat{e}_f(n+i) = e_0(n) - i \cdot e_1(n), \text{ avec } e_0 \text{ et } e_1 \text{ calculés ci-dessus.}$$

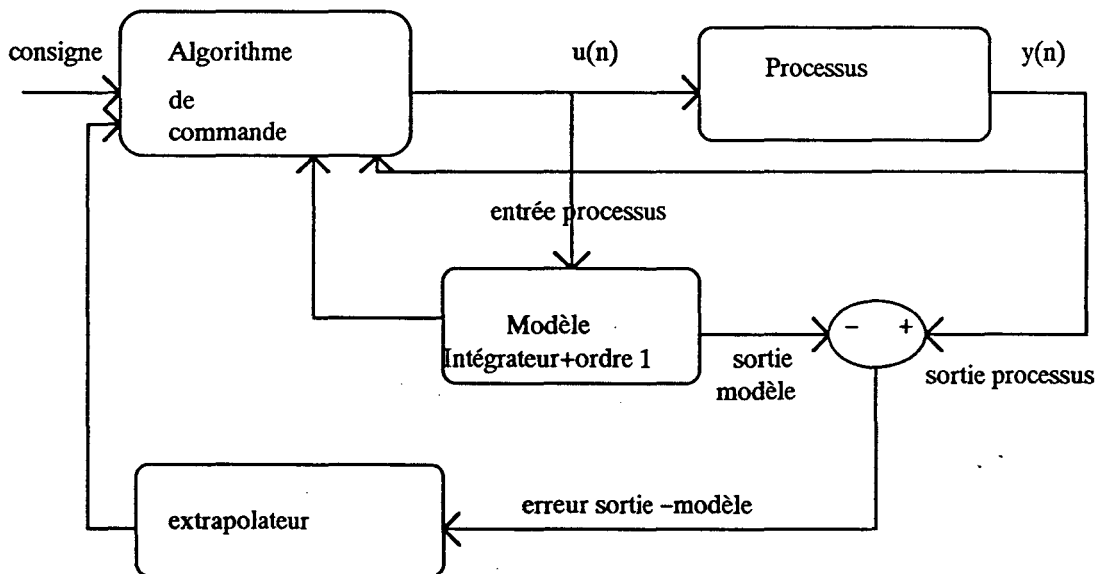


fig [III.5.4] Schéma de principe

Le but de la commande prédictive est de minimiser, au sens d'un horizon fuyant, le critère:

$$D(n) = \sum_{j=0}^{j=n_h} (y(n+h_j) - y_{ref}(n+h_j))^2, \quad (\text{III.5.12})$$

où $y(n+j)$ est la sortie prédite du processus .

$y_{réf}$ est la sortie de référence définie chez nous par un premier ordre (correspondant au polynôme P du R.S.T) permettant de spécifier le comportement en poursuite , soit si a est un nombre $0 < a < 1$, et $c(n)$ la consigne au temps n :

$$c(n+i) - y_{réf}(n+i) = a^i (c(n) - y(n)) , \text{ sur un certain horizon.} \quad (\text{III.5.13})$$

En réalité, les h_j , points de coïncidence entre la trajectoire et le modèle, sont pris tels que : $h_i \leq h_j \leq h_p$ et $u(n+j) = 0$ pour $j \leq h_c$, u étant la commande et h_i l'horizon d'initialisation , h_p l'horizon de prédiction, h_c l'horizon de commande. h_i représente l'instant à partir duquel on prend en compte la sortie, h_p tient plus particulièrement compte de la dynamique du processus (temps de montée et retard). h_c permet de spécifier le temps de ralliement de la trajectoire autrement dit une spécification sur la commande .

Nous prendrons $h_p = h_c$.

On définit de plus la commande comme étant la combinaison de fonctions de base (échelon, rampe ...). Il est démontré ([Ric90]) que pour suivre une consigne de degré d_c , il suffit d'un échelon si le nombre d'intégrateurs est supérieur ou égal au degré de la consigne et on obtient une erreur entre la trajectoire de ralliement et la sortie qui tend asymptotiquement vers 0 (le degré de la consigne n'est jamais supérieur à un dans notre cas). La commande s'écrira donc $u(n+i) = \mu(n+i) \cdot \{ \text{échelon unité} \}$. On prendra en compte la commande $u(n)$.

Pour calculer le régulateur, nous montrons que la sortie du modèle s'écrit:

$$y_m(n+i) = y_f(n+i) + y_l(n+i) . \quad (\text{III.5.14})$$

$y_l(n+i)$ est calculée par la fonction de transfert avec $u(n+i) = 0 \forall i \geq h_c$.

$y_f = \mu(n) \cdot y_b(i)$, y_b étant la réponse forcée du modèle à une sollicitation en échelon .

$$\text{Soit la sortie prédite } y(n+i) = y_m(n+i) + \hat{e}(n+i) , \quad (\text{III.5.15})$$

où $\hat{e}(n+i) = e(n) + e_1(n) \cdot i$, avec $e(n) = y(n) - y_m(n)$ (voir autocompensation) .

On note alors :

$$D(n) = \sum_{j=h_i}^{j=h_p} (y_l(n+j) + y_f(n+j) + e_0(n) + e_1(n) \cdot j - y_{réf}(n+j))^2 . \quad (\text{III.5.16})$$

En remplaçant y_f par son expression et en posant :

$$d(n+j) = y_{\text{réf}}(n+j) - y(n) - (y_l(n+j) - y_m(n)) - e_1(n) \cdot j \quad , \quad \text{on a :} \quad (\text{III.5.17})$$

$$D(n) = \sum_{j=h_i}^{j=h_p} (\mu(n) \cdot y_b(j) - d(n+j))^2. \quad (\text{III.5.18})$$

On cherche à minimiser le critère par rapport à la commande , on impose donc :

$$\frac{\partial D(n)}{\partial \mu(n)} = 0, \quad (\text{III.5.19})$$

$$\text{soit } \sum_{j=h_i}^{j=h_p} (\mu \cdot y_b(j) - d(n+j)) \cdot y_b(j) = 0, \quad (\text{III.5.20})$$

et donc :

$$\mu(n) = \frac{1}{\sum_{j=h_i}^{j=h_p} y_b^2(j)} \cdot \sum_{j=h_i}^{j=h_p} d(n+j) \cdot y_b(j). \quad (\text{III.5.21})$$

$$\text{Comme } y_{\text{réf}}(n+j) - y(n) = (1-a^j)(c_0(n) - y(n)) , \quad (\text{III.5.22})$$

où c_0 est le terme constant de la consigne ,

on peut écrire :

$$\mu(n) = R(n) \cdot d(n) \text{ et}$$

$$u(n) = d^T(n) \cdot R^T \cdot u_b .$$

u_b est l'échelon unité et

$$v = R^T \cdot u_b ,$$

$$\text{avec } R(n) = \frac{1}{\sum_{j=h_i}^{j=h_p} y_b^2(j)} \cdot \begin{pmatrix} y_b(h_i) \\ \vdots \\ \vdots \\ y_b(h_p) \end{pmatrix}. \quad (\text{III.5.23})$$

soit finalement :

$$u(n) = k_0(c(n) - y(n)) - k_1 \cdot e_1(n) + \{y_l(n+j) - y_m(n)\}^T \cdot v, \quad (\text{III.5.24})$$

$$\text{avec } k_0 = v^T \cdot \begin{pmatrix} 1 - a^{h_i} \\ \vdots \\ 1 - a^{h_p} \end{pmatrix} \quad \text{et } k_1 = v^T \cdot \begin{pmatrix} h_i \\ \vdots \\ h_p \end{pmatrix}. \quad (\text{III.5.25})$$

La commande comporte donc principalement un terme " écart mesure - consigne ", (équivalent à un R.S.T et en fait écart mesure - trajectoire de ralliement), un terme d'autocompensation de l'erreur, un terme de correction du modèle.

On initialise le modèle en prenant les premières valeurs du couple entrée-sortie et en supposant que le reste est nul (de plus, le modèle est intégrateur, ce qui justifie une mise à zéro de l'état du modèle interne).

Nous remarquons que les termes k_0 et k_1 ne dépendent que du modèle et des spécifications de la trajectoire de référence. Le coût informatique est donc peu élevé, puisque :

- la procédure d'autocompensation avec un premier ordre est simple;
- le fait d'avoir un processus intégrateur et une consigne de degré 0 simplifie également l'algorithme;
- le seul coût informatique est le calcul de la sortie libre et celle du modèle; comme celui-ci est un premier ordre+intégrateur, ce coût est faible. Par contre, il reste difficile de mettre un tel algorithme dans un automate ou dans un contrôle commande, tout simplifié qu'il soit.

En conclusion, on peut se servir de cet algorithme pour écrire une fonction dans un contrôle commande évolué (style FOXBORO) permettant d'écrire un petit programme dans un langage informatique du type langage C.

L'algorithme est plus simple et de maintenance plus facile qu'un algorithme autoadaptatif et semble mieux adapté pour notre type de fonction de transfert (algorithme performant utilisant une prédiction de la sortie et robustification par retour de l'erreur dans la formule sans que le comportement de cette erreur dépende explicitement d'une modélisation a priori). La critique majeure peut provenir des nombreux réglages qui ne sont pas explicitement spécifiés dans la conception de la commande.

II.5.2 Paramètres et résultats

Il est démontré que si l'écart objet-modèle se comporte asymptotiquement comme un polynôme, pour annuler asymptotiquement l'erreur de poursuite, il faut que le degré de l'autocompensateur soit au moins égal au degré du polynôme. Les fonctions de base permettent de suivre une consigne de ce même degré.

L'erreur de traînage va se comporter asymptotiquement comme un terme de degré $d_e - 2$ (car le processus comporte un intégrateur). Comme le degré de l'extrapolateur d_e vaut 1, l'erreur se comporte asymptotiquement comme $\frac{1}{n}$, ce qui confère effectivement une convergence vers 0 (d_e degré de l'erreur).

La robustesse et la stabilité du régulateur sont prouvées pour autant que la perturbation puisse bien être modélisée en permanence par un premier ordre (avec coefficient variable).

De plus, il est nécessaire que le modèle soit raisonnablement proche de la réalité.

Les réglages ci-dessous sont employés:

- h_i horizon d'initialisation en général pris égal à 0;
- h_c horizon de commande au moins supérieur au retard pur et pris égal à l'horizon de prédiction; en général, cet horizon couvre à la fois le retard pur et le début de la réponse du modèle; c'est le point le plus important pour la robustesse, la dynamique étant d'abord définie par la trajectoire de référence et la précision par l'obtention de la commande;
- l'autocompensation se fait sur un nombre suffisant de cas (10 - 20 valeurs); on remarque que la robustesse est influencée par le temps de réponse du filtre et par l'horizon passé h_a de l'extrapolateur.

Le tableau ci-dessous montre les réglages généralement utilisés ([Ada 88]):

d est le retard pur,
 h_i , horizon d'initialisation, vaut $h_i \cdot \{\text{période d'échantillonnage}\}$, et il en est de même pour h_p et h_c ,
 t_m est le temps de montée.

horizon initialisation	horizon de prédiction	horizon de commande	horizon d'extrapolation	trajectoire de référence
$t_m \geq h_i \geq d$	en général $h_p \geq 2 \cdot t_m - 1$ souvent $h_p \geq t_m$ ou même moins	$t_m \geq h_c \geq 1$ souvent $h_c = h_p$	souvent $20 \geq h_a \geq 10$	spécifiée en fonction de l'objectif

TABLE 2 : Réglages de la commande prédictive

Les paramètres principaux tels que points de coïncidence , paramètres de l'autocompensateur et même trajectoire de référence optimale, sont difficiles à régler finement. Seule l'expérience peut permettre de régler ces paramètres. Toutefois, une approche grossière suffit généralement à obtenir les performances désirées.

En cas de changement de modèle, (plusieurs types de ciment) , il suffit de commuter sur un autre modèle interne.

III.5.3 Résultats

Nous avons testé un correcteur prédictif avec différentes configurations et différentes boucles de réglage.

Nous avons essayé d'implanter l'algorithme dans le contrôle-commande mais le système n'acceptant que des modules de très petites dimensions, nous avons dû utiliser un P.C. et une carte entrée/sortie, matériel beaucoup trop complexe pour notre commande.

