

21/95
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التربية الوطنية
MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
BIBLIOTHEQUE - المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

*COMMANDE EXTREMALE
D'UN MOTEUR A ALLUMAGE
COMMANDE D'AUTOMOBILE*

Proposé par :

Mr R. ILLOUL

Etudié par :

Mr Samir LADACI

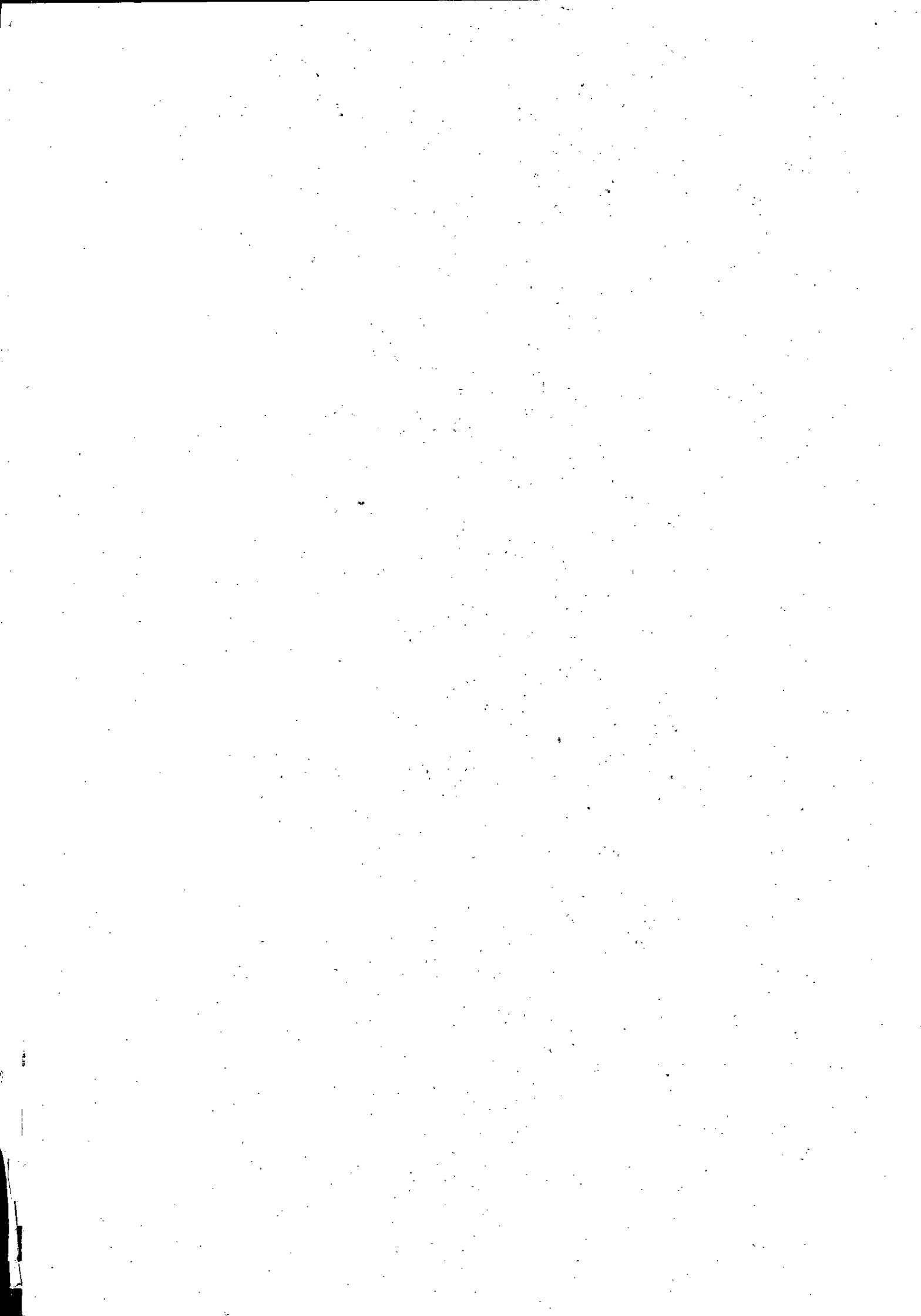
Dirigé par :

Mr R. ILLOUL

PROMOTION

JUIN 1995

E. N. P 10, Avenue Hassen Badi - EL-HARRACH - ALGER



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التربية الوطنية

MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

*COMMANDE EXTREMALE
D'UN MOTEUR A ALLUMAGE
COMMANDE D'AUTOMOBILE*

Proposé par :

Mr R.ILLOUL

Etudié par :

Mr Samir LADACI

Dirigé par :

Mr R.ILLOUL

PROMOTION

JUIN 1995

E. N. P 10, Avenue Hassen Badi - EL-HARRACH - ALGER

COMMANDE EXTREMALE D'UN MOTEUR A ALLUMAGE COMMANDE D' AUTOMOBILE

Abstract : This work is concerned with the EXTERNAL CONTROL and its application for the Torq optimization in an internal combustion engine with a simultaneous action on the ignition advance and the Air/Fuel ratio.

The first part presents the External control theory, wich allows on-line optimization of a non linear process with at least one extremum, even when the process model is not known exactly. A second part is concerned with the explosion engine modelization and the form of its Torq/advance ignition and Torq/(Air/Fuel) ratio characteristics.

In a third time, the gradient method is applicated tothe engine. It begins with the process identification and then the on-line optimization. The extremum is reached and can be followed if it changes. This control low has been tested by means of simulation.

Keywords : Extremal Control, Internal combuton engine, Air/Fuel ratio, Ignition advance, GRADIENT METHOD, Identificaton, optimization.

Résumé : Ce travail concerne la commande extrémale et son application à l'optimisation du couple moteur dans un moteur à combustion interne par une action simultanée sur l'avance à l'allumage et la richesse de l'essence.

La première partie présente la commande extrémale, qui permet une optimisation on-line des processus non-linéaires ayant un extrémum au moins, sans nécessiter une connaissance exacte du système à commander.

Une deuxième partie concerne la modéliation du moteur à explosion et la forme de ses caractéristiques couple/avance à l'allumage et couple/richesse.

Dans un troisième temps, on applique la méthode du gradient au moteur. Elle commence par l'identification du système dynamique puis son optimisation en temps réel. L'extrémum est atteint et peut être poursuivi s'il variait. Cette loi de commande a été testée en simulation.

Mots clés : Commande extrémale, Moteur à allumage commandé d'automobile, Avance à l'allumage Richesse, Méthode du gradient, Identification, Optimisation.

ملخص: هذا العمل يخص التحكم التطرفي و تطبيقه في تحسين مستوى عزم القوة في المحرك سيارة بإدارة النسبة بين البنزين و الهواء و درجة التقدم على الإشعال.

القسم الأول يقدم نظرية التحكم التطرفي التي تحول تحسين مستمر لمردود نظم غير خطي ذي نقطة متطرفة على الأول دون أن يستوجب معرفة دقيقة بالنظام المعالج.

القسم الثاني يدرس خصائص نموذج المحرك الانفجاري و شكل العزم/نسبة البنزين والعزم/التقدم على الإشعال. في الأخير نطبق طريقة التدرج على المحرك و هي تبدأ بتشخيص النظام الديناميكي ثم تحسينه باستمرار. النقطة التطرفية تلحق ثم يمكن اتباعها إذا ما تغيرت. هذه الطريقة تم تجريبها بالمحاكاة.

كلمات أساسية : تحكم تطرفي، محرك انفجاري لسيارة، طريقة التدرج، نسبة البنزين، التشخيص، التحسين.

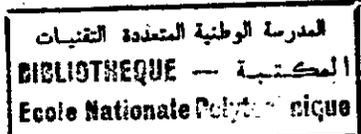
" Comme l'OR qui sort encore plus pur de l'épreuve du feu, comme les Hommes supérieurs qui sortent toujours plus forts après les pires difficultés, Je n'ai acquis cette force de volonté, cette croyance en moi-même et en une destinée unique, cette fierté et ce mépris pour tout ce qui vient d'en bas, qu' en mesurant la hargne de mes detracteurs, toute cette haine et cette énergie diabolique dirigées contre une personne que je croyais si simple... Et Je me suis dit alors, " S'ils s'y mettent tellement c'est que ça vaut la peine !! " "

Un grand Homme

À mes parents,

À mes soeurs,

À mes frères.



AVANT-PROPOS

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur R.ILLOUL mon professeur pendant les trois années de spécialité et mon Promoteur dans ce projet dont il a proposé le sujet. Très au fait de tout ce qui touche la commande adaptative et optimale, il a su m'aider et me faciliter le travail surtout dans la théorie automatique.

Je suis particulièrement sensible à l'intérêt et à la confiance que m'ont accordé Messieurs les professeurs F.BOUDJEMA et M.S.SOUAMI et leur considérable apport en conseils et informations surtout pour la recherche Bibliographique.

Je veux exprimer toute ma reconnaissance à Monsieur BOUBRIKA du département de Génie Mécanique pour toutes ses précieuses directives, et mon introduction auprès des meilleurs spécialistes des moteurs à explosion.

Je remercie infiniment le Professeur CHEKOURI du département de Génie Chimique pour sa grande modestie et son aide inestimable.

Que Monsieur A.HADDADI, ancien élève de l'école polytechnique, professeur à l'I.A.F. trouve ici l'expression de ma gratitude pour toutes ses explications concernant le moteur et surtout l'allumage commandé.

C'est un devoir pour moi, d'associer ici le nom de Monsieur P.BIDAN de l'université Paul Sabatier à Lyon, qui a daigné m'envoyer une copie de sa Thèse de doctorat sans laquelle beaucoup de points me seraient resté obscurs.