Les simulations nous donnent de bons résultats pour un premier ordre avec un coefficient α caractérisant la trajectoire de référence de 0.7 , pour une fonction de transfert entre refus et alimentation:

$$H(z^{-1}) = \frac{0.045 \cdot z^{-1} + 0.047 \cdot z^{-2}}{(1 - z^{-1}) \cdot (1 - 0.847 \cdot z^{-1})} \cdot z^{-3} \quad (\text{III.5.26})$$

Les réglages suivants ont été déterminés , pour le modèle ci-dessus , après simulations (fig[III.4.5]) : la valeur l'horizon de prédiction est de 8 périodes , ($h_p=8$) , la valeur de l'horizon d'extrapolation d'erreur est de $h_a=40$ périodes .

L'expérience nous montre que pour un tel horizon d'autocompensation, le système réagit mal face aux perturbations. De même, une valeur $h_a=10$ est un réglage qui ne convient pas au système.

Nous avons également testé $h_p=3$ qui s'est révélé beaucoup trop court pour pouvoir commander la fonction de transfert ci-dessus.

Nous avons donc pris un horizon $h_p= 6$ et un horizon d'autocompensation $h_a=20$ périodes (1 période=1 minute).

Enfin, une deuxième campagne de commande fut effectuée avec des réglages similaires sur une fonction de transfert entre débit des refus et répartiteur sous presse avec pour fonction de transfert :

$$H(z^{-1}) = \frac{0.228.z^{-1} + 0.126.z^{-2}}{(1 - z^{-1}).(1 - 0.56.z^{-1})} \quad (\text{III.5.27})$$

Les résultats mettent en évidence, sur un test de 2x 24 heures , une variation pouvant atteindre ± 7 T/h au lieu des ± 3 T/h espérés : ceci est dû à la fois aux arrêts et aux perturbations, qui n'ont pas permis de tester le correcteur plus longtemps. Lors de la mise en place du deuxième schéma de commande, ces variations ont été réduites presque de moitié. Toutefois, les résultats sont à peine meilleurs que pour un correcteur P.I.D. . Il me semble donc difficile d'améliorer davantage la régulation compte tenu des variations trop importantes et de la précision et surtout la rapidité des actionneurs.

L'existence d'un phénomène de pompage résiduel ne permet pas de valider l'algorithme de façon nette.

L'algorithme, avec un matériel permettant une bonne réponse et une bonne précision, donne toutefois d'excellents résultats en simulation , bien meilleurs que pour un P.I.D. , notamment en ce qui concerne le temps de montée et le rejet de perturbations.

On observe notamment fig[II.4.7] les performances de l'algorithme de régulation: nous avons pris des paramètres variant de 15 à 20 % par rapport à la réalité et des perturbations importantes, l'écart sur le modèle entraînant un dépassement prévisible . Nous avons pris un autocompensateur de 20 périodes , et des horizons successivement de 6 à 8 périodes , avec $\alpha= 0.9$, ceci pour le modèle:

$$H(z^{-1}) = \frac{0.045.z^{-1} + 0.047.z^{-2}}{(1 - z^{-1}).(1 - 0.847.z^{-1})} . z^{-3} \quad (\text{III.5.28})$$

Cette figure nous montre l'importance de l'horizon de prédiction à la fois sur la rapidité et sur les performances (nous avons volontairement pris un modèle très dégradé pour que la différence entre les deux configurations soit flagrante).

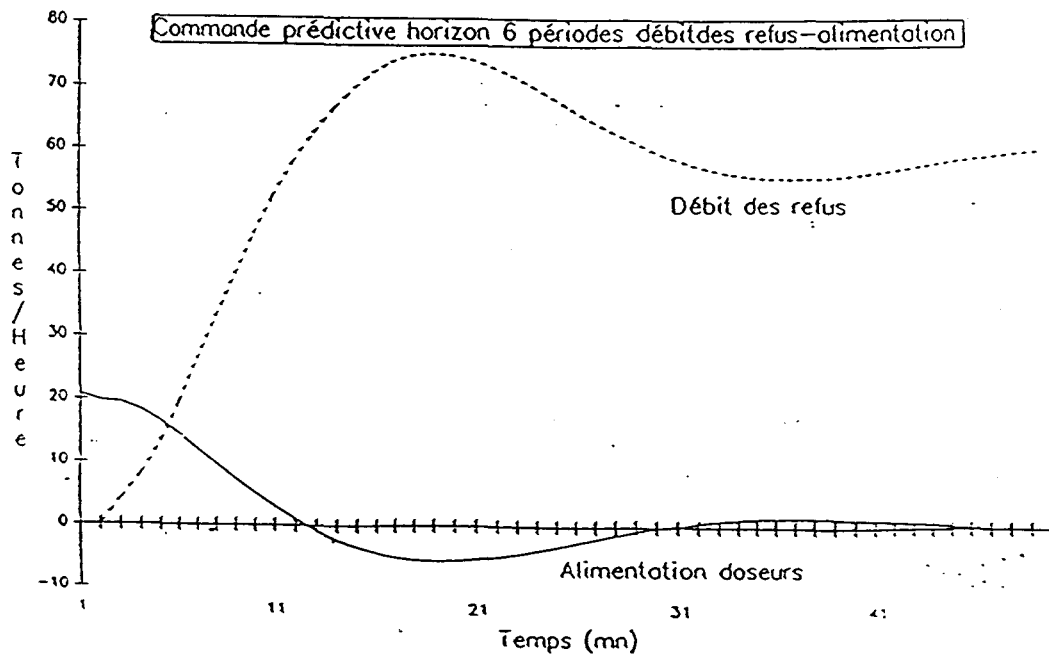
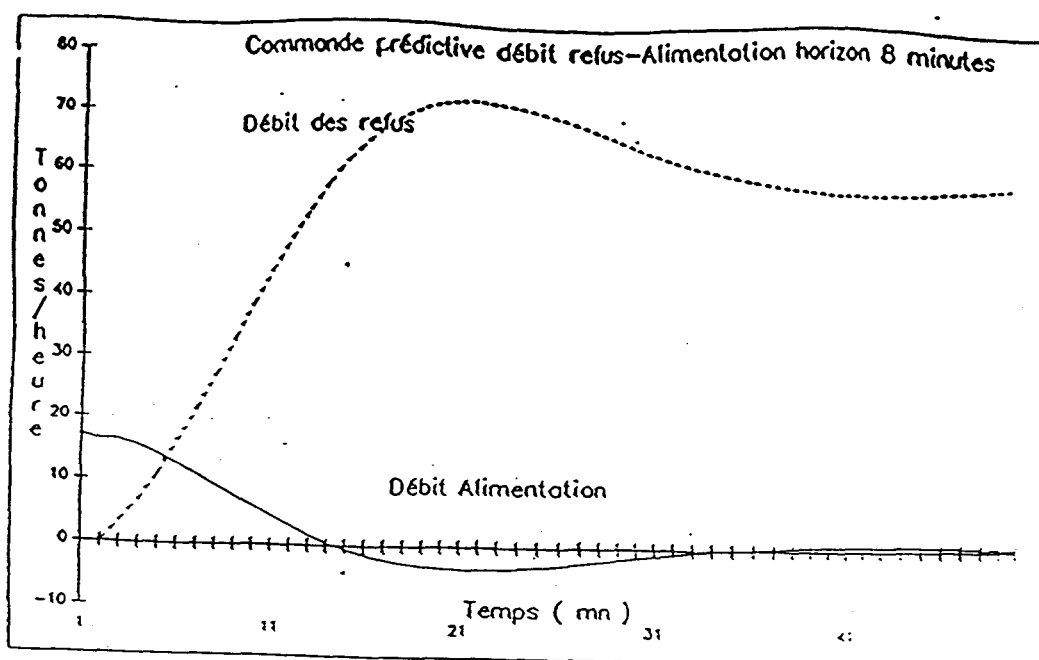


fig [III.5.6] Commande prédictive avec 6 périodes



fig[III.5.7] *Commande prédictive avec 8 périodes*

Conclusion

La commande prédictive à base de modèle nous semble être la mieux adaptée pour la commande du broyeur . Une version simplifiée associée au modèle que nous avons retenu est simple à implanter . La méthode d'autocompensation d'erreur permet un rejet satisfaisant des perturbations. Nous avons donc retenu a priori cette méthode , qui a été testée à Cruas , pendant une période hélas assez courte .

La commande R.S.T. s'avère difficile à régler car elle apparaît sensible aux variations des valeurs de ses propres paramètres.

La commande adaptato-prédictive nous a semblé intéressante à tester , mais son comportement est délicat lorsque les sollicitations sur le procédé sont faibles .

Les paramètres de ces algorithmes de régulation restent toutefois difficiles à régler de manière précise , particulièrement dans les deux derniers cas.

Commande Composite Floue–Conventionnelle d'un tunnelier

IV.1 Introduction

Cette partie présente l'intégration d'une commande floue à une commande conventionnelle . La commande ainsi retenue est appliquée à la stabilisation de la pression de front de taille d'un tunnelier à pression de terre.

Le principe des sous-ensembles flous est rappelé. Nous décrivons ensuite le principe d'une commande floue. Nous développons la méthode d'inférence proposée par Sugeno . La détermination des fonctions d'appartenance et des méthodes de "fuzzification" et de "défuzzification" est explicitée dans le sous-paragraphe suivant.

La détermination d'un tel correcteur nécessite un travail empirique très important basé principalement sur l'expertise des utilisateurs. Nous chercherons donc plutôt à coupler un correcteur flou à une commande existante , de manière à réduire l'erreur en boucle fermée.

En particulier , cette commande composite floue–conventionnelle s'avère robuste lorsque l'écart entre le modèle et le processus est important .

Un ensemble de règles dérivées de l'expérience permet de robustifier la commande P.I.D. à partir d'un modèle grossier. La détermination des paramètres est expliquée dans ce qui suit .

Certains traits spécifiques au procédé (saturation d'actionneurs , utilisation d'adjuvants) nécessitent un ajustement de la commande . Les résultats obtenus sont présentés en fin de chapitre.

IV.2 Généralités

IV.2.1 Sous-ensembles flous

Nous nous retrouvons dans le cadre de notre étude devant un phénomène complexe et multivariable où seule une commande de type expert peut nous donner satisfaction . Nous cherchons une méthode pouvant nous permettre de traduire des faits imprécis et d'en déduire le comportement des actionneurs.

Un sous-ensemble flou [Zad65] est un ensemble permettant la représentation de prédicats imprécis .

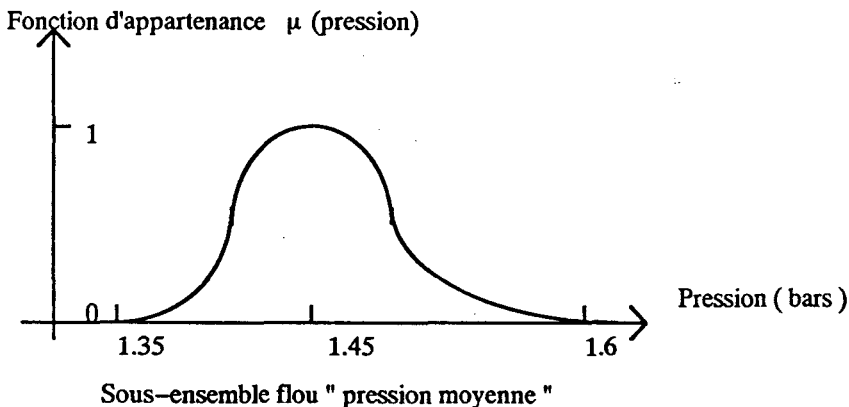
Un sous-ensemble flou E d'un univers U est déterminé entièrement par une fonction d'appartenance à valeurs prises dans l'intervalle [0,1] (qui permet d'introduire en particulier une logique ...):

$$\mu_E: U \rightarrow [0,1]$$

$$u \in U \rightarrow \mu_E(u),$$

où $\mu_E(u)$ est le degré d'appartenance de u à E (fig[IV.2.1]).

$$u \in E \leftrightarrow \mu_E(u)=1 \quad \text{et} \quad u \notin E \leftrightarrow \mu_E(u)=0 .$$



fig[IV.2.1] Exemple de sous-ensemble flou

L'appartenance de u à E est définie non plus par un terme booléen mais par des degrés d'appartenance permettant de définir des nuances. Il ne s'agit pas de probabilités mais de possibilités , par exemple la réponse (nuancée) d'un expert .

Nous pouvons rattacher alors les sous-ensembles flous à la théorie des ensembles . Nous ne discuterons que des aspects nous intéressant pour la commande floue.