J'ai eu aussi la chance et l'honneur d'être informé et conseillé pendant le déroulement de ces recherches par le Professeur P.E.WELLSTEAD du Control Systems Centre / Manchester, U.K. et le Professeur P.G.SCOTSON de Lucas Adv. Eng. Centre / Solihull, U.K. ; co-auteurs de certains des plus récents travaux de recherche concernant l'application de la commande extrême au moteur à combustion interne , qu'ils soient remerciés pour leur grandes qualités scientifiques et humaines.

Jé n'oublierai pas de remercier Monsieur M.CHERFIA proche-parent, enseignant et cadre à l'Université de Constantine qui m'a prété aimablement son concours pour l'obtention l'outil informatique sans lequel ce travail n'aurait pu se faire.

Je ne saurai terminer cet avant-propos sans remercier tous ceux qui ont aidé de près ou de loin à élaborer ce projet, et spécialement les membres de ma famille qui ont su me soutenir et m'encourager dans les moments les plus difficiles.

NOMENCLATURE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
 المكتبة — BIBLIOTHEQUE
 Ecole Nationale Polytechnique

MODELISATION

- C : "Capacité équivalente" d'un volume (g/bar.)
- Mcn : masse d'air que peut contenir un cylindre entre le PMH et le PMP à 1 bar 20°C
- N : Régime de rotation du moteur (tr/min)
- P : Pression (bar)
- Pa : Pression atmosphérique (bar)
- PCI : Pouvoir calorifique inférieur (43.5 KJ/g pour l'essence auto.)
- PMB : Point mort bas du piston.
- PMH : Point mort haut du piston.
- Q : Quantité de chaleur (J)
- R : Constante des gaz parfaits (8.2 S.I.)
- ra : Remplissage du moteur en air.
- re : Remplissage du moteur en essence.
- ri : Richesse du mélange.
- rim : Richesse maximisant le couple moteur.
- Rc : Rendement de combustion.
- Rf : Rendement de forme.
- Rm : Rendement mécanique.
- Ti : Temps d'injection (s)
- Vpmb : Volume du cylindre au point mort bas (m³)
- Vpmh : Volume du cylindre au point mort haut (m³)
- Av : Avance à l'allumage (°)
- ϕ : Angle d'ouverture de la vanne papillon (°)
- τ : Rapport des chaleurs massiques à pression et volume constant ($\tau_{cp/cv}$)
- Tc : Couple moteur (N.m)
- ε : Rendement thermodynamique de Besou de Rochas réel.

ϵ_{br} : Rendement thermodynamique du cycle de Beau de Rochas théorique.

σ : Rapport volumétrique du moteur.

COMMANDE

p : Variable de Laplace.

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

INTRODUCTION
GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Dans la plupart des problèmes de commande, la tâche du régulateur est de garder quelques variables à une valeur constante, ou de lui faire suivre un signal de référence. En général, le système est supposé être linéaire, et c'est possible en principe d'amener la sortie à n'importe quelle valeur de la consigne. Avec de tels problèmes, le régulateur PID ordinaire peut souvent donner de bons résultats.

Dans un problème de COMMANDE EXTREMALE par contre, la courbe de la réponse statique reliant la sortie à l'entrée possède au moins un point extrême. C'est donc un système dynamique non-linéaire. La tâche d'une commande extrême est donc de garder la sortie aussi proche que possible de son extrême.

Historiquement, c'est Leblanc 1922 [19] qui le premier a utilisé une des méthodes les plus connues actuellement dans la COMMANDE EXTREMALE, qui est basée sur l'ajout d'un signal de perturbation à l'entrée et l'observation de son effet sur la sortie.

Les problèmes de commande extrême commencèrent à être plus populaires dans les années cinquante, probablement en raison des améliorations enregistrées dans la technologie des calculateurs qui a rendu possible l'implémentation de commandes de plus en plus compliquées.

C'est vers la fin des années soixante que le taux de publications dans ce domaine a sensiblement diminué, surtout en occident.

N'importe, quelque recherche a continué et des concepts comme l'identification des systèmes et la commande adaptative ont été introduits dans ce domaine.

Au cours des décades passées, la technologie des ordinateurs a énormément progressé. Il serait donc très intéressant de reconsidérer les problèmes de COMMANDE EXTREMALE. Il est maintenant possible d'implémenter des algorithmes compliqués de commande dans des micro-

computers à bas prix, comme il a été déjà montré avec la commande adaptative. On peut désormais bénéficier de l'insertion d'autres idées de la commande adaptative et de l'identification dans le domaine de la COMMANDE EXTREMALE.

En plus de cela, avec la compétition actuelle pour le partage du marché et l'augmentation de la complexité des systèmes, même de petits gains dans l'efficacité peuvent être de très grande valeur.

Parmi les nombreux exemples des systèmes pratiques qui exhibent ce comportement (cf : I.1.2), la commande du rapport carburant/comburant et de l'avance à l'allumage pour une combustion optimale dans les moteurs à explosion est depuis longtemps devenue un problème classique sur lequel nombreux étaient et sont les chercheurs qui se sont penchés suivant les pas de Draper, C. S. et Lie, Y. T. [16] dans un chemin d'avenir abordé en 1951.

Doté d'un rendement énergétique global voisin de 40 % dans le meilleur des cas, le moteur à allumage commandé représente pratiquement, depuis bientôt un siècle, le seul dispositif (avec le moteur Diesel) utilisé pour propulser le véhicule automobile. Cependant, ces vingt dernières années, la recherche d'économies de l'énergie a révélé les limites de ce système de propulsion, ce qui a aussi remis au diapason les travaux des automaticiens qui étaient jusque là évités par les firmes automobiles parce que jugés trop compliqués ou trop coûteux.

PREMIERE PARTIE:

LA COMMANDE

EXTREMALE

situation. Ceci étant, il ira directement au sommet.

Pour ce qui nous concerne, nous allons traiter l'optimisation des systèmes statiques et dynamiques; sans connaître toutefois les caractéristiques de ces derniers. En utilisant le même exemple cette situation peut être comparée à celle d'un grimpeur à la recherche du sommet d'une montagne dans le brouillard. Il ne possède aucune indication à l'exception de la sensation de la gravité; lui indiquant s'il est entraîné de monter ou de descendre. En raison du haut degré d'ignorance où se trouve le chercheur, les problèmes d'optimisation de cette catégorie s'appellent PROBLEME DE RECHERCHE EXTREMALE, par opposition aux problèmes d'optimisation classiques.

Ces problèmes de recherche peuvent être uni- ou multi-dimensionnels, statiques ou dynamiques; et le processus de recherche s'effectue sous une forme en boucle ouverte ou en boucle fermée. Dans le domaine de la commande automatique, le développement des techniques de recherche extrême (comportement des systèmes non-connus) a commencé vers les premières années 50; même si Leblanc avec son travail datant de 1922 peut être considéré comme le pionnier de cette méthode. L'étude de ces techniques a toujours été menée d'une façon parallèle à celle des techniques d'optimisation (comportement des systèmes connus). Il n'existe pas cependant, de théorie commune à ces deux branches, à l'exception d'un certain nombre de concepts similaires.

1.2.INTERET DES ASSERVISSEMENTS EXTREMAUX: Decaulne [2]

1.2.1.COMMANDE ASSERVIE A UNE VALEUR DE CONSIGNE:

Considérons un processus où une variable de commande (entrée) X agit sur une variable d'état (sortie) Y . Nous supposons d'abord,

pour simplifier, que la relation entre ces deux variables ne fait pas intervenir le temps, i.e. qu'elle est définie par une caractéristique statique. $Y = f(X)$ (I.1) (FIG.1.1)

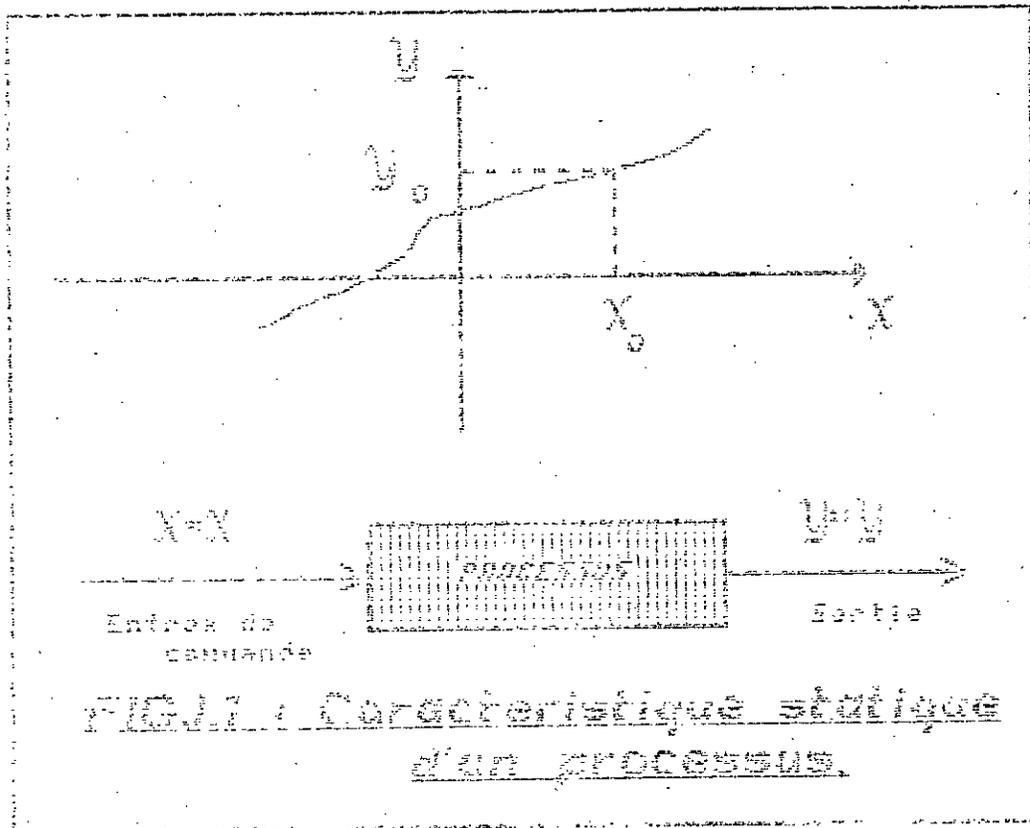


FIG.1.1 : Caractéristique statique d'un processus.