Nous voyons que nous pouvons grâce à ces ensembles, définir une pression , par exemple , comme étant "élevée", avec un certain degré d'appréciation.

IV.1.2 Définitions

Un prédicat E est donc caractérisé par une fonction d'appartenance. Pour toute valeur u de l'univers de discours U, $0 \leq \mu_E(u) \leq 1$.

Un prédicat imprécis fait référence à plusieurs éléments de l'univers de discours, un prédicat précis fait appel à un seul élément de l'univers de discours.

Le support S du prédicat A, $S(A)$ est l'ensemble des valeurs pour lesquelles $\mu_A(u) > 0$

Une règle floue est du type X est A \rightarrow Y est B où A et B sont des faits flous.

Si une certaine propriété A est connue sur X, on peut en déduire la propriété B sur Y.

On peut assimiler une fonction d'appartenance $\mu_A(u)$ au degré de possibilité $P_X(u)$ que u soit la valeur de X.

On appelle U et V les univers de discours sur lesquels sont définis les prédicats A et B.

Une règle floue est caractérisée par la distribution de possibilités conditionnelles (DPC) de $U \times V$ dans $[0,1]$ qui restreint les valeurs possibles de Y pour une valeur donnée de X.

Ceci nous permet d'introduire par exemple: si une pression de terre vaut une valeur u, alors la vitesse de la vis pourra évoluer dans tel ensemble de valeurs.

Les définitions de DPC sont nombreuses [Miz87].

Par exemple, Zadeh [Zad65] introduit une manière de traduire l'implication R_a définie ci-dessous en une relation floue dans $U \times V$, A et B sont des prédicats des ensembles U et V.

La règle R_a s'énonce : si X est A alors Y est B, avec $u \in U$ et $v \in V$, U et V univers de discours de X et Y, \wedge l'opérateur "ET" booléen.

$$R_a = \int_{U \times V} 1 \wedge (1 - \mu_A(u) + \mu_B(v)) / (u, v).$$

Elle est basée sur l'implication $a \rightarrow b = 1 \wedge (1 - a + b)$, avec a et $b \in [0,1]$. En règle générale, on traduit l'implication $a \rightarrow b$ par $a \rightarrow b = a * b$, où * est un opérateur représentant une norme triangulaire, donc un opérateur "ET";

La règle R_a " si X est A alors Y est B " est traduite alors par la relation floue:

$$R_a = \int_{U \times V} \mu_A(u) * \mu_B(v). \quad (IV.1.1)$$

Les opérateurs "ET" les plus classiques sont définis par [GNK87]:

- intersection: $\min(a,b)$,
- produit algébrique $a.b$,
- $\max(0, a+b-1)$,

et leurs opérateurs "ou" duaux sont définis par les co-normes triangulaires:

- union: $\max(a,b)$,
- somme algébrique $a+b-a.b$,
- $\min(1,a+b)$,
- $\{a \text{ si } b=0, b \text{ si } a=0, 1 \text{ sinon}\}$.

Ces normes sont employées pour la conjonction en logique approximative.

Une méthode de raisonnement floue est du type suivant :

X est A \rightarrow alors Y est B
 X est très A

Conclusion : Y est très B .

Nous cherchons à pouvoir quantifier une telle assertion, et notamment à trouver un mécanisme mathématique permettant de formaliser ce type de raisonnement.

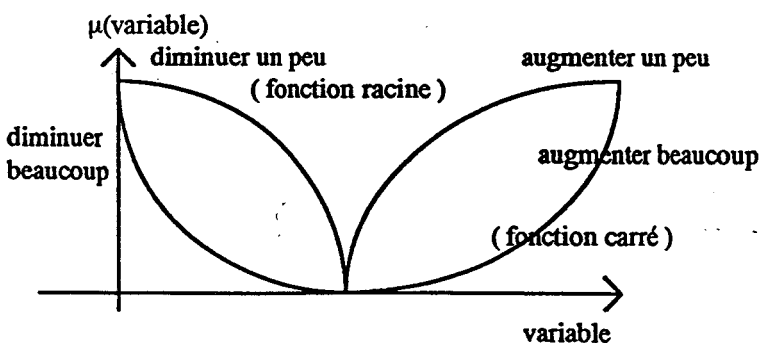
Afin de pallier le manque d'information concernant les possibilités associées aux divers cas envisageables , il est possible d'appliquer la règle simple décrite ci-après . Nous envisageons quatre classes de possibilités connaissant la possibilité μ_A relative à A , soit A , non A , très A , un peu A , auxquelles nous associons les possibilités $\mu_A, \mu_{\bar{A}}, \mu_{A^+}, \mu_{A^-}$.

Les nuances en logique floue peuvent alors s'exprimer par exemple de la façon suivante [DuP87] :

Classe	A	Très A	un peu A	Non A
Possibilité	μ_A	$\mu_{A^+} = \mu_A^2$	$\mu_{A^-} = \sqrt{\mu_A}$	$\mu_{\bar{A}} = 1 - \mu_A$

TABLE 3 : Modificateurs

On représente ci-dessous les deux modificateurs :



fig[IV.2.2] Modificateurs "un peu" et "très"

IV.3 Commande floue

IV.3.1 Généralités

Nous venons de voir la possibilité de représenter des connaissances imprécises, et d'utiliser des règles traduites mathématiquement, ainsi que la composition de ces règles de façon à pouvoir exprimer l'avis d'un expert et la commande d'une variable par une autre; il nous reste à savoir comment ordonner l'application de la logique floue pour la commande et comment traduire une mesure en variable floue et inversement.

La composition d'un contrôleur flou est montrée ci-dessous (fig[IV.3.1])[Lee90] :

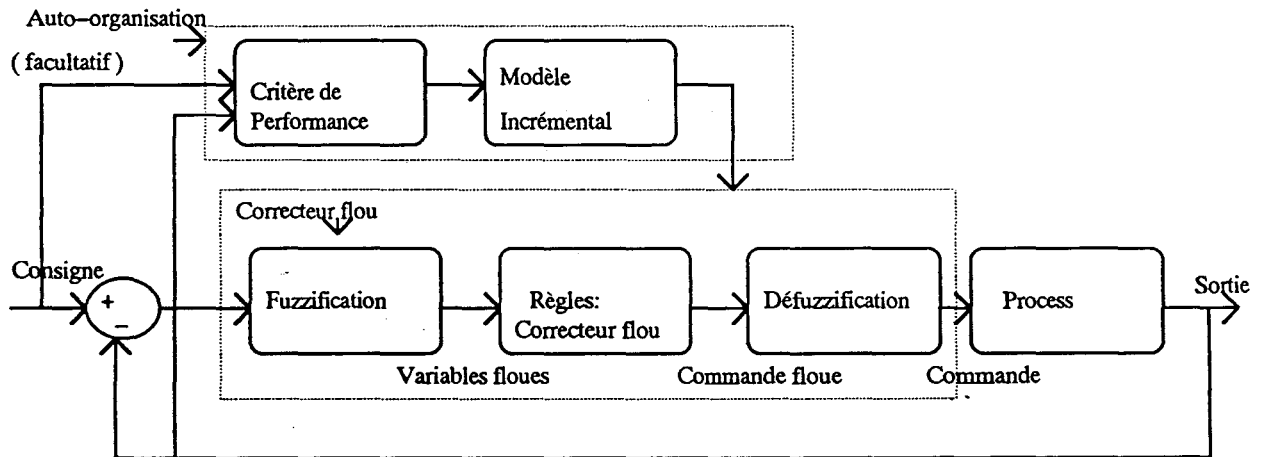


fig [IV.3.1] Schéma de principe d'un correcteur flou

Il est composé de 5 éléments majeurs:

- une base de données comprenant les définitions des ensembles flous utilisés dans la définition des règles de commande;
- une interface de fuzzification qui permet de transformer des variables précises en variables floues
- une interface d'action transformant la commande floue en commande précise, c'est-à-dire de défuzzification;
- une base de règles floues;
- un module de calcul, basé sur le type d'inférence utilisée, permettant la détermination des fonctions d'appartenance des prédicats de la commande.

Une variable, par exemple une pression, est donc rendue floue par un mécanisme permettant de lui attribuer un ou plusieurs prédicats ("élevée, basse...").

- on mesure donc les variables d'entrée;
- l'échelle des entrées est transformée en univers de discours;
- on convertit les variables en valeurs linguistiques appropriées;

Les règles faisant intervenir cette pression modifient alors par exemple la vitesse de la vis ;

- la base de règles fournit les définitions nécessaires pour définir la manipulation des données floues;
- elle caractérise la manière de commander les variables.

L'unité de détermination de la commande permet par composition de plusieurs règles et par le mécanisme d'implication de déduire la valeur floue de la vitesse de vis (baisser fortement la vitesse , par exemple, avec une fonction d'appartenance $\mu(\text{baisser vis})=0.8$) .

Elle emploie le mécanisme d'implication et le système d'inférence utilisant la base de règles.

Enfin, à partir de cette information floue, on repasse par une autre fonction d'appartenance " inverse", (défuzzification) , à une valeur numérique.

- cette fonction définit les échelles des variables de sortie ;
- elle défuzzifie ces variables, permettant de trouver une commande non floue à partir d'une variable définie par un langage flou.

Les paramètres d'implémentation sont donc:

- l'ensemble des variables d'entrée, d'état et de sortie;
- l'ensemble des règles pour la base de règles à savoir notamment la complétude de la base de faits (nombre de règles, redondance éventuelle, remplissage de l'univers de discours);
- les types de règles, source et dérivation des règles floues;
- le choix des entrées -sorties pour les règles;
- la consistance et l'interactivité des règles (stabilité du correcteur);
- les opérateurs de conjugaison, par exemple et, (" si la pression est basse ET la vitesse est haute alors... " ,etc...);
- l'ensemble des termes flous , pour les modules de fuzzification et défuzzification (par exemple élevé ,....);
- les opérateurs de défuzzification et donc les fonctions d'appartenance et leur inverse;
- les facteurs d'échelle;
- les facteurs d'amplification;
- les facteurs de quantification , pour les règles ou pour moduler l'importance des règles entre elles (une règle A n'aura pas une même importance qu'une autre règle B sur le comportement d'une variable et on ne peut leur accorder le même poids);
- les facteurs d'échantillonnage et de discrétisation : c'est à dire la période d'échantillonnage, la manière de discrétiser, etc...

En général , la commande floue a pour but de représenter des règles du type [Sug85] , [Tza90] :

" Si E est A et CE est B alors CO est C " , où

E est l'erreur relative à la variation du procédé à commander, CE est la variation de l'erreur, CO la commande, et où A, B, C sont des prédicats du type moyen, positif, très négatif, etc...

La méthode de Sugeno [Sug85] consiste à prendre la règle d'inférence suivante :

Etant donnée la règle floue " Si X est A alors Y est B ", où A et B sont des prédicats définis tels que précédemment sur des sous-ensembles flous U et V, on traduit pour un fait flou "X a une valeur u_0 " le fait flou "Y est B" par la fonction d'appartenance μ_B caractérisée par $\mu'_B(v) = \min(\mu(u_0), \mu_B(v))$, soit la fonction μ'_B suivante:

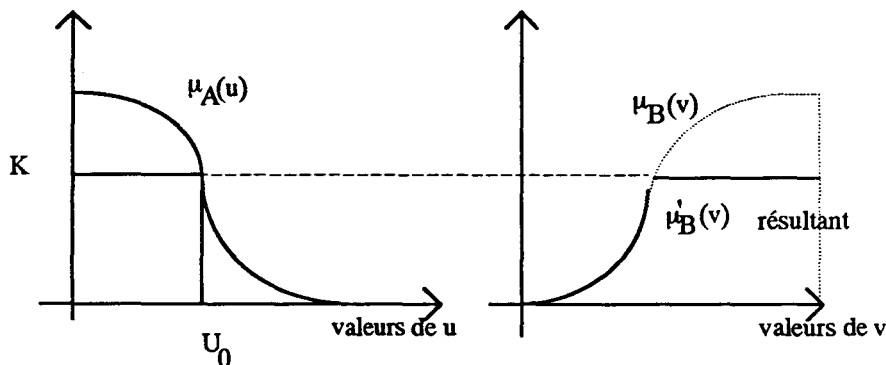


Fig [IV.3.2] Inférence floue par Sugeno

Les résultats sont donc différents de ceux obtenus par les règles d'inférence présentées plus haut.

La valeur numérique est obtenue par exemple en prenant une méthode du type barycentre c'est-à-dire que si l'on obtient par i règles des fonctions $\mu_{b_i}(v)$ on obtiendra pour la valeur de v le barycentre des aires des μ_{b_i} (sur la figure [IV.3.2]).

Nous allons maintenant traiter les différents aspects évoqués et les paramètres intervenant dans chacun de ces modules, en justifiant nos choix.

IV.3.2 Fuzzification des variables entrée/sortie

IV.3.2.1 Fonctions d'appartenance

Afin d'illustrer une présentation de la méthode , nous prendrons généralement trois prédicats (bas, élevé et moyen). (fig[IV.3.3])

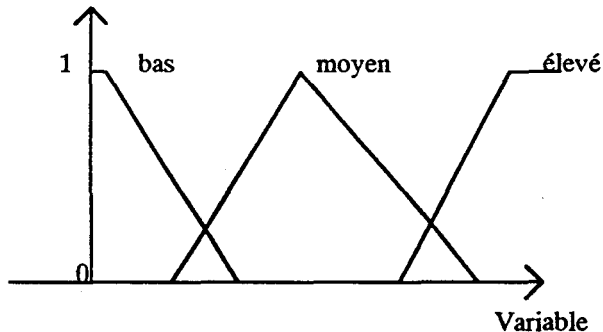


Fig [IV.3.3] Fonctions d'appartenance

Donner une signification à une valeur numérique u_0 revient à déterminer les degrés d'appartenance pour chacun des sous-ensembles flous définis sur l'univers de discours.

On obtient ainsi 3 degrés d'appartenance :

$$\begin{aligned}k_{\text{bas}} &= \mu_{\text{bas}}(u_0), \\k_{\text{moyen}} &= \mu_{\text{moyen}}(u_0), \\k_{\text{élevé}} &= \mu_{\text{élevé}}(u_0).\end{aligned}$$

On considère ces valeurs comme des coefficients reflétant le degré avec lequel u_0 reste bas, élevé, ...

On peut aussi représenter des écarts , par des prédicats tels que stable, augmente, diminue .

La forme des fonctions d'appartenance doit permettre de définir des courbes en cloche ou demi-cloche , soit dans le cas le plus général ([Bro90]) :

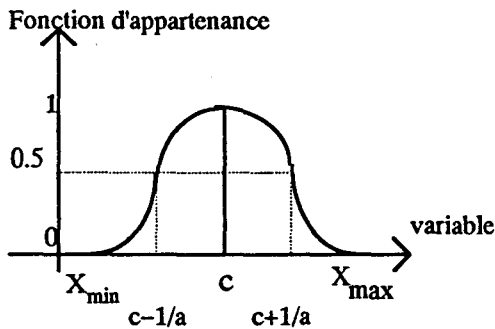


fig [IV.3.4] fonctions d'appartenance standard

, avec une fonction $\mu(x) = \frac{1}{1 + a^b \cdot (x - c)^b}$,

si c est défini tel que $\mu(c) = 1$ soit le point maximal.

$b > 3$ sert à augmenter l'intervalle de discours .

a est défini pour obtenir on ait un degré d'appartenance de 0.5 pour $x = c \pm a$.

On obtient :

$$\mu(x_{int1}) = \mu\left(c - \frac{1}{a}\right) = 0.5.$$

$$\mu(x_{int2}) = \mu\left(c + \frac{1}{a}\right) = 0.5.$$

Si $c = x_{min}$ la courbe est une demi cloche droite et si $c = x_{max}$ une demi-cloche gauche .

Cette représentation fig[IV.3.5] permet à l'utilisateur de déterminer la frontière entre bas et moyen et élevé et moyen en donnant les valeurs de x_{int1} et x_{int2} , qui reviennent à calculer un seuil .

On peut ainsi calculer les paramètres a, b, c .

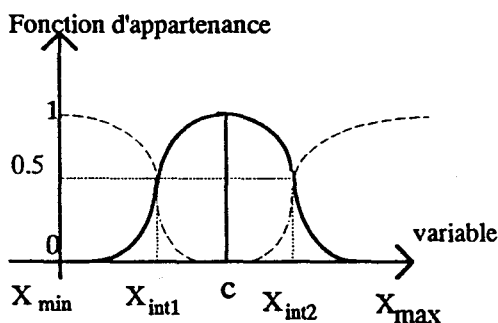


fig [IV.3.5] Détermination des fonctions d'appartenance standard

Nous nous sommes contentés au départ d'une forme trapézoïdale où la notion de surface est facile à manipuler et s'implante sur un calculateur très simplement:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq a - c \\ (x - (a - c)) / c & \text{si } a - c \leq x \leq a \\ ((b + d) - x) / d & \text{si } b \leq x \leq b + d \\ 0 & \text{si } b + d \leq x \end{cases} \quad (\text{IV.3.1})$$

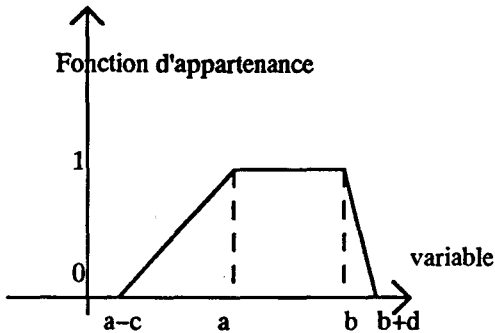


fig [IV.3.6] *Fonction trapézoïdale*

Ceci permet si $a=b$ de retrouver des formes simples en triangle .

En général [LAA91] [LiL89], la base du triangle correspond à 2 fois la déviation standard de la donnée, et le noyau de cette fonction correspond à la valeur moyenne de la donnée.

Dubois et Prade [DuP91] ont défini une transformation bijective permettant de transformer une mesure de probabilité en une mesure de possibilité en utilisant un concept de degré de nécessité.

Un critère global d'identification pourrait permettre d'évaluer la différence objet modèle; malheureusement, une telle évaluation existe surtout pour des règles et non pour la mise à l'échelle des entrées/sorties [LAA91] .

IV.3.2.2 Echantillonnage

Nous verrons que le problème d'échantillonnage des données ne se pose pas puisque nous utilisons une commande mixte. La période d'échantillonnage sera adaptée en conséquence à chaque commande.

IV.3.2.3 Mise à l'échelle et importance

Nous cherchons maintenant à mettre nos variables à l'échelle. Il existe plusieurs façons qui ne sont généralement pas simples. La première est de s'appuyer sur l'expérience et de donner des seuils à la fois réalistes vis-à-vis du processus et vis-à-vis des spécifications à obtenir. Il faut toutefois prendre en considération tous les paramètres, une déviation de 0.2 bars pour une pression de terre engendrant par exemple une variation de quelques bars pour la pression de vis, sous certaines conditions. Nous devons donc obtenir un modèle grossier ou des observations du comportement in situ. Il faut noter que notre processus étant évolutif , il se pose la question du recalibrage des valeurs: en effet ,le système est sans cesse modifié pour des raisons d'adaptation du processus à des conditions de fonctionnement différentes ou améliorées .

Par exemple , lorsqu'on rajoute des bennes en sortie de convoyeur , au lieu de sortir 15 tonnes de matériau , de remonter la benne et de la vider dans un camion ,ce qui suppose un arrêt de 10 minutes au moins, on peut avec plusieurs bennes évacuer 60 tonnes de matériau sans arrêter la machine. Ceci permet de faire tourner la machine plus longtemps, donc d'homogénéiser le marin dans la chambre. La matière devenant plus pâteuse, le fonctionnement est plus régulier et la pression est plus stable. Les paramètres de fonctionnement du marinage changent. Au démarrage du chantier , la longueur forée n'est pas suffisante, le nombre de bennes dans le puits est limité, les arrêts sont fréquents et la pression est fort instable. Lorsque l'on peut travailler plus longtemps sans arrêter, le fonctionnement devient plus régulier. De même, la décision d'utiliser des injections supplémentaires (bentonite) stabilise le marin et demande un recalibrage des données.

Le problème est donc d'être en mesure de recalibrer les entrées/sorties en fonction de l'évolution de la machine. On peut toutefois en agissant sur les coefficients des règles , modifier le comportement de la régulation sans toucher aux limites des prédicats.

Une deuxième approche peut être de recalibrer les règles par des indices de performance ou un apprentissage neuronal.

Dans notre cas, le nombre de règles est limité et bien maîtrisé. Les limites des prédicats sont simples à connaître . Par exemple , la consigne de la pression étant égale à 1.45 bars , les bornes de la fonction d'appartenance "pression moyenne" (avec $\mu=0$) sont de 0.1 bars autour de la consigne : ces valeurs sont intuitives mais se montrent optimales pour notre correcteur.

IV.2.3 Type de règles utilisées

Nous utiliserons des règles du type :

{ Si X_1 est A_1 {connecteur} Si X_2 est A_2 {connecteur} ... ALORS Y est B coeff K_y } coeff $K_{règle}$.

Nous allons expliciter ces différents coefficients et le choix de la méthode .

IV.2.3.1 Méthodes de connectivité (et , ou)

Nous explicitons le terme "connecteur".

Dans le cas où le connecteur est et , soit X est A_1 et X est A_2 , nous prendrons :

$$K_0 = \min(\mu_{A_1}(u_0), \mu_{A_2}(u_0)), \quad (IV.3.2)$$

$$\text{soit } \mu(X \text{ est } A_1 \text{ et } X \text{ est } A_2) = \min(\mu_{A_1}(u_0), \mu_{A_2}(u_0)). \quad (IV.3.3)$$

De même, si le connecteur est ou :

$$\mu(X \text{ est } A_1 \text{ ou } X \text{ est } A_2) = \max(\mu_{A_1}(u_0), \mu_{A_2}(u_0)). \quad (IV.3.4)$$

IV.2.3.2 Facteurs de quantification (coefficients de pondération des règles)

Les règles n'ont pas toutes la même importance et nous pouvons donner un facteur de pondération relativisant l'importance de ces règles . Une commande issue de la règle R sera pondérée par le coefficient K_R qui servira lors de la défuzzification.

IV.2.4 Sortie de la commande

Nous venons de voir que nous obtenons par ce type d'inférence un résultat $\mu_B(v)$ pour Y est B .

Il s'agit maintenant de savoir ce qui se passe en présence de plusieurs règles.

Nous avons les fonctions suivantes:

- si X est A_1 alors Y est B_1 soit une fonction $y=\mu'_{B_1}(v)$,
- si X est A_2 alors Y est B_2 soit une fonction $y=\mu'_{B_2}(v)$.

Nous obtenons alors $\mu'_B(v) = \max(\mu'_{B_1}(v), \mu'_{B_2}(v))$.

Nous utiliserons éventuellement une pondération des règles par :

$$\mu'_B(v) = \max(k_{R_1} \cdot \mu'_{B_1}(v), k_{R_2} \cdot \mu'_{B_2}(v)) . \quad (IV.3.5)$$

Ceci permet de prendre en compte des résultats de même grandeur.

Pour la défuzzification , nous prenons une méthode type Barycentre , soit [Sug85] :

$$v = \frac{\int v \cdot \mu'_B(v) \cdot dv}{\int \mu'_B(v) \cdot dv} , \quad (IV.3.6)$$

soit un point moyen pondéré qui permet de tenir compte globalement de la fonction d'appartenance (fig [IV.3.7]) .