Si la fin qu'on s'assigne consiste à maintenir Y égale à une valeur donnée Y_0 , il suffit théoriquement de fixer X à la valeur correspondante X_0 déterminée par la caractéristique. En réalité les entrées secondaires de perturbation, toujours présentes modifient la caractéristique au-delà des tolérances admises pour la commande. (FIG.1.2) Si l'on veut que celle-ci reste garantie, il faut la compliquer. On recourra à deux types de solutions.

Première approche: (Boucle Ouverte)

On suppose connue la loi du processus (dite son modèle mathématique)

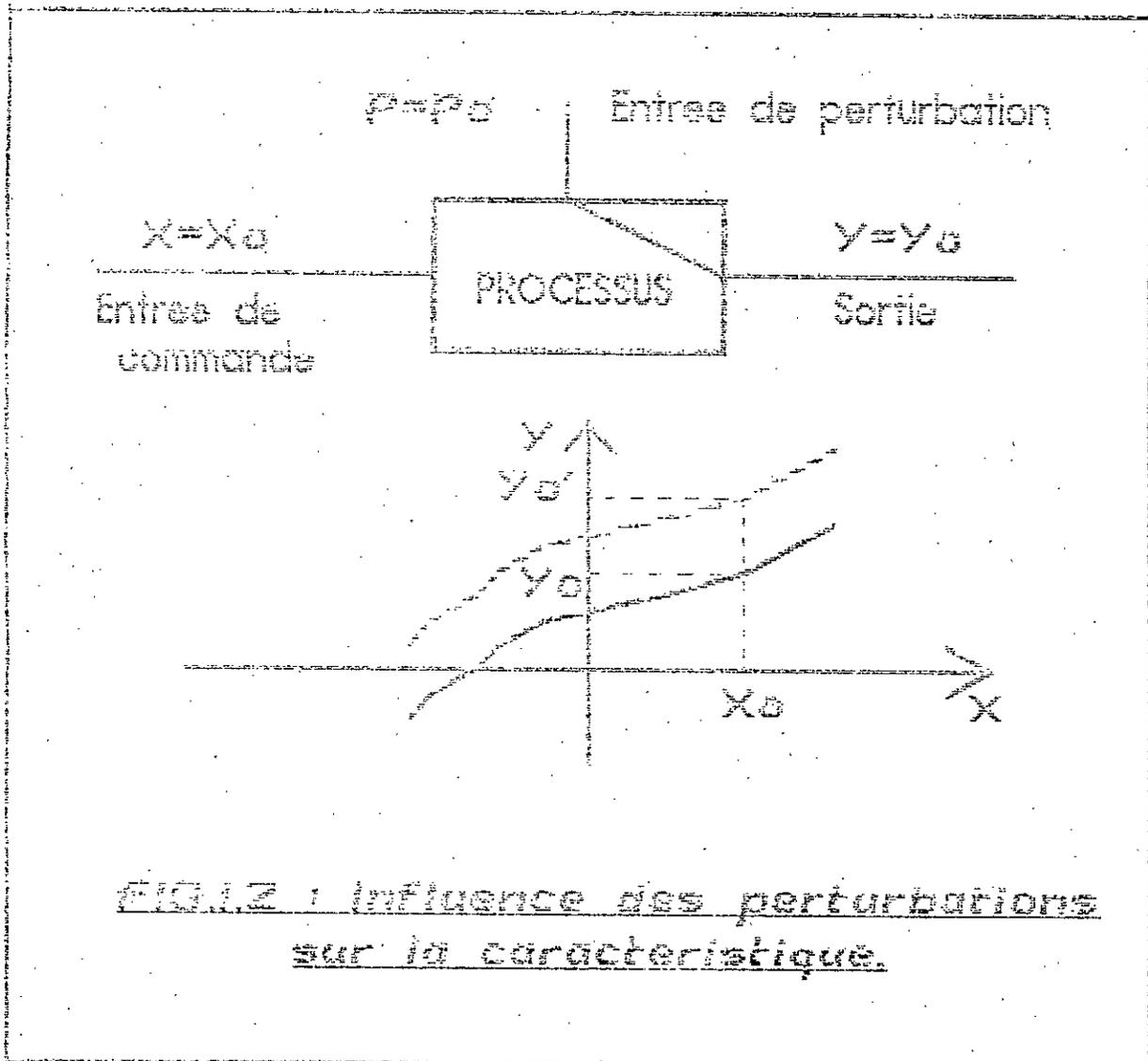


FIG.1.2 : Influence des perturbations sur la caractéristique.

$$Y = f(X, p_1, p_2, \dots)$$

(1.2)

Faisant intervenir toutes les perturbations significatives: p_1, p_2, \dots . Si l'on connaît constamment les valeurs p_1, p_2, \dots de ces perturbations, on peut connaître la valeur de X qui garantit une sortie Y_0 . Cette valeur n'est plus égale à X_0 , mais à :

$$X = X_0 + \delta X = X_0 + g(Y_0, p_1, p_2, \dots)$$

(1.3)

En pratique il y a lieu de mesurer les perturbations p_1, p_2, \dots et de

corriger la commande X_e en tenant compte de la loi précédente par un calcul. (FIG.1.3)

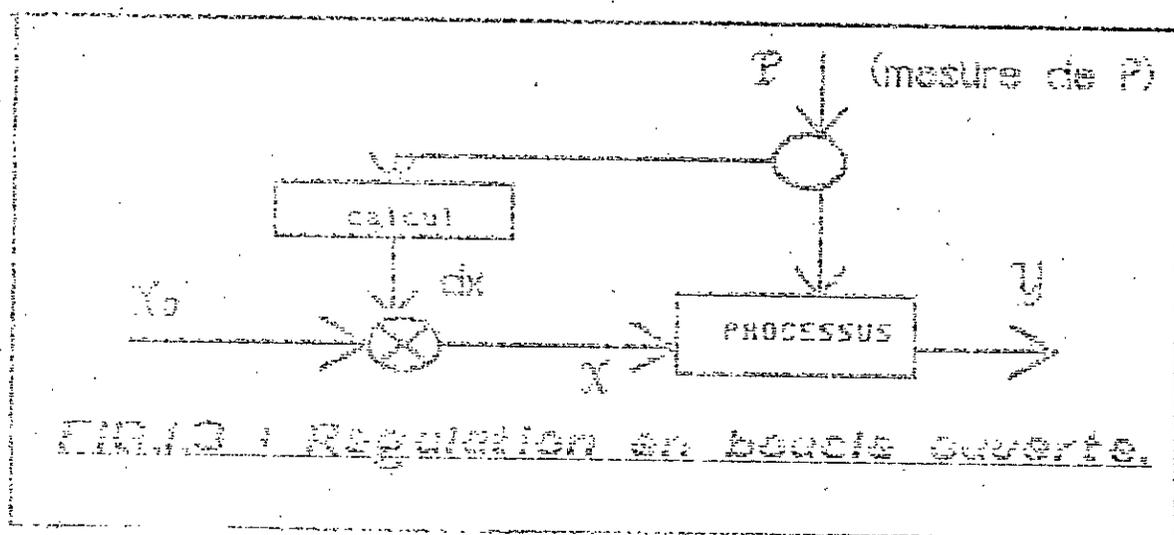


FIG.1.3 : Regulation en boucle ouverte.

Ce procédé est appelé REGULATION PAR CORRECTION ou REGULATION PREDICTIVE ou encore REGULATION EN BOUCLE OUVERTE. Retenons qu'il exige à la fois une connaissance suffisante du modèle mathématique du processus et une mesure significative des perturbations.