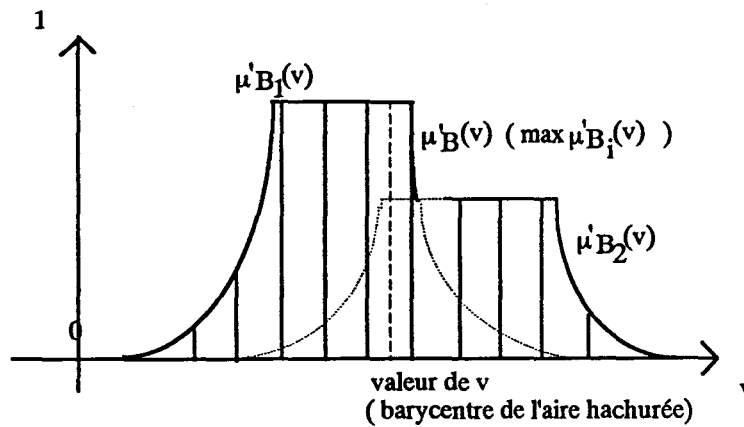


fig [IV.3.7] Défuzzification

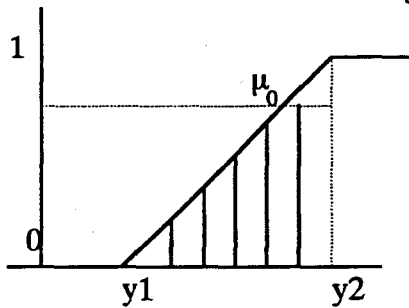


fig [IV.3.8] Défuzzification avec une fonction linéaire

La surface de l'aire hachurée vaut $(1 - \frac{\mu_0}{2}) \cdot \mu_0 \cdot (y_2 - y_1)$, (IV.3.7)

et son barycentre a pour abscisse (à partir de y_1):

$$y_g = \frac{1 - \frac{\mu_0^2}{3}}{2 - \mu_0} (y_2 - y_1) . \quad (IV.3.8)$$

IV.3.5 Tableau récapitulatif

On appelle u une valeur d'entrée définie sur U , v une valeur de sortie définie sur V .

Étapes	Résultats
Fuzzification	$k = \mu_A(u)$
Connecteurs	et: $\min(k_i)$ ou: $\max(k_i)$
Inférence	$X \text{ est } A \rightarrow Y \text{ est } B$ $\mu'_B(v) = \min(\mu_A(u), \mu_B(v))$
Défuzzification	$v = \frac{\int v \cdot \mu'_B(v) \cdot dv}{\int \mu'_B(v) \cdot dv}$

TABLE 4 : Détermination du correcteur flou

Nous remarquons l'existence de plates-formes floues, telles que celle de la société Togai , qui permet d'écrire des règles dans un univers de programmation spécifique couplé à un compilateur C [Cun91].

IV.3.6 Analyse expérimentale du système

Nous notons la nécessité de faire intervenir la limitation des actionneurs soit par une saturation sur la commande (par opérateurs max et min) soit par un temps de réponse limité.

La démarche concernant l'essai d'un correcteur flou est essentiellement empirique et les règles sont déterminées par le concepteur suivant sa connaissance du processus.

L'influence de chaque règle est déterminée de manière à pouvoir la pondérer ou l'éliminer : c'est la manière la plus simple de trouver la complétude. En fait, nous utilisons des fonctions d'appartenance qui couvrent tout le domaine des valeurs des entrées et un ensemble de règles qui utilisent tous les prédicats permettant ainsi qu'il existe μ tel que $\mu \neq 0$, donc d'avoir une complétude des règles. Le phénomène de redondance n'est pas examiné dans cette étude .

Ensuite, en fonction des résultats obtenus, nous ajustons la mise à l'échelle des variables. Il existe des méthodes (réseaux de neurones) que nous n'avons pas utilisées pour calibrer les règles.

Il se pose enfin le problème de la stabilité du correcteur. Dans [AOG89] et [OGA89] , on montre que: soit un système de la forme $\dot{x} = f(x) + b.u$, avec $f(0)=0$, le point sur un indice représentant la dérivée par rapport au temps , f étant strictement croissante soit $\dot{f}(x) > 0$ pour tout $x \neq 0$ et $\dot{f}(0) > 0$; le correcteur flou étant défini par $u = \phi(x)$, et $\phi(0) = 0$. Nous prenons $b=1$. le système est asymptotiquement stable à l'origine si :

$$\dot{\phi}(0) < -\dot{f}(0) . \tag{IV.3.9}$$

Ce résultat généralisable à un système multivariable est valable pour $f(x)$ monotone , et nous ne pourrions l'appliquer que pour certaines parties de notre système.

En système monovariable, l' indice $I = \left(-\frac{d\phi}{dt}(0) - \frac{df}{dt}(0) \right)$ donne une mesure du degré de stabilité à l'origine (si l'origine est bien le point d'équilibre) .

En pratique , les coefficients des fonctions d'appartenance des variables de sortie jouent un rôle important et la stabilité de l'ensemble de règles est souvent donnée par l'existence et la pondération de règles duales (si e grand baisser u et si e petit augmenter u par exemple) .

IV.4 Utilisation d'une méthode de régulation par compensation floue de l'erreur en boucle fermée

IV.4.1 Schéma de principe

Un correcteur purement flou présente le désavantage de devoir calibrer très précisément les règles et finit par former un ensemble fort complexe, comme un système expert, sans garantie de résultats. En particulier, un très grand nombre de règles est nécessaire. Nous allons utiliser ce correcteur selon le schéma [IV.4.1], en le couplant à une commande en boucle fermée prédéterminée :

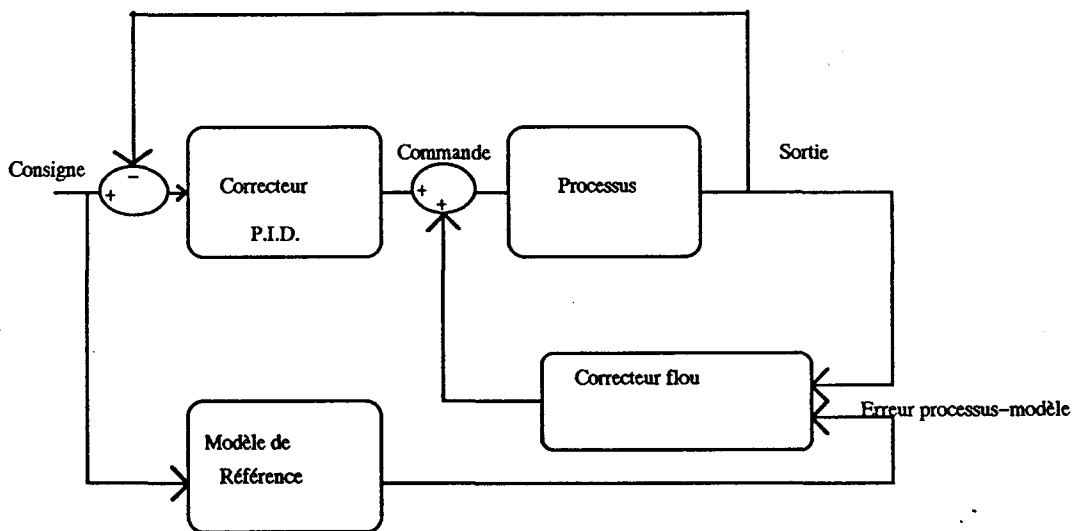


fig [IV.4.1] Schéma de principe du correcteur composite

Pour simplifier, nous utiliserons le système suivant, de manière à pouvoir simuler les résultats.

Le modèle de référence est tout simplement, entre par exemple la pression de terre et la vitesse de la vis, un deuxième ordre tout simple (coefficient d'amortissement 0,8, temps de réponse à 95% 3 secondes). Les coefficients sont choisis en fonction du temps de réponse initial et des oscillations, de manière à ce que les spécifications soient "raisonnables".

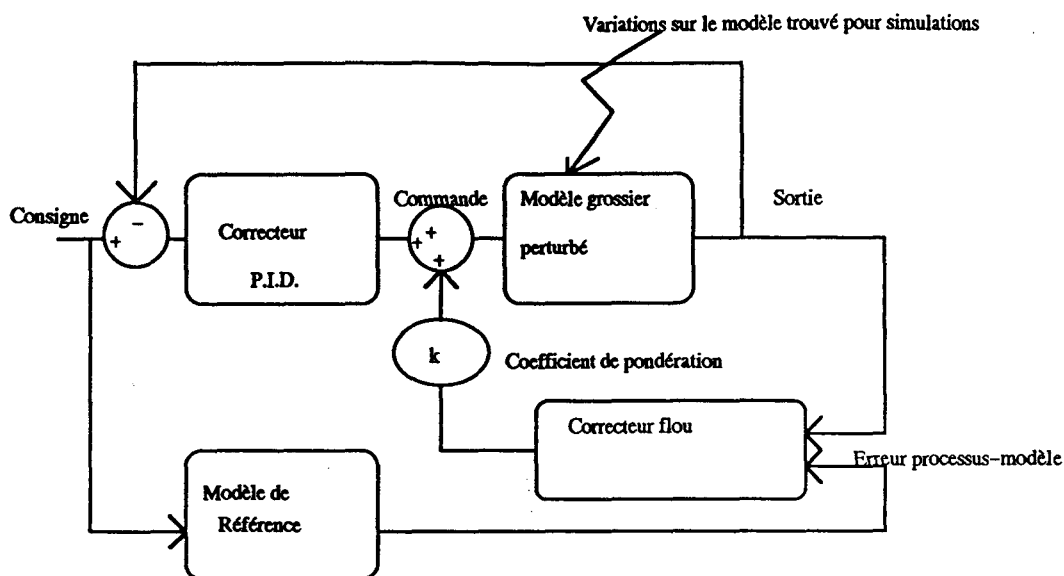


fig [IV.4.2] Schéma utilisé pour les simulations du correcteur composite

Le procédé est régulé en boucle fermée par un P.I.D. à partir d'un modèle très grossier. Un modèle de référence est donné, qui correspond au fonctionnement souhaité de la machine.

Les entrées du contrôleur flou sont les sorties du modèle et celles du modèle de référence. Les sorties du contrôleur flou sont ajoutées à la commande issue du P.I.D. .

Nous proposons un coefficient de réglage réglé normalement à 1 mais permettant d'ajuster ou de faire disparaître l'effet du correcteur flou.

IV.3.2 Remarques

Il faut signaler plusieurs aspects:

- cette commande est extrêmement robuste et le modèle peut tolérer d'énormes écarts;
- l'addition des commandes n'obéit pas au théorème de superposition puisque les variables ne sont pas calculées dans le même univers de discours ;
- l'incertitude du correcteur flou porte sur l'erreur uniquement: si l'erreur sortie-consigne après régulation P.I.D. est de 30% et que l'erreur sortie modèle du correcteur flou est de 20% ,on obtient 6% d'erreur au total !
- nous travaillons sur un système déjà régulé, même si ses performances sont médiocres, ce qui nous garantit pour un réglage correct de notre compensateur une optimisation de la commande.

Nous remarquerons que nous pourrions:

- adapter le modèle de référence;

- adapter le correcteur P.I.D en conséquence (ou à la limite nous passer d'un modèle de référence et calculer directement le correcteur P.I.D par des méthodes simples telles Ziegler-Nichols (pour plus de détails voir [Bor93])).
- adapter les règles elles- mêmes , ce que nous nous proposons de faire par gains programmés;
- nous passer par apprentissage neuronal de la conception du correcteur flou ou rendre celui-ci adaptatif.

Nous pouvons obtenir ainsi des régulateurs de plus en plus robustes, en effectuant une identification très grossière donc très rapide (basée sur l'exploitation d'une réponse indicielle par exemple) , et en améliorant le correcteur calculé par des correcteurs flous associés , afin d'augmenter les performances .

IV.5 Application au processus tunnelier

IV.5.1 Modèle utilisé

Nous pouvons décrire le processus tunnelier comme suit:
fig [IV.5.1]

$$\begin{pmatrix} C(p) \\ P(p) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & H_{12}(p) & H_{13}(p) \\ H_{21}(p) & H_{22}(p) & H_{23}(p) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{vis}(p) \\ V_a(p) \\ V_d(p) \end{pmatrix} , \quad (IV.5.1)$$

avec C est le couple du disque en T.m ,
P est la pression de terre bas chambre en bars ,
 V_{vis} est la vitesse de rotation de la vis en tr/mn ,
 V_a est la vitesse d'avance en mm/mn ,
 V_d est la vitesse du disque en tr/mn .

Nous demandons les spécifications suivantes:

- régulation la meilleure de la pression de terre;
- optimisation de la vitesse d'avance.

Les contraintes sont:

- couple inférieur à une valeur maximale;
- impossibilité de faire varier en cours d'excavation la vitesse du disque , dont la valeur est fixée en début de foration , et qui n'est pas un organe de régulation;
- limitations sur les actionneurs en constante de temps et en amplitude , notamment sur la vitesse d'avance;
- contraintes liées à l'exploitation de la machine , à savoir:
 - interdiction d'avancer sans faire tourner le disque , ni d'extraire sans avancer;
 - interdiction d'avancer trop vite;
 - interdiction de faire varier trop la pression du front;

- interdiction de faire monter trop haut les pressions du disque ou de la vis;
 - existence de modes dégradés, lors d'accidents de terrain , tels que failles , gros boulders (blocs) , ou matériaux plus durs.
- De plus certaines perturbations peuvent compliquer l'étude:

- existence de paramètres non inhérents à la régulation et influant fortement sur le comportement du tunnelier tels que :
 - adjonction de mousse ou d'un autre composant, tel que la bentonite;
 - taux de remplissage de la chambre.

L'action de ces composants, contrairement à celle du terrain, peut être connue . L'action sur la régulation résultant d'un changement de terrain n'est pas extrêmement importante, le terrain étant assez homogène et le marin dans la chambre étant de plus travaillé par la rotation de l'ensemble et les adjouvants.

Les fonctions de transfert déterminées au départ sont de la forme:

$$H_{12}(p) = \frac{k_{12}}{1 + \tau_{12} \cdot p} \quad (\text{IV.5.2})$$

$$H_{13}(p) = \frac{k_{13} \cdot \omega_{13}^2}{p^2 + 2 \cdot \omega_{13} \cdot \xi_{13} \cdot p + \omega_{13}^2} \quad (\text{IV.5.3})$$

$$H_{21}(p) = \frac{k_{21}}{(1 + \tau_{21} \cdot p) \cdot p} \quad (\text{IV.5.4})$$

$$H_{22}(p) = \frac{k_{22}}{(1 + \tau_{22} \cdot p) \cdot p} \quad (\text{IV.5.5})$$

$$H_{23}(p) = \frac{k_{23} \cdot \omega_{23}}{p^2 + \omega_{23}^2} \quad (\text{IV.5.6})$$

IV.4.2 Commande

Le problème de commande est schématiquement de limiter le couple à 600 T.m , de maximiser la vitesse d'avance et de stabiliser le front de taille . Nous choisirons une vitesse d'avance maximale à vitesse de disque donnée ce qui permet ensuite à vitesse de disque et vitesse d'avance données de stabiliser la pression par la vitesse de la vis.

Nous prendrons une période d'échantillonnage de 1 seconde pour la boucle pression du front/vitesse de la vis et une période de 10 secondes pour la boucle couple/vitesse d'avance, ce choix étant motivé par la lenteur des vérins de poussée qui ne sont pas des organes de commande aussi rapides que la vis.

Nous obtenons ainsi deux boucles avec des P.I. . Ces boucles présentent un fonctionnement à peine satisfaisant pour le type de coefficients déterminés. Il faut toutefois observer que , d'une manière physique, il est impossible de compenser les premiers dépassements en couple dus au démarrage de la machine.

Ce sont ces deux boucles qui vont être régulées par nos correcteurs flous: pour la première, il s'agit de minimiser le couple par optimisation de la vitesse d'avance, pour la seconde, il s'agit de stabiliser la pression du front par la vitesse de la vis, la vitesse du disque étant fixe.

Sur chaque boucle , une compensation de l'erreur en boucle fermée est effectuée par un correcteur flou , ce qui nous donne deux commandes par compensation de l'erreur en boucle fermée.

Les règles déterminées pour le compensateur flou sont dictées par l'observation et le questionnement des pilotes du tunnelier .

Elles sont au nombre de 9 ce qui est fort limité pour des prédicats : négatif , zéro , positif , soit :

- Si l'écart modèle–pression est négatif , baisser la vitesse de la vis ,
- Si l'écart modèle–pression est positif , augmenter la vitesse de la vis ,
- Si l'écart modèle–pression est zéro et augmente , augmenter la vitesse de la vis ,
- Si l'écart modèle–pression est zéro et diminue , diminuer la vitesse de la vis ,
- Si l'écart modèle–pression est zéro , ne rien faire ,
- Si le couple est inférieur à la consigne et (la pression est moyenne ou le couple a tendance à diminuer) , augmenter la vitesse d'avance ,
- Si le couple est supérieur à la consigne , diminuer la vitesse d'avance ,
- Si le couple est égal à la consigne , ne rien faire .

On peut imaginer fonctionner en mode dégradé dans la mesure où les sécurités du programme n'interviennent pas : par exemple pour un petit trou (faille peu importante) , on va avoir chute brutale de pression, et nous travaillerons dans un mode de défaut . Il faut alors avancer lentement pour éviter un fontis. La règle s'écrit alors:

Si l'écart modèle–pression est très négatif et le couple est très bas, baisser la vitesse de la vis et baisser la vitesse d'avance .
qui vient se rajouter à notre panel de règles.

Choix de paramètres et de fonctions d'appartenance en vue de déterminer un correcteur flou associé à la commande composite floue–conventionnelle

Les fonctions d'appartenance ont été déterminées à partir de l'expérience , d'essais et observations réalisés sur chantier.

A titre d'exemple nous fournissons des fonctions d'appartenance pour les variables pression du front de taille , couple , variation de la pression , vitesse de la vis.

On obtient les résultats suivants (fig IV.5.1 à IV.5.4) :

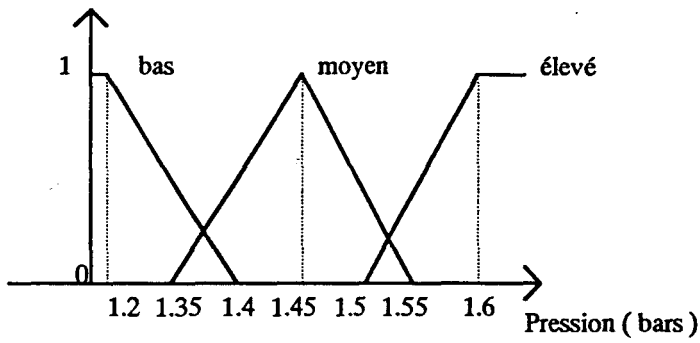


Fig [IV.5.1] Fonctions d'appartenance de la pression du front de taille

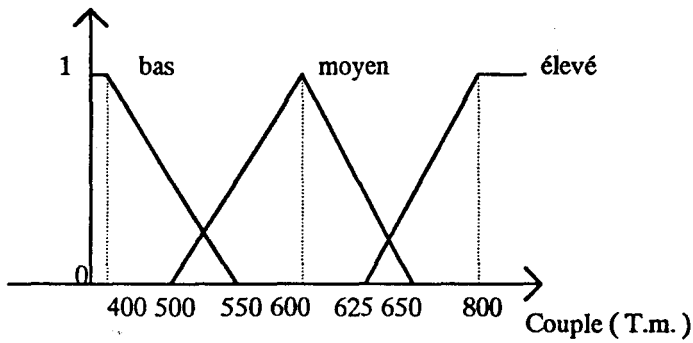


Fig [IV.5.2] Fonctions d'appartenance du couple du disque

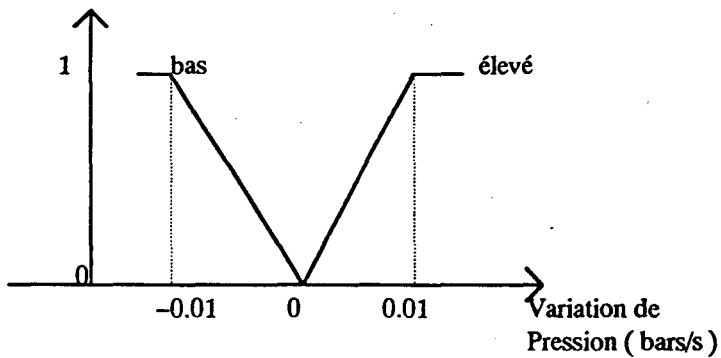


Fig [IV.5.3] Fonctions d'appartenance de la variation de la pression du front de taille

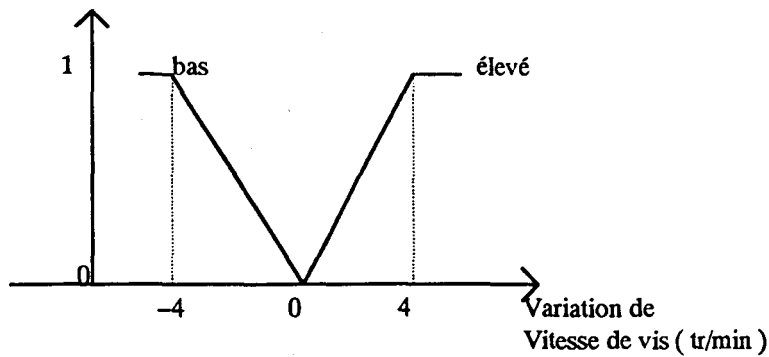


Fig [IV.5.1] Fonctions d'appartenance de l'variation de la vitesse de la vis

Il en est de même pour le couple et la vitesse d'avance . Le plus difficile étant de déterminer les valeurs des commandes à mettre en oeuvre . La vitesse d'avance n'est commandée que toutes les dix secondes .

Le P.I.D. est déterminé d'après le modèle . La période d'échantillonnage est celle normalement utilisée pour la commande conventionnelle .

Nous rappelons que le type de correcteur flou utilisé est celui défini par la fig [IV.2.1] et le tableau du paragraphe [IV.2.5] .

L'implémentation d'un tel correcteur revient à la programmation des divers modules du correcteur flou (par l'utilisation notamment des fonctions min et max) , d'un correcteur P.I.D. et d'un module d'interconnexion (ici , une addition) .

Prenons d'abord la pression du front de taille : un pilote averti reprendra , lors d'une montée en pression , la régulation de la vis en mode manuel de manière à faire retomber cette pression : nous en déduisons qu'à partir de +0.15 bars au dessus de la consigne , la pression est toujours considérée comme élevée , ce qui nous permet de qualifier la limite haute de notre fonction "élevée " . Il en est de même pour une pression de 1,2 bars jugée trop faible par un opérateur .

A plus ou moins 0,05 bars , la valeur de la pression de front de taille ne rentre plus dans les spécifications des géotechniciens et n'est plus considérée comme satisfaisante , mais comme trop haute ou trop basse , ce qui nous donne les valeurs basses de nos fonctions d'appartenances . Enfin , un pilote se satisfera amplement d'une régulation à ± 0.1 bars : la pression est , dans ces limites , considérée comme moyenne .

Le fonctionnement est exactement le même pour le couple du disque , où l'opérateur peut arrêter l'excavation pour un couple supérieur à 650–700 T.m . De la même manière ,il poussera toujours la machine de manière à ce que le couple garde une valeur entre 550 et 620 T.m . Ceci nous permet de connaître les fonctions d'appartenance du couple .

Pour la variation de la pression du front de taille , le problème semble plus difficile , mais là , de la même manière , pour une montée de 0.2 bars , il suffit de décompter le temps de montée et d'observer les réactions du personnel pour trouver rapidement les valeurs adéquates pour les fonctions d'appartenance . Pour augmenter la vitesse de vis , il suffit de la même manière de mesurer l'échelon mis en place par l'opérateur lors du rattrapage d'une perturbation importante , et d'étudier ensuite des relevés pour avoir une estimation plus fine .

Problèmes inhérents à la structure du système

Plusieurs problèmes sont venus se présenter avant la mise en route d'un tel correcteur:

- la détermination des paramètres optimaux et le gain du correcteur flou: ce problème a été rapidement résolu, les paramètres du correcteur donnant de bons résultats pour une fourchette de réglages assez étendue.

- la saturation des actionneurs que nous avons introduite: le problème se pose particulièrement dans le cas d'une saturation haute où le correcteur P.I.D. tente de rattraper la consigne (démarrage) mais où certaines règles peuvent venir au contraire faire baisser la commande : nous avons prescrit pour une valeur haute du P.I.D. en cas de rattrapage de consigne , un gel des règles incriminées. Le comportement en cas de saturation est très différent de celui observé précédemment.

- l'annulation de l'erreur en régime permanent: notre correcteur ne possédait pas d'intégrateur , et , bien que fortement stabilisateur , possède une erreur résiduelle non nulle : dans le cas où l'erreur est faible, nous introduisons un terme intégrateurflou!

Nous remarquons , comme il a été évoqué plus tôt, l'importance du choix interactif des règles nécessaire à la stabilité de la commande. C'est le point le plus délicat de l'implémentation . Notre commande floue se comporte alors comme un P.I.D. non linéaire.

- l'existence de fonctionnements très différents, en fonction du taux de remplissage ou de la mousse : nous pourrions rajouter des règles à notre correcteur flou . Toutefois, l'importance de ces perturbations n'étant pas quantifiable par des capteurs , nous préférons commander par une méthode de gains programmés sur les coefficients P.I.D. . Par exemple , pour le taux de remplissage de la chambre , nous divisons le fonctionnement en 3 zones: chambre pleine, demi-pleine et presque vide et nous ajustons les coefficients P.I.D. si besoin est , en début d'excavation.