Deuxième approche: (Boucle fermée)

On se contente de mesurer la sortie obtenue Y et on agit sur la grandeur de commande X à partir de la différence (ou écart) entre la consigne Y_e et la sortie mesurée Y . (FIG.1.4)

En fonctionnement dynamique ce signal d'écart doit tendre à s'annuler pour que la consigne soit atteinte, c'est le procédé classique de l'asservissement. Ses inconvénients sont connus (problème de stabilité), mais il n'exige pas, dans son fonctionnement fondamental, qu'on connaisse le modèle mathématique du processus, ni fasse d'autre

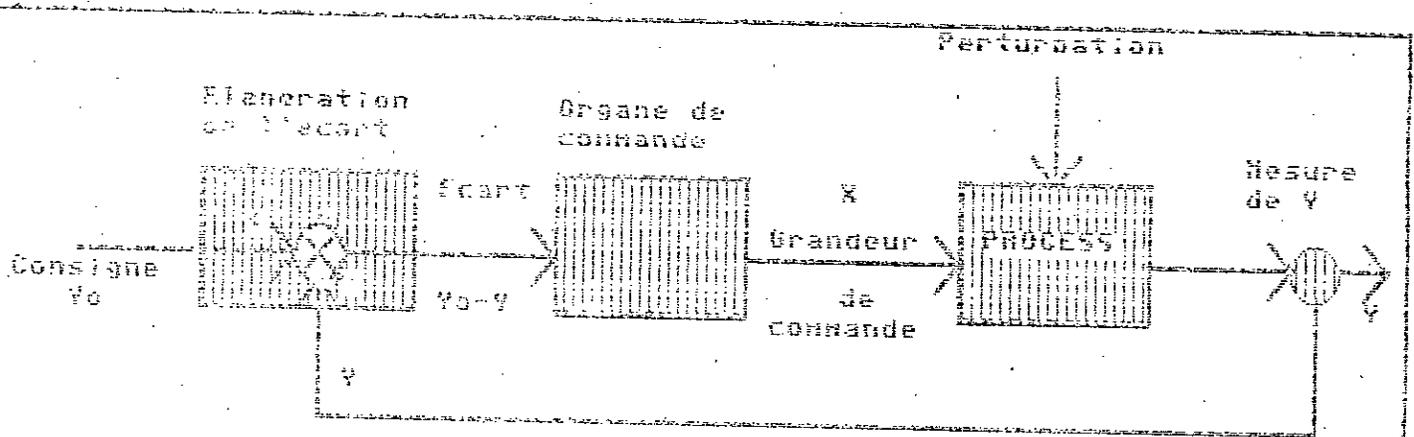


FIG.1.4 : Régulation en boucle fermée (asservie).

mesures que celle de la sortie.

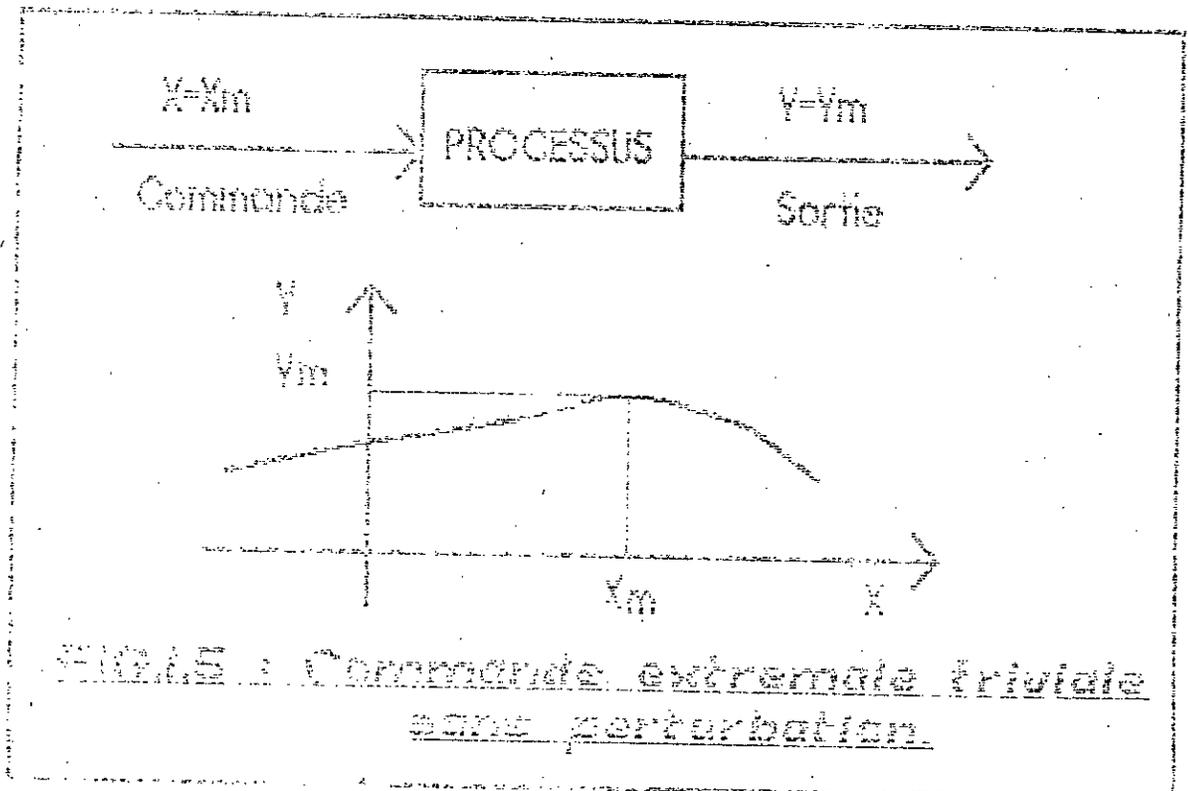
On notera que l'organe de commande comporte, outre l'amplification nécessaire à la précision, le réseau correcteur éventuellement utile aux performances dynamiques.

1.2.2.COMMANDE EXTREMALE:

Supposons maintenant que la caractéristique statique sortie vs entrée du processus présente un extrémum (minimum ou maximum (FIG.1.5)). Cela implique la non-linéarité; cas extrêmement fréquent dans les systèmes industriels. (On sait par exemple que les caractéristiques dites " linéaires " s'infléchit en réalité, presque toujours pour les grandes valeurs des variables).

Si l'objectif qu'on se propose est de mettre le processus dans un état qui place Y à sa valeur extrémale Ym, il suffit idéalement de fixer X à la valeur correspondante Xm sur la caractéristique. (FIG.1.5)

Toutefois les entrées secondaires modifient la caractéristique, de telle sorte que la valeur X dépend en fait de ces entrées. (FIG.1.6)



Ici encore deux types de solutions se présentent:

Première solution: (Boucle ouverte)

De la connaissance supposée acquise du modèle mathématique

$$Y = f(X , p_1 , p_2 , \dots) \quad (1.4)$$

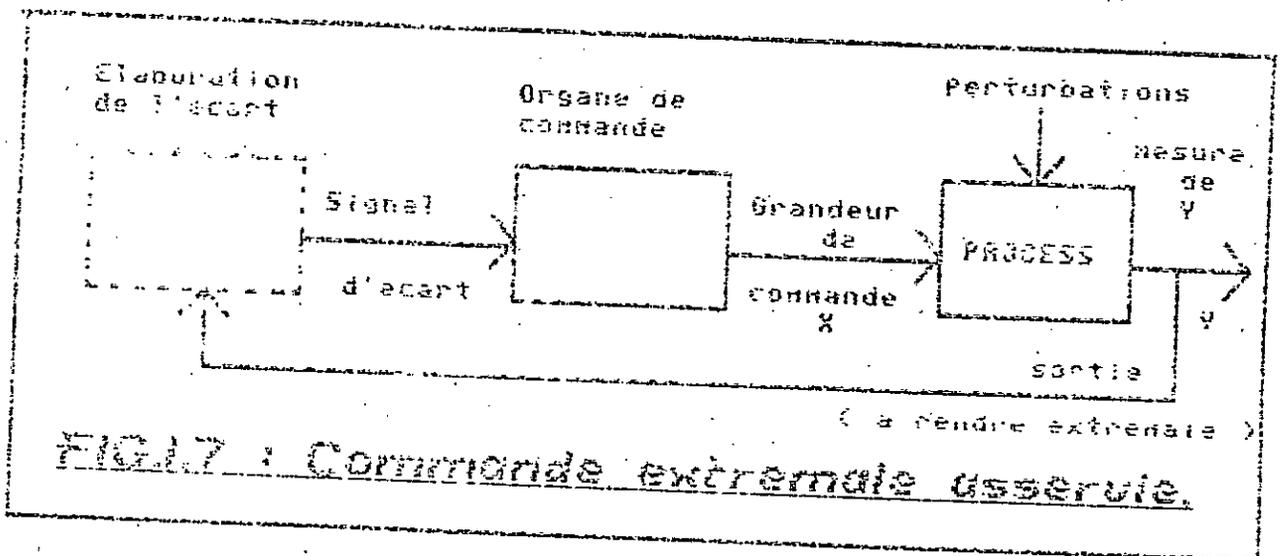
On déduit en fonction des perturbations p_1, p_2, \dots , la valeur optimale X_m de i.e., celle qui place Y à son extrêmu.

$$X_m = h(p_1 , p_2 , \dots) \quad (1.5)$$

Il y a donc lieu de mesurer ces perturbations et de modifier X conformément au calcul. Ce procédé de commande en " Boucle ouverte " porte souvent le nom d'OPTIMISATION AVEC MODELE.

Deuxième solution: (Boucle fermée)

Comme précédemment la régulation asservie, cette appelée régulation



extrême ou asservissement extrême ou d'extrême ou encore optimisation sans modèle ne fait pas appel, dans son fonctionnement fondamental, à une connaissance mathématique du processus ni à la mesure des perturbations.

Ici encore, on remplace la commande du processus par une grandeur dépendant du signal d'ecart; dans le fonctionnement du système ce dernier doit tendre à s'annuler de façon que l'extrémum puisse être atteint. Ainsi le schéma général de fonctionnement présente une boucle tout comme l'asservissement classique à valeur de consigne. (FIG.1.7) Mais l'analogie s'arrête là ! Dans le cas de l'asservissement à valeur de consigne, en effet, la valeur de consigne X était explicitement connue, le rôle du détecteur consistait simplement à élaborer le signal $Y - Y_g$ à partir des mesures respectives de Y et Y_g . Dans le cas de l'asservissement extrême, en revanche, la consigne ne peut pas être explicitée, puisque la valeur de l'extrémum n'est pas connue a priori en raison des perturbations. Le détecteur d'ecart a pour fonction

lames ajustables, la puissance est maximale pour une position optimale de l'angle des lames.

g / Le signal aperçu par une radio-télescope est maximal pour un certain ajustage de son antenne.

h / Sur un engin spatial l'énergie solaire recueillie est maximale pour un certain réglage de la position des cellules solaire.