Ces aménagements nous montrent que la commande , aussi performante soit elle , doit absolument tenir compte du processus et qu'il n'existe pas de solution miracle capable de traiter n'importe quel problème de commande.

IV.4.3 Résultats

Compte- tenu de la complexité du système et de l'importance des perturbations extérieures (vitesse du disque) , les résultats obtenus par notre correcteur améliorent considérablement le correcteur P.I.D..

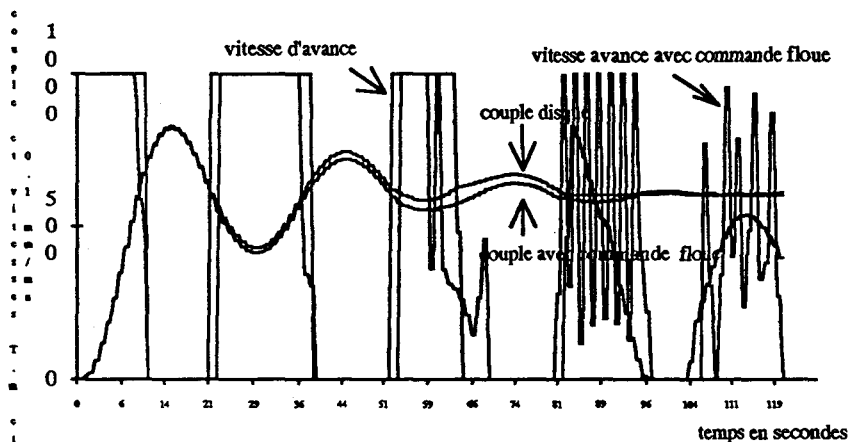
Nous remarquons en particulier pour un démarrage que les résultats en pression restent acceptables même si l'on fait varier des coefficients (gains) de plus du double!

La facilité d'implémentation rend donc cette méthode séduisante.

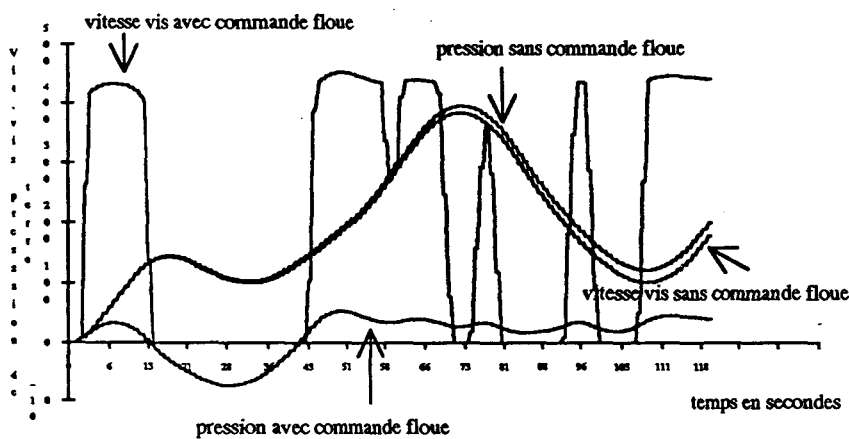
Le couplage avec une méthode adaptative permettrait de sélectionner les règles les plus intéressantes et d'améliorer le modèle, la commande et le correcteur flou. Le plus difficile est l'écriture des règles qui nécessite un minimum de connaissance du procédé.

Exemples de résultats

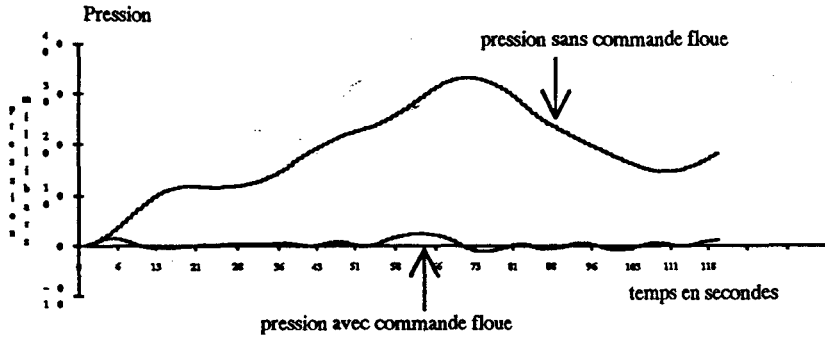
Comparaison de régulation du couple système avec et sans compensation floue



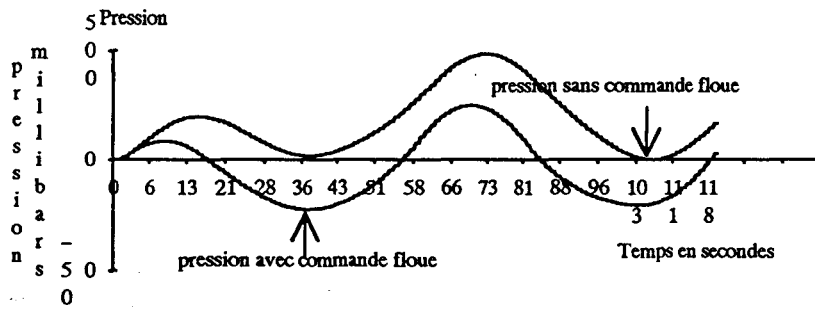
Comparaison de régulation de la pression système avec et sans compensation floue



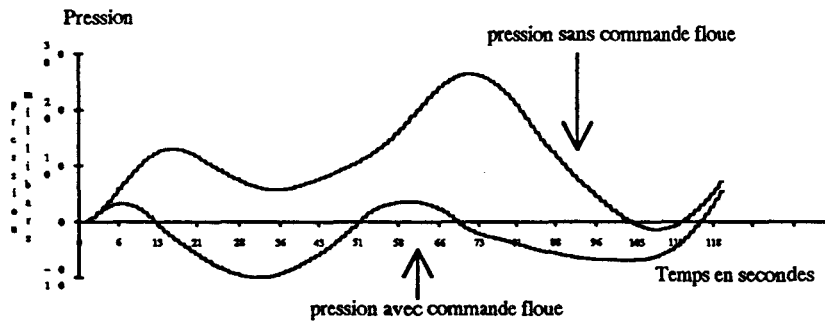
Comparaison de régulation de la pression système avec et sans compensation floue avec gain d'oscillation vis multiplié par 2



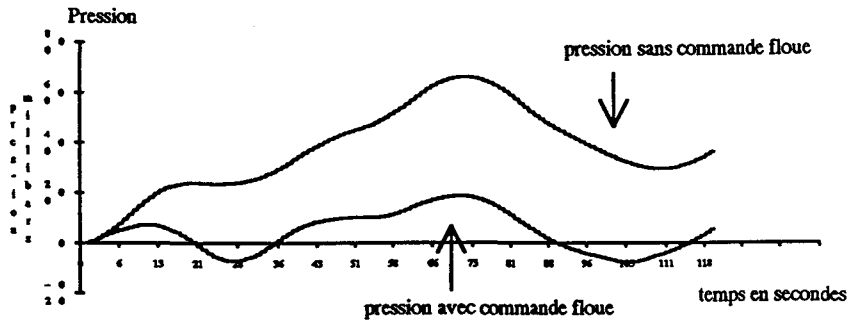
Comparaison de régulation de la pression système avec et sans compensation floue avec gain d'oscillation disque multiplié par 2



Comparaison de régulation de la pression système avec et sans compensation floue avec constante de temps vitesse d'avance multipliée par 2



Comparaison de régulation de la pression système avec et sans compensation floue avec gain vitesse d'avance multiplié par 2



Ces résultats sont obtenus par simulation ; un correcteur peut être aisément implémenté sur une plate-forme telle que celle de Togai Inc. D'autres résultats seront développés en annexe.

On peut remarquer sur ces courbes qu'un P.I.D. mal réglé n'apporte jamais une solution satisfaisante, et, en pratique, les reprises en mode manuel sont nombreuses : on notera le bon comportement du correcteur flou qui non seulement permet l'accroissement des performances mais surtout permet de garder des performances minimales lorsque le correcteur P.I.D. n'est plus adapté. Dans un fonctionnement normal, le Correcteur Composite est bien sûr bien meilleur. Il reste toutefois des oscillations résiduelles difficilement contournables (dues à la rotation du disque).

Conclusion

La commande composite floue-conventionnelle est d'un intérêt tout particulier pour la commande de systèmes difficilement modélisables. Un complément en commande floue permet de robustifier une commande traditionnelle. Le phénomène est d'autant plus intéressant et probant que l'écart entre le processus et le modèle est important.

Pour la régulation de la pression du front de taille, la simulation de divers types de perturbations a donné des résultats prometteurs ; il serait toutefois intéressant de justifier les résultats par des essais sur site.

CONCLUSION

L'identification réalisée sur le broyeur montre l'influence des retards qui existent souvent dans le cas de processus réels et qui sont même dans certains cas très importants. Ce genre de phénomène est souvent peu étudié et conduit à des difficultés sérieuses lors de la mise en place d'un régulateur .

Il apparaît nécessaire de pouvoir prédire le comportement du système sur un horizon supérieur à ce retard pour pouvoir compenser son effet . La commande prédictive s'avère dans ce sens particulièrement bien adaptée à la commande d'un tel système.

Dans le cas du tunnelier , nous avons affaire à un système complexe , non stationnaire et a fortiori difficile à automatiser . Une première approche consiste à recalculer fréquemment les paramètres de commande. La régulation actuelle est basée sur la mise en oeuvre d'une action proportionnelle et intégrale . Afin d'accroître les performances du processus malgré les diverses perturbations liées notamment à l'hétérogénéité des sols , nous avons proposé l'introduction d'un correcteur flou pour corriger l'erreur en boucle fermée. Ce système est appelé Commande composite floue-conventionnelle (Composite Fuzzy-Conventional Control) , c'est-à-dire que le processus est régulé avec une commande de nature quelconque recalculée par un correcteur flou, pouvant agir par exemple sur l'écart mesure-consigne .

L'intérêt d'un tel système est pour un cas réel la simplicité d'implémentation, puisque nous n'utilisons que quelques règles dérivées de l'observation et du bon sens , les paramètres des fonctions d'appartenance étant trouvés par la connaissance du procédé (et se révélant d'ailleurs optimaux) . Le plus difficile est de connaître le poids à accorder au correcteur flou , en tenant compte des problèmes de saturation des actionneurs. Nous introduisons de plus dans le correcteur flou un terme intégral qui nous permet d'obtenir une erreur nulle en régime permanent .

Les développements futurs de ce type de correcteur sont importants:

- l'ajustement automatique des coefficients des fonctions d'appartenance et l'optimisation du panel de règles par exemple par apprentissage neuronal;
- la possibilité d'auto-adaptation pouvant corriger en temps réel les paramètres du correcteur flou , les paramètres du modèle et ceux du correcteur P.I.D. , permettant d'optimiser le fonctionnement au cours du temps.

Cette commande n'a pu être appliquée , faute de temps , sur le processus réel . Il serait intéressant que cette approche particulièrement séduisante par sa robustesse et ses possibilités (peu de commandes sont capables de traiter un système aussi complexe que celui étudié) puisse être envisagée en milieu industriel.

Une commande est toujours limitée par un domaine d'application. Le réglage des paramètres dépend fortement des caractéristiques du procédé à laquelle elle est appliquée . Un des grands intérêts d'un travail pratique est la justification de commandes .