I.2.4. INTERET DES COMMANDES EXTREMALES:

Les exemples qui précèdent suggèrent l'intérêt technique et économique des asservissements extrémaux en automatisme. De même que les asservissements classiques fournissent une solution simple et efficace au problème élémentaire de l'automatisme qu'est la régulation des conditions de fonctionnement des processus, de même des asservissements extrémaux sont capables de contribuer à l'amélioration (ou "optimisation") des processus. Encore faut-il que leurs performances soient satisfaisantes. L'étude des performances des asservissements extrémaux _ qui, on l'a noté, sont essentiellement non-linéaires _ est donc très importante pour les techniques avancées de l'automatisme.

I.2.5. REMARQUES SUR L'ELABORATION DE LA GRANDEUR DE SORTIE:

La grandeur de " sortie ", qu'il s'agit de rendre extrémale, représente généralement un certain critère de fonctionnement du processus concerné. Dans certains cas, ce critère est bien représenté par une variable d'état directement accessible à la mesure, bien que le résultat de la mesure peut être affecté de retards. Plus souvent, le critère dépend de plusieurs variables d'état mesurables, lorsqu'on connaît à priori la relation de dépendance (supposée, de plus, insensible à d'autres paramètres perturbateurs), on peut évaluer le

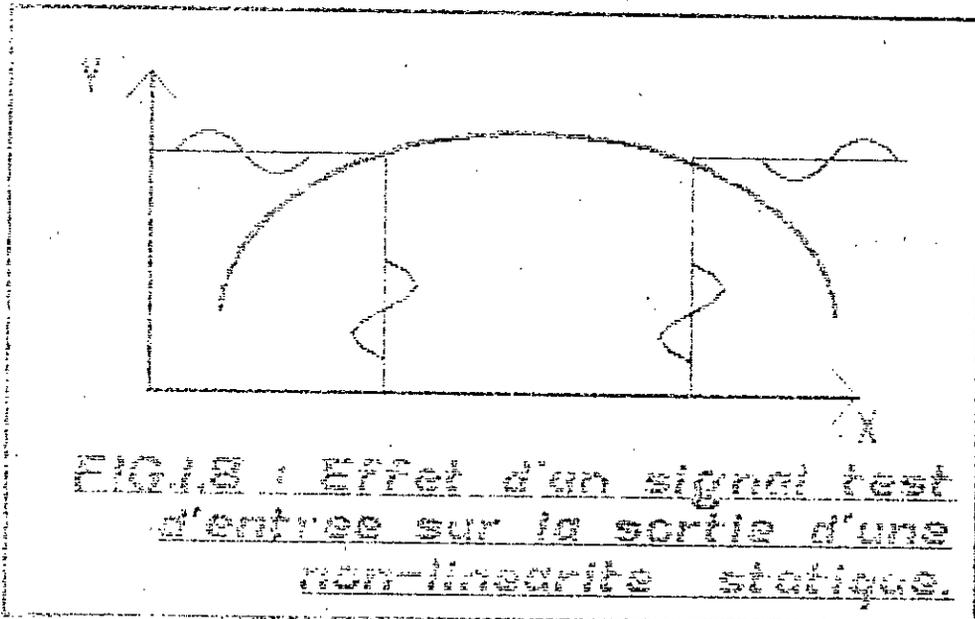
à quelque modèle pour l'analyse des performances.

1.3.1.Systèmes statiques : On suppose dans la littérature, que le système n'a pas de dynamiques. Dans la pratique, cette condition peut être remplie en utilisant un intervalle d'échantillonnage assez large, avec le risque d'obtenir une optimisation lente. Dans plusieurs cas, par contre, des modèles statiques d'approximation peuvent être utilisés dans l'optimisation pour manipuler des mesures bruitées.

1.3.2.Systèmes dynamiques : On ne peut pas encore dire quelle est la manière la plus naturelle et la meilleur de modéliser un système dynamique non-linéaire. Peut être en utilisant l'Identification du système, est-il sûrement désirable d'avoir un modèle qui soit linéaire dans ses paramètres inconnus. N'importe quelle connaissance a priori du processus devrait alors être utilisée dans la réalisation de la commande. Ainsi il peut être possible de manipuler des systèmes linéaires très compliqués mais partiellement connus, voire des systèmes non-linéaires. On aboutit alors à une impasse en voulant trouver des structures de modèles qui soient assez générales, et qui permettent encore de faire des calculs. La solution préconisée est de séparer les parties linéaire et non-linéaire en deux blocs en série. Il y a donc deux possibilités: La partie non_linéaire peut être placée aussi bien avant qu'après la partie linéaire.

1.3.3.Bruit et dérive : Cela doit être important dans les systèmes pratiques de prendre le bruit et la dérive en compte en concevant un régulateur. Le bruit est alors souvent modélisé comme blanc et additif et appliqué à la sortie du système comme bruit de mesure. Une autre possibilité est de l'appliquer entre les parties linéaire et non-linéaire. Il est important de noter que le bruit à l'entrée de la non-

linéarité est équivalent à une dérive horizontale de la non-linéarité. La majorité des algorithmes de commande sont initialement conçus pour des systèmes déterministes. Le bruit est alors généralement manipulé en analysant son effet sur le système en boucle fermée. Une manière inévitable de réduire les effets du bruit est bien sûr le filtrage, qui s'est avéré utile et nécessaire dans plusieurs études.



I.4.METHODES DE RECHERCHE EXTREMALE: Pun. [5]

Les techniques de recherche statique qu'on va analyser ici possèdent une base théorique convenable, tandis que les deux catégories de techniques de recherche dynamique procèdent plutôt d'une façon heuristique. Par ailleurs, ces techniques de recherche dynamique conduisent à des réalisations en ligne dès le début. Il faut noter que notre but n'est pas de donner tous les détails sur ces méthodes, nous en laissons le soin aux promotions futures, mais nous voulons seulement donner un aperçu sur les plus remarquables innovations dans ce domaine.

I.4.1.METHODE DE FIBONACCI DANS LES PROBLEMES STATIQUESUNIDIMENSIONNELS:

Formulation du problème :

Dans les problèmes unidimensionnels, le modèle mathématique du système est réduit à un certain Indice de performance fonction de la variable de commande X . Comme nous supposons inconnu le comportement du système, tout ce que nous pouvons écrire est une certaine forme générale $Y = f(X)$ (I.1)

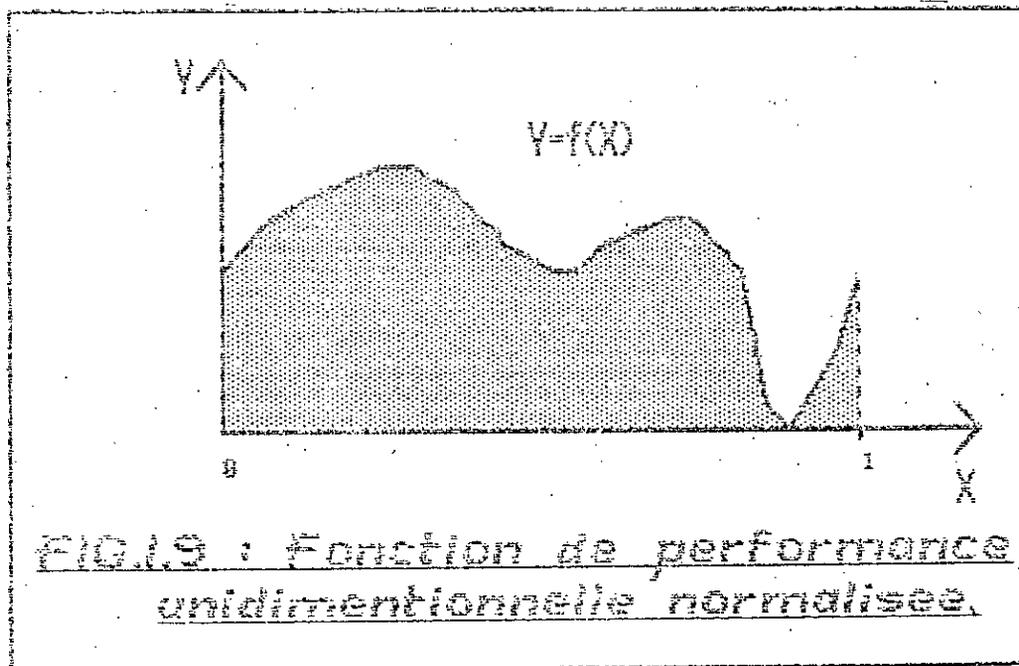


FIG.1.9 : Fonction de performance unidimensionnelle normalisée.

Le problème d'optimisation peut ainsi être formulé ainsi:

Trouver en un nombre minimal d'étapes la valeur de la variable X , $0 \leq X \leq 1$, telle que la valeur de l'indice de performance Y qui en résulte soit un extrémum. Cette méthode consiste à diminuer progressivement l'intervalle d'incertitude où se trouve la valeur optimale, et ce en comparant les coordonnées de deux points de mesure

I.4.2.METHODE DE LA PLUS GRANDE PENTE DANS LES PROBLEMESSTATIQUES MULTIDIMENSIONNELS:

Problème: Etant donné un Indice de performance

$$Y = f(X_1 , X_2 , \dots , X_n) \quad (1.5)$$

fonction de plusieurs variables X_1 , X_2 , \dots , X_n , la formule analytique de $f()$ étant inconnue; trouver en un nombre minimal d'étapes les valeurs de X_1 , X_2 , \dots , X_n de façon que la valeur de Y qui en résulte soit un extrémum ?

Géométriquement on peut imaginer Y comme un paysage contenant des montagnes et des vallées. (FIG.I.10)

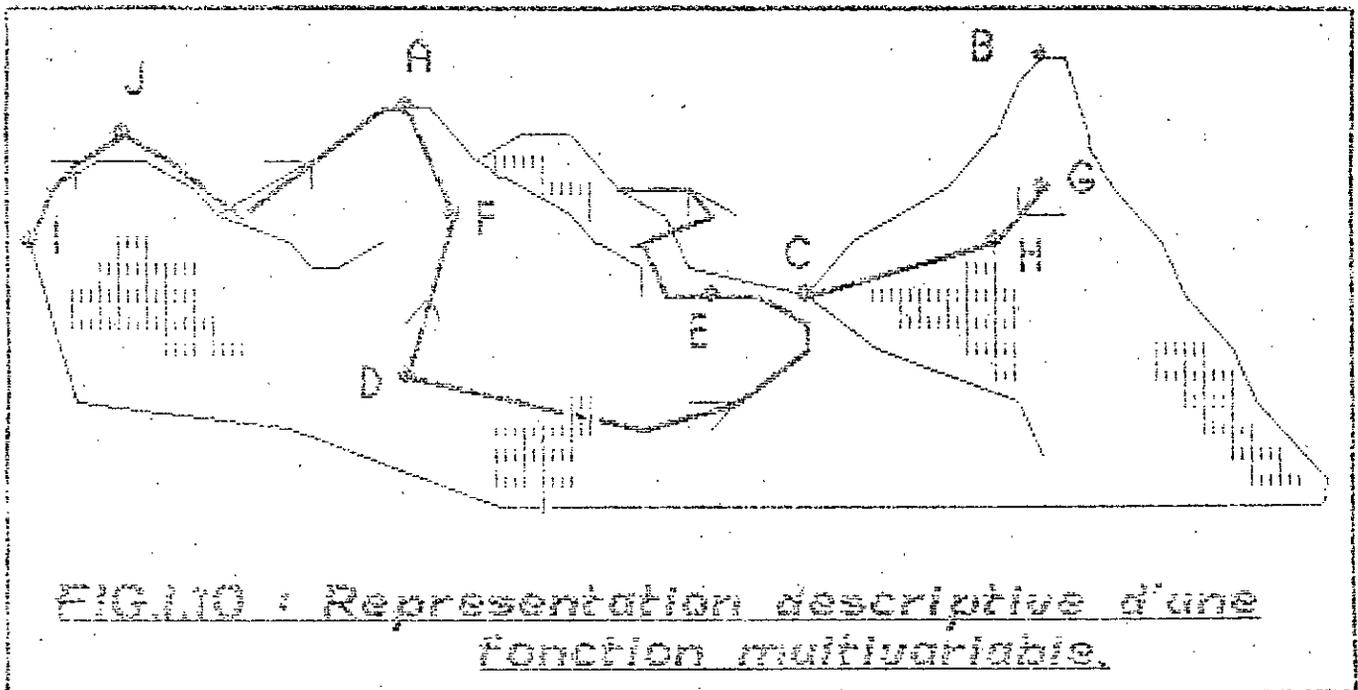


FIG.110 : Représentation descriptive d'une fonction multivariable.

Le problème d'optimisation est alors de trouver aussi rapidement que possible un sommet tel que A ou B ou un creux tel que C . Supposons qu'initialement nous nous trouvions au point D , le chemin le plus rapide pour atteindre le sommet A n'est certainement pas le parcours DEA en zigzag, mais le parcours DFA le long duquel nous nous élevons le plus à chaque pas. D'une façon similaire, le parcours le long duquel la pente est la plus raide , i.e. GHC , est aussi le chemin le plus rapide pour atteindre le creux C à partir du point initial G . On

comprend donc intuitivement que la descente (l'ascension) la plus raide est le parcours le plus rapide pour atteindre un minimum (ou un maximum). On doit toutefois faire ici deux remarques pour montrer les limitations:

1. L'applicabilité dépend des profils des fonctions; par exemple, de I, le parcours de la plus grande pente IA contient une portion descendante au voisinage de J .

2. La recherche conduit seulement à des extrémums locaux. Par exemple, de D, la recherche de la montée la plus raide conduit au sommet A, et non B, qui est pourtant le plus élevé.

Cette méthode s'appelle aussi METHODE DES GRADIENTS. PUN [5]

I.4.3.RECHERCHE EXTREMALE DANS LES PROBLEMES

QUASI-STATIQUES:

I.4.3.1 Poursuite extrême: Les méthodes précédentes permettent d'atteindre rapidement l'extrémum, mais nous obligent à refaire les mêmes calculs s'il venait à changer. Il existe cependant des méthodes qui une fois l'extrémum atteint, le maintiennent; elles s'appellent "techniques de poursuite d'extrémum" et sont caractérisées par leur nature heuristique. Elles ne sont pas basées sur des arguments analytiques, mais dérivent en général de l'intuition, aidées par divers dispositifs technologiques.

I.4.3.2 Méthode de blocage de l'extrémum: La plus vieille technique de poursuite de l'extrémum est le blocage de l'extrémum. Cette méthode a été utilisée pour trouver la meilleure pression efficace moyenne au frein d'un moteur à combustion interne en ajustant l'une des deux variables indépendantes: temps d'allumage et richesse d'essence. On suppose que la relation non-linéaire entre le signal de performance P et le signal de commande M est représentée par une

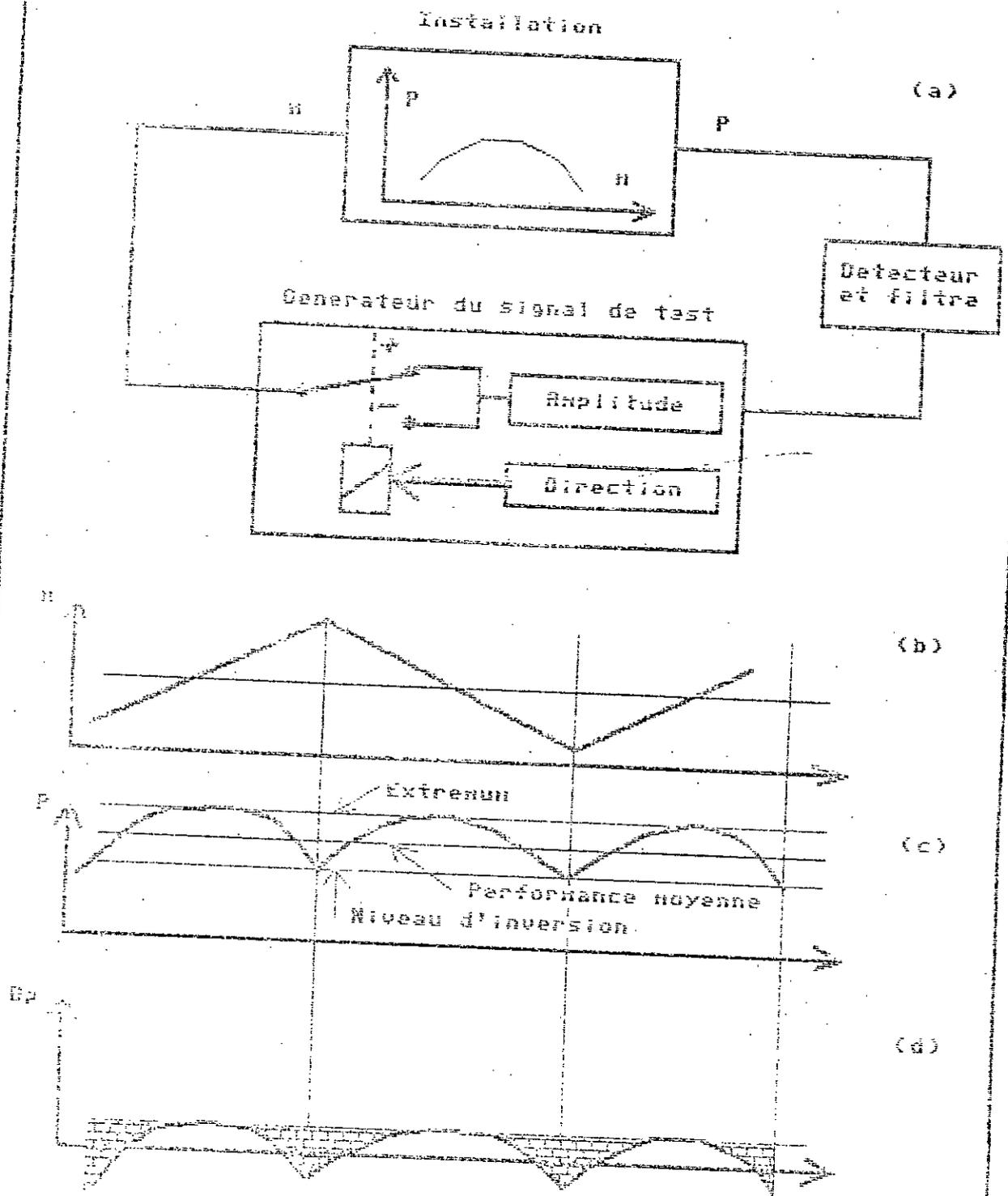
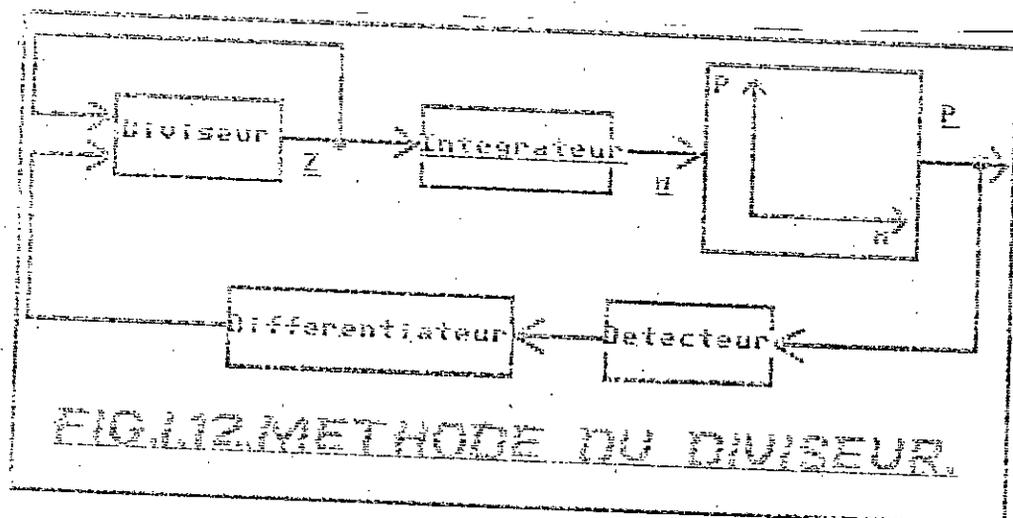