Bibliographie

- [AbE] S. ABU EL ATA , J.L. ESTIVAL Predictive Functional Control Technique , C.I.M.-Europe Workshop on Computer Integrated Design of Controlled Industrial Systems , Paris 1990 , S.G. Tzafestas & J. Richalet eds. , pp 158-162
- [Ada88] ADAPTECH Manuel du progiciel Expert-AD , 1988
- [AnK89] S. ANGLARET S. KAZMIERCZAK Technologie Génie Chimique , C.R.D.P. Amiens, 1989
- [AHP92] K.J. ÅSTRÖM, C.C. HANG, P. PERSSON , W.K. HO Towards Intelligent P.I.D. Control , Automatica , vol 28 , 1992 , pp 1-9
- [AOG89] J. ARACIL , A. OLLERO , A. GARCIA-CEREZO Stability Indices for the Global Analysis of Expert Control Systems , IEEE Trans. Syst. , Man , Cyb. , vol 19 , n°5 , 1989
- [Bar82] J.P. BARBIER Quelques réflexions concernant l'automatisation des processus en cimenterie, Cim. Bét.PI. Chaux , N°736, 1982
- [Bar89] B. BARMISH-ROSS A Generalization of Kharitonov's Four-Polynomial Concept for Robust Stability Problems with Linearly Dependent Coefficient Perturbations , IEEE T-AC , vol 34-2 , 1989 , pp 157-165
- [BGG91] J.R. BENITEZ ROBREDO , S. GONZALEZ DIEZ, C. GORZO CARRENO, Optimisacion SCAP (Sistema de Control Adaptato-Predictivo) de molinos de cemento , Cemento Hormigon , 1991 , pp 105-116
- [Bor91] P. BORNE , G. DAUPHIN-TANGUY , J.P. RICHARD , F. ROTELLA , I. ZAMBETTAKIS Commande et optimisation des processus , Technip , 1991.
- [Bor92a] P. BORNE , G.DAUPHIN-TANGUY , J.P. RICHARD , F. ROTELLA , I. ZAMBETTAKIS Modélisation et commande des processus t 1 et 2 , Technip , 1992
- [Bor92b] P. BORNE Innovative Approaches to Robust Systems , Proc. IEEE-SMC Conference , pp iii-viii , Chicago 1992
- [Bor93] P. BORNE , G. DAUPHIN-TANGUY , J.P. RICHARD , F. ROTELLA , I. ZAMBETTAKIS Analyse et régulation des processus industriels , Technip 1993
tome 1: régulation continue
tome 2: régulation numérique
- [BoS76] U. BORISSON , R. SYDING Self Tuning Control of An Ore Crusher , Lund Institute of Technology, 1976
- [BoS87] N.K. BOSE , Y.Q. SHI A Simple Proof of Kharitonov's Generalized Stability Criterion ,IEEE Trans.-CAS-34, 1987 , pp 1233-1237
- [Bro90] O. BROBOWICZ La représentation et l'utilisation de connaissances imprécises pour l'aide à la conduite de procédés , Thèse Université de Franche-Comté , 1990
- [CMT87] D.W. CLARKE, C. MOHTADI, P.S. TUFFS , Generalized Predictive Control Automatica , vol 23-2 , pp 137-160 , 1987
Part I: the Basic Algorithm
Part II , Extensions and Interpretations
- [Cor90] A. CORDONNIER Compte-rendu des essais de performance de la presse à Cruas , rapport interne FCB , 1990

- [Cun91] G. CUNNINGHAM Integrating Fuzzy Logic Technology into Control Systems , Togai Infralogic Inc. , Conference AIAA , 1991
- [Die92] J.Y. DIEULOT Rapport sur l'étude conduite de broyeur , rapport interne FCB , 1992
- [DiP92] J.Y. DIEULOT, P. PIHEN Rapport de la campagne d'identification du broyeur BK2 de Montalieu , rapport interne FCB , 1992
- [DDB93] J.Y. DIEULOT , L. DUBOIS , P. BORNE Composite Fuzzy-Conventional Control , Proc. IEEE Congress on Syst. Man Cyb. , Le Touquet , 1993 (to be published)
- [DoS78] J.C. DOYLE , G. STEIN Multivariable Feed-Back Design:Concepts for A Classical/Modern Synthesis , IEEE Trans.Auto.control , AC-26 1978-1 , pp 4-16
- [DuH86] Y. DUBE , D. HODOUIN Design of An Adaptive Filter for A Laboratory Grinding Circuit , Yoshitani , 1986 , pp 136-141
- [Dub91] D. DUBOIS Ensembles flous et règles floues pour la commande , Journée nationale Commande floue: Théorie , méthodologie, applications , 1991 , ed . L.A.A.S. C.N.R.S.
- [DuP87] D.DUBOIS , H.PRADE Fuzzy Algebra , Systems and Control Encyclopedia , Pergamon Press , 1987 , pp 1811-1817
- [DuP91] D. DUBOIS , H. PRADE Basic Issues on Fuzzy Rules and their Application to Fuzzy Control, Journée nationale Commande floue: Théorie , méthodologie, applications ,1991 , ed . L.A.A.S. C.N.R.S.
- [DuL83] L. DUGARD , I.D. LANDAU Recursive Output Error Algorithms , Automatica , vol 16 , 1983 pp 443-462
- [FCB82] FCB Directives Techniques BADOOSH Broyage cru P2 , rapport interne, 1982
- [FSC89] G. FLAMENT , V. SAINT-ETIENNE , A. CORDONNIER , P. TETE Modélisation d'ateliers et de la broyabilité des matériaux en cimenterie , Journées AFME ,1989
- [GNK87] M.M. GUPTA, P.N. NIKIFORUK , J.B. KISZKA Fuzzy Identification of Systems , Systems and Control Encyclopedia , Pergamon Press , 1987 , pp1805-1806
- [GNK87] M.M. GUPTA , P.N. NIKIFORUK , J.B. KISZKA Fuzzy Membership Evaluation , Systems and Control Encyclopedia , Pergamon Press, 1987 , pp1823-1826
- [Has83] HASLER Frères S.A. Régulation d'un broyeur à ciment à l'aide de deux boucles de réglage , Cim.Bét.Pl.Chaux N° 740 , 1983 , pp 1-6
- [Kaw87] KAWASAKI HEAVY INDUSTRIES Développement d'un système de commande et d'exploitation du tunnelier assisté par Personnel Computer , rapport Kawasaki , 1987
- [Kha78] V.L. KHARITONOV Asymptotic Stability of An Equilibrium Position of A Family of Systems of Linear Differential Equations , Differentialny Uravneniya , vol 14 , n°11 , 1978
- [KIS80] H. KURZ , R. ISERMANN , R. SCHUMANN Experimental Comparison and Application of Various Parameter-Adaptive Control Algorithms , Automatica , vol 16 , 1981 , pp 117-133
- [LaD86] I.D. LANDAU L. DUGARD Commande adaptative aspects pratiques et théoriques , Masson ,1986
- [Lan79] I.D. LANDAU Adaptive Control: the Model Reference Approach , Marcel Dekker , 1979
- [Lan86] I.D. LANDAU Commande adaptative: un tour guidé in Commande adaptative aspects pratiques et théoriques , Masson 1986 , pp 1-81

- [Lan88] I.D. LANDAU Identification et commande des systèmes , Hermès , 1988
- [Lar91] Ph. de LARMINAT La commande robuste : un tour d'horizon APII vol 25-3 , 1991
- [LaT76] Ph. de LARMINAT , Y. THOMAS Automatique et systèmes linéaires: tome 2: Identification , Dunod , 1976
- [LaT77] Ph. de LARMINAT , Y. THOMAS Automatique et systèmes linéaires: tome 3: Commande , Dunod , 1977
- [LAA91] H. LEVENT AKIN , V. ALTIN Rule-Based Fuzzy Logic Controller for a PWR-Type Nuclear Plant , IEEE T- Nuclear Science , 1991 , pp 883-890
- [Lee90] C.C. LEE Fuzzy Logic in Control Systems Fuzzy logic Controller part I &II pp 404-35 IEEE T-SMC , 1990
- [LiL89] Y. F.LI , C.C. LAU Developpement of Fuzzy Algorithms for Servo Systems , IEEE Control System Magazine , 1989 , pp 65-72
- [Lju87] L. LJUNG System Identification :Theory for the User , Prentice Hall , 1987
- [LjS83] L. LJUNG , T. SODERSTRÖM Theory and Practice of Recursive Identification , MIT Press ,1983
- [Maa90] H. MAA Modélisation et identification d'un atelier de broyage en cimenterie, DEA , Université de Lille , 1990
- [MLC91] C. MAYRARGUES , G. LANGLOIS , A. CORDONNIER , P. LAGACHE , G. MARCHAL Mise en place d'une presse à rouleaux à l'usine de Cruas des Ciments Français , Ciments , Bétons, Plâtres , Chaux n° 791 , Avril 1991 , pp 221-224
- [Miz87] M. MIZUMOTO Fuzzy Reasoning Methods , Systems and Control Encyclopedia , Pergamon Press, 1987 , pp1847-1852
- [MoZ89] M. MORARI , E. ZAFIRIOU Robust Process Control , Prentice-Hall ,1989
- [NaM87] K.NAJIM , G. MURATET Optimisation et commande en génie des procédés , Masson , 1987
- [NiY86] A. NIEMI , R. YLINEN Modelling of Grinding Circuits for Control , Yoshitani , 1986 , pp 142-147
- [Obr89] C. OBRY Modélisation du broyage et formulation des fonctions de broyage , DEA Université de Lille , 1989
- [OGA91] A. OLLERO , A. GARCIA-CEREZO , J. ARACIL Design of Rule-Based Expert Controller , Journée nationale Commande floue: Théorie , méthodologie, applications , 1991 , ed . L.A.A.S. C.N.R.S.
- [OrP86] R. ORTEGA , P. PRALY Robustesse des algorithmes de commande adaptative , in Commande adaptative : aspects pratiques et théoriques , Masson 1986 , pp 307-375
- [Oss90a] F. OSSELIN Contribution à l'étude et à la réalisation du système de commande d'un atelier de broyage clinker en cimenterie , DEA Université de Lille , 1990
- [Oss90b] F.OSSELIN Compte-rendu de l'étude CAO automatique , rapport interne FCB ,1990
- [Ous86] A.OUSTALOUP Systèmes linéaires d'ordre fractionnaire , Masson , 1986
- [Ous91] A. OUSTALOUP La commande CRONE (Commande Robuste d'Ordre Non Entier) , Hermès ,1991

- [RaR82] J.RAGOT, P.ROESCH Exercices et problèmes d'automatique , Masson 1982
- [RaH83] K. RAMAJANI, J.A. HERBST DYNAMILL , A Program of Dynamic Simulation of Grinding Circuits , University of Utah , 1983
- [Ric90] J. RICHALET Model Based Predictive Control in the Context of Integrated Design , C.I.M.-Europe Workshop on Computer Integrated Design of Controlled Industrial Systems , Paris 1990 , S.G. Tzafestas & J. Richalet eds. , pp 3-34
- [Ric91] J. RICHALET Pratique de l'identification , Hermès , 1991
- [Sat92] L.SATO et al. Projet EOLE méthodes de confinement , Rapport SATO et associés , 1992
- [Ser90] J. SERGEANT Rapport FCB stage d'initiation relatif à la conduite d'un bouclier à pression de terre effectué au Japon , rapport interne FCB , 1990
- [SIB81] P. SLEGTEN, J.M. BRISBOIS Le broyage à boulets à l'échelle pilote , Cim. , Bét. , Pl. , Chaux , N°731 , 1981 , pp 219-224
- [Sin87] M.G. SINGH Systems and Control Encyclopedia , 8 volumes , Pergamon Press , 1987
- [StA87] G. STEIN , M. ATHANS The LQG/LTR Procedure for Multivariable Feed-Back Control Design , IEEE Trans.Auto.Control , AC-32 , 1987 , pp 105-114
- [Sug85] M. SUGENO An introductory Survey to Fuzzy Control , Information Science , n° 36 pp 59-83 , 1985
- [Top88] TOPTOOLS S.A. Contrôle-commande INDUSTAR Toptools : manuel, Toptools - Ciments Français, 1988
- [TTS92] Y. TAKATSU , H. TAKEDA , A. SUGIYAMA On A Common Fuzzy Control System for the Micro-Tunnelling-Introduction of Control Configured Construction Machine , No Trenches In Town , Ed. Henry & Mermet , Balkema 1992
- [Tza90] S.G. TZAFESTAS Fuzzy Expert Control, Recent Results with Application to Robotics Systems , Conférence Ecole Centrale de Lille , 1990
- [TzR90] S. TZAFESTAS , J. RICHALET C.I.M Europe Workshop on Computer Integrated Design of Controlled Industrial Systems , Pergamon Press , 1990
- [Zad65] L.A.ZADEH Fuzzy Sets , Infor.Cont , vol 8 , pp 338-353 , 1965
- [ZhK87] K. ZHOU , P.P. KARKONEGAR Stability Robustness Bounds for Linear State-Space Models With Structured Uncertainty , IEEE T-A.C. , vol AC-32 n°7, 1987 , pp 621-623