FIG. 17 Méthode de blocage d'extrémum.
 (a) Schéma fonctionnel. (b) Signal de test.
 (c) Signal de performance. (d) Signal de perte.

fonction ayant un extrémum . On fait varier le signal M à vitesse constante jusqu'à ce que la différence entre la valeur maximale du signal P et sa valeur actuelle atteigne une certaine quantité définie à l'avance. On change alors le sens de la variation du signal M , et on répète l'opération (FIG.I.11) En réalité le système ne fonctionne pas à son état extrémal. Il opère à un certain niveau moyen de performances. Cette méthode peut être considérablement améliorée, son grand inconvénient : elle ne peut être appliquée aux systèmes multivariables.

I.4.3.3 Méthode du diviseur: Cette méthode a relativement à la méthode précédente l'avantage de ne pas perturber le signal d'entrée tout en étant simple.



Le principe de la méthode est représenté par le schéma fonctionnel de la (FIG.I.12). Le diviseur en fait, engendre la dérivée du signal de performance P par rapport au signal de la variable d'entrée M . Les relations entre P , M , X et Z sont les suivantes:

$$Z = X / \dot{P} \quad (6)$$

$$\underline{X} = T1 (\underline{dP} / dt) \quad (7)$$

$$\underline{Z} = T2 (\underline{dM} / dt) \quad (8)$$

où T1 et T2 sont les constantes de temps respectivement du différentiateur et de l'intégrateur . En divisant (7) par (8) , et en utilisant (6) et (8) nous avons :

$$\underline{dM} / dt = T1/T2^2 (\underline{dP} / \underline{dM}) \quad (9)$$

Ainsi le taux de variation de M est proportionnel à la pente de la courbe de performance, et M est forcé dans le sens qui réduit cette pente à zéro. L'analyse dynamique montre que le système est stable pour un grand nombre d'applications pratiques. L'intérêt ici n'est pas dans la vitesse de recherche, mais plutôt dans le comportement du processus de poursuite. On notera que la recherche s'effectue ici dans la région entourant l'extrémum, et de plus, d'une façon continue.

1.4.3.4 Effet de la dynamique du système: Le processus considéré sur les figures (FIG.I.11) et (FIG.I.12), est en quelque sorte idéalisé. Dans la pratique, il existe un grand nombre de facteurs, appartenant soit au processus, soit aux instruments, qui peuvent affecter la position du point extrême, et par là même, le comportement du processus de poursuite d'extrémum , ces facteurs sont :

- 1_ Les variations de la charge du processus (EX: Couple de charge d'un moteur).
- 2_ Les variations des conditions environnantes incontrôlables (dans le cas du moteur à combustion interne : Temperature, pression, humidité de l'air et du combustible).
- 3_ Les constantes de temps du type $1/(1+tr.p)$ dues au processus lui-même ou à l'instrumentation.
- 4_ Les constantes de temps du type $e^{-tr.p}$ représentant diverses zones

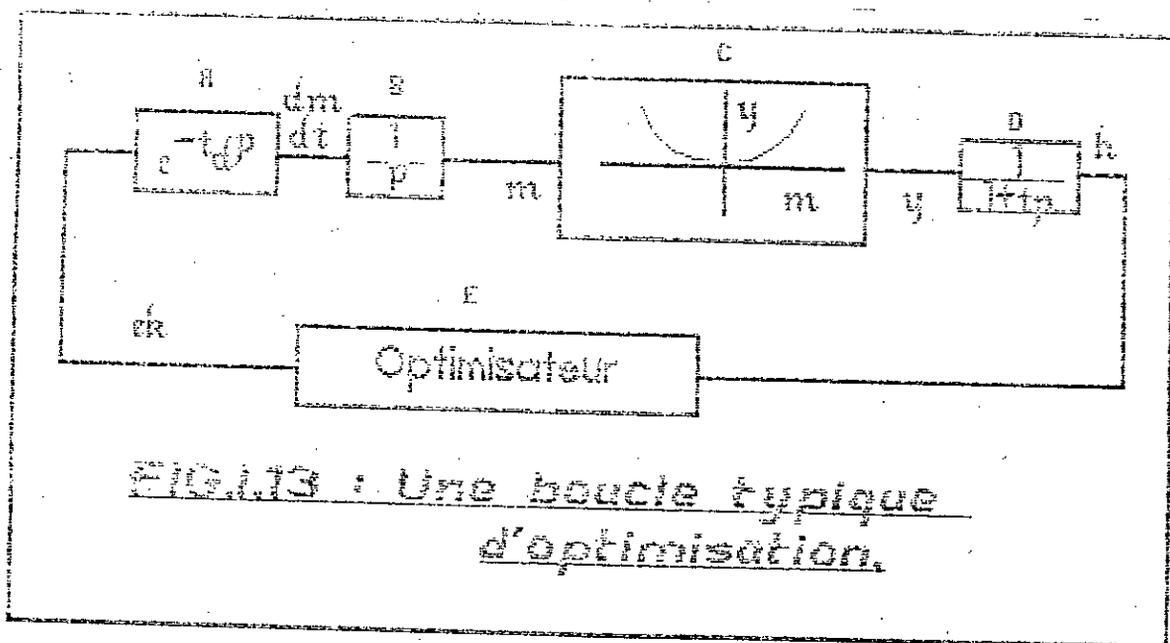


FIG. I.13 : Une boucle typique d'optimisation.

mortes, soit dans le processus, soit dans l'instrumentation.

En utilisant un filtre on peut mesurer la valeur moyenne lissée des signaux, mais cela augmente aussi le nombre des constantes de temps de la chaîne globale. La politique de poursuite d'extrémum doit être modifiée en conséquence.

I.4.4. RECHERCHE FORÇANTE D'EXTREMUM

DANS LES PROBLEMES DYNAMIQUES:

Considérons une boucle d'optimisation typique comme celle de (FIG. I.13). Le rectangle C représente la relation inconnue non-linéaire à l'état permanent entre l'Indice de performance Y et la variable de commande M. La politique de recherche mécanisée dans l'optimiseur est similaire à celle de (FIG. I.11) i.e., engendre le taux de variation de M en fonction de ce que l'on connaît de l'état de Y sauf que, au lieu de la dérivée première dY/dM , on utilise la dérivée seconde d^2Y/dM^2 . Le rectangle D représente la constante de temps τ du processus lui-même, ou d'un instrument quelconque de

mesure, de sorte que ce que l'on connaît de l'état de la performance n'est pas $Y(t)$, mais $h(t)$. Le rectangle **A** représente le délai t_d supposé ramené à l'entrée du processus. Le rectangle **B** représente l'intégrateur fictif, étant donné que l'optimiseur engendre le taux de variation de M . La sortie de l'optimiseur est ϵK : K détermine l'amplitude de dM/dt , tandis que $\epsilon = \pm 1$ indique sa direction. Supposons que l'on adopte une valeur prédéterminée de K , le problème de minimisation consiste alors à déterminer le signe de dM/dt , selon la connaissance de $h(M(t))$ de façon que le point de fonctionnement courant Q , dans le plan de phase $h-M$ soit amené d'un point initial quelconque Q_i (au temps initial t_i) au point minimal Q_m (au temps final t_f), voir (FIG.I.14.a). Toutefois, la trajectoire réelle de recherche représentera un comportement oscillatoire (avec cycle limite) tel que celui représenté sur (FIG.I.14.b). La forme finale des oscillations dépendra, bien entendu, de la stratégie de recherche adoptée et des conditions de recherche. Les détails de cette méthode sont disponibles dans le Pun [5].

1.4.5. EXTENSION AUX PROBLEMES MULTIDIMENSIONNELS:

On peut se demander si les techniques décrites dans cette partie sont applicables aux problèmes de recherche d'extrémum dynamiques multidimensionnels. Concernant les techniques de recherche de la plus grande pente, nous avons vu que la multidimensionnalité peut être réduite paramétriquement à une seule dimension. Toutefois, les difficultés sont: La distortion des contours, ou les non-linéarités dues aux termes de degrés élevés, et le problème de trouver l'extrémum absolu. Pour les méthodes de blocage d'extrémum et diviseur, les difficultés sont principalement: la synchronisation et l'ajustage des

I.5.CLASSIFICATION DES ALGORITHMES:

Il est surprenant de voir que peu de nouvelles idées ont émergé dans la commande extrémale depuis la fin des années 60. Tous les algorithmes que nous citerons étaient déjà connus alors, au moins dans leur principe de base. Ces systèmes sont:

_ 1 _ Les systèmes de perturbation : L'effet d'un signal conçu ajouté à l'entrée sur la sortie est utilisé pour dériver des informations sur la pente de la non-linéarité.

_ 2 _ Les systèmes à switching ou commutation: L'entrée est conduite à vitesse constante dans le même sens jusqu'à ce que l'extrémum soit dépassé, la direction de la dérive de l'entrée est alors inversée selon quelque règles établies.

_ 3 _ Les systèmes auto-conducteurs: Il n'y a pas de charge initiale à l'entrée (preset charge) . Les mesures sont utilisées directement pour déterminer l'entrée.

_ 4 _ Systèmes à modèle orienté: On y combine l'identification paramétrique avec la commande extrémale.

I.5.1.LES METHODES DE PERTURBATION: Déjà en 1922 Leblanc [19] a suggéré une application d'un schéma de perturbation. Cela peut alors être la méthode la plus ancienne de la commande extrémale; et aussi la plus populaire. La tâche d'une commande extrémale est de garder le gradient de la non-linéarité à zéro. Le problème est alors réduit à un problème de commande ordinaire si le gradient est mesuré. Cela peut le plus souvent être fait directement. Une méthode de perturbation peut alors donner l'information nécessaire. L'idée de base est d'ajouter un signal-test périodique au signal de commande, et d'observer son effet à

la sortie. Cela est illustré dans la figure (FIG.1.8) pour une non-linéarité statique. La sortie et le signal-test peuvent être multipliés et une moyenne prise sur un nombre de périodes complètes. Le signal résultant est alors pris comme un substitut du vrai gradient et peut être utilisé dans une commande intégrale, au rôle du signal mesuré qui doit être gardé proche de zéro.

1.5.2.LES METHODES DE SWITCHING: Une autre idée de base pour la commande extrémale est la suivante. L'entrée est conduite dans la même direction à vitesse constante, jusqu'à ce qu'aucune amélioration n'est enregistrée. La direction de dérive est alors inversée. Des algorithmes différents de ce type peuvent être décrits dans les termes de leurs conditions spécifiques pour modifier la direction des changements d'entrée. La loi de commande est donc un ensemble de conditions de commutation. L'entrée peut varier d'une manière continue ou en pas discrets. Les Russes ont eu une prédilection pour la deuxième méthode, ils appellent ces systèmes: SYSTEMES A PAS (Stepping systems).

Le balayage continu: On considère une non-linéarité quadratique statique avec des dynamiques de premier ordre aussi bien à l'entrée qu'à la sortie. La direction du balayage est inversée quand la sortie a decru de sa valeur maximale d'un segment fixé . Le choix de permet d'éviter un switching excessif et les effets des néfaste du bruit.

Les dynamiques: Pour un système dynamique, l'effet du dernier changement d'entrée sur la sortie peut être complètement caché dans la réponse à d'autres changements d'entrée. Parmi les méthodes pratiquées pour palier à cet inconvénient, on notera l'utilisation de plusieurs

mesures pour chaque nouvelle valeur d'entrée; et l'utilisation de la somme pondérée d'anciennes différences de sortie au lieu de la dernière.

1.5.3.SYSTERES AUTO-DÉRIVANTS: Les méthodes discutées avant, emploient quelques formes de variation forcée de l'entrée. Dans un système auto-dérivant, de telles restrictions ne sont pas imposées au signal de commande. Au contraire, à chaque instant, l'information disponible est utilisée pour produire un signal de commande qui guidera le système vers un optimum. Considérons encore une fois le système statique de l'équation (1) $Y = f (X)$; la première dérivée de la sortie

pourrait alors être utilisée pour guider l'entrée via un intégrateur tel que
$$\underline{X}(t) = \int_0^t \underline{Y}(t) dt \quad (1.10)$$

Ce système aurait à être lancé manuellement, puisque $\underline{Y} = \underline{X} = 0$ est toujours un point stationnaire. Mais s'il est initialisé dans la bonne direction, avec X non nulle, il trouvera sûrement un point où :

$$f(X) = 0$$

1.5.4.LES METHODES A MODELE ORIENTE: Dans les schémas présentés avant, peu d'informations sont collectées sur le système. Seulement la sortie et peut être la pente de la non-linéarité au point de fonctionnement sont utilisées. Essentiellement aucune information n'est gardée pour l'utilisation ultérieure. Pour les méthodes traitées dans cette section l'action de la commande est calculée à partir d'un modèle obtenu pour quelque type d'identification du processus. L'entrée peut alors être choisie comme la position extrême estimée. Il existe deux groupes importants dans cette classe de méthodes.

Premier Groupe : Chaque action est précédée d'une phase

d'identification. Durant cette phase l'entrée doit être variée délibérément ou avec un bruit pour produire de bonnes estimations des paramètres. Basé sur l'estimation, un pas de commande est alors pris, et le cycle se répète.

Second Groupe : Aucune phase d'identification séparée n'existe. Les paramètres sont réactualisés continuellement, et les pas de commande sont pris en se basant sur l'estimation courante. Cette méthode, sera meilleure que celle du premier groupe, à la condition que les paramètres du système ne changent pas beaucoup avec la variation des points de fonctionnement. Keviczky/Haber [18] ont exploré l'idée de la commande extrême auto-réglée, ils ont suggéré l'identification par moindres carrés ou par approximation stochastique pour trouver les paramètres d'un modèle de Hammerstein. L'entrée étant alors choisie à chaque pas comme si les paramètres d'estimation étaient correctes. Bamberger/Iserman [15] dont nous allons essayer d'appliquer la méthode dans ce travail, ont développé un logiciel propre, employant la méthode du gradient pour optimiser un modèle de Hammerstein. Les paramètres des parties linéaire et non-linéaire peuvent être identifiés en utilisant ou bien la méthode de la variable instrumentale ou celle de la corrélation.

1.5.5. TECHNIQUES ADAPTATIVES POSSIBLES: Toute connaissance a priori du système devrait être utilisée pour concevoir le modèle, ceci est particulièrement vrai pour les systèmes non-linéaire. On pourrait alors avoir la possibilité de choisir une structure du modèle qui permette une bonne description du phénomène non-linéaire, et qui soit linéaire dans ses paramètres inconnus pour simplifier leur identification. Si on ne possède aucune connaissance a priori des

sortie, le problème de la commande extrême est en général beaucoup plus difficile à résoudre. Mais, un cas spécial survient lorsque le signal intermédiaire entre les parties linéaires et non-linéaires peut être mesuré. On peut alors résoudre le problème par l'utilisation d'un régulateur auto-ajustable pour la partie linéaire avec une valeur de référence calculée à partir de l'optimum de la partie non-linéaire estimée. Comme avec le cas d'une non-linéarité d'entrée, cela requiert pour l'identifiabilité que le signal intermédiaire soit suffisamment riche, pour un bruit ou des perturbations délibérées. D'autres solutions existent dans la littérature.

Les paramètres connus du système: Un problème de commande duale dans le sens de FELDBAUM surgit quand le signal intermédiaire n'est pas mesuré. Voir cet exemple:

$$\underline{U}(t+1) = \underline{U}(t) + \underline{X}(t) + \underline{W}(t) \quad (I.14)$$

$$\underline{Y}(t) = \underline{U}(t)^2 + \underline{e}(t) \quad (I.15)$$

En insérant (I.14) dans (I.15) on obtient:

$$\underline{Y}(t+1) = \underline{Y}(t) + \underline{X}(t)^2 + \underline{2U}(t)\underline{X}(t) + \underline{2W}(t)[\underline{X}(t)+\underline{U}(t)] + \underline{W}(t)^2 + \underline{e}(t) \quad (I.16)$$

Qui peut être utilisée pour l'estimation par les moindres carrés, en prenant la dernière ligne comme bruit interne. une loi de commande à modèle connu peut être alors obtenue en minimisant $E[\underline{Y}(t+1) / t]$.

Paramètres inconnus: Quand les paramètres sont inconnus, il est difficile, si jamais possible de réécrire un système comme (I.14) et (I.15). Pour que la méthode des moindres carrés soit directement applicable. Quelques techniques d'estimation non-linéaire approximative sont alors nécessaires, comme le filtre de Kalman .

I.6.CONCLUSION:

ETUDE ET PROJETS DES ASSERVISSEMENTS EXTREMAUX: Decaulne [2]

La variété des types d'asservissements extrêmes est très grande, ce qui complique leur synthèse aussi bien que leur étude. Il existe en effet bien des variantes aux dispositifs que nous avons présenté, et d'autres approches pour les étudier.

A\ Il faut d'abord se donner les objectifs visés, les performances (choix du critère, erreur admise, rapidité ...) et l'environnement (bruits, perturbations).

B\ La schématisation du processus à commander et le choix des grandeurs à mesurer.

C\ Choix d'une architecture générale du système, parmi les variantes possibles. L'étude peut alors se faire sur un diagramme fonctionnel précis.

D\ L'étude des fonctions qui comporte:

a_ Etude du filtrage;

b_ détermination de la période d'échantillonnage T ;

c_ modification possible de la loi de l'élaboration du signal d'écart, après l'étude du fonctionnement;

d_ il est de même du choix de la fonction de commande. Après étude des dynamiques du système, des grandeurs de perturbation et du bruit.

E\ Calcul des performances, qui comprend notamment:

a_ Etude dynamique générale;

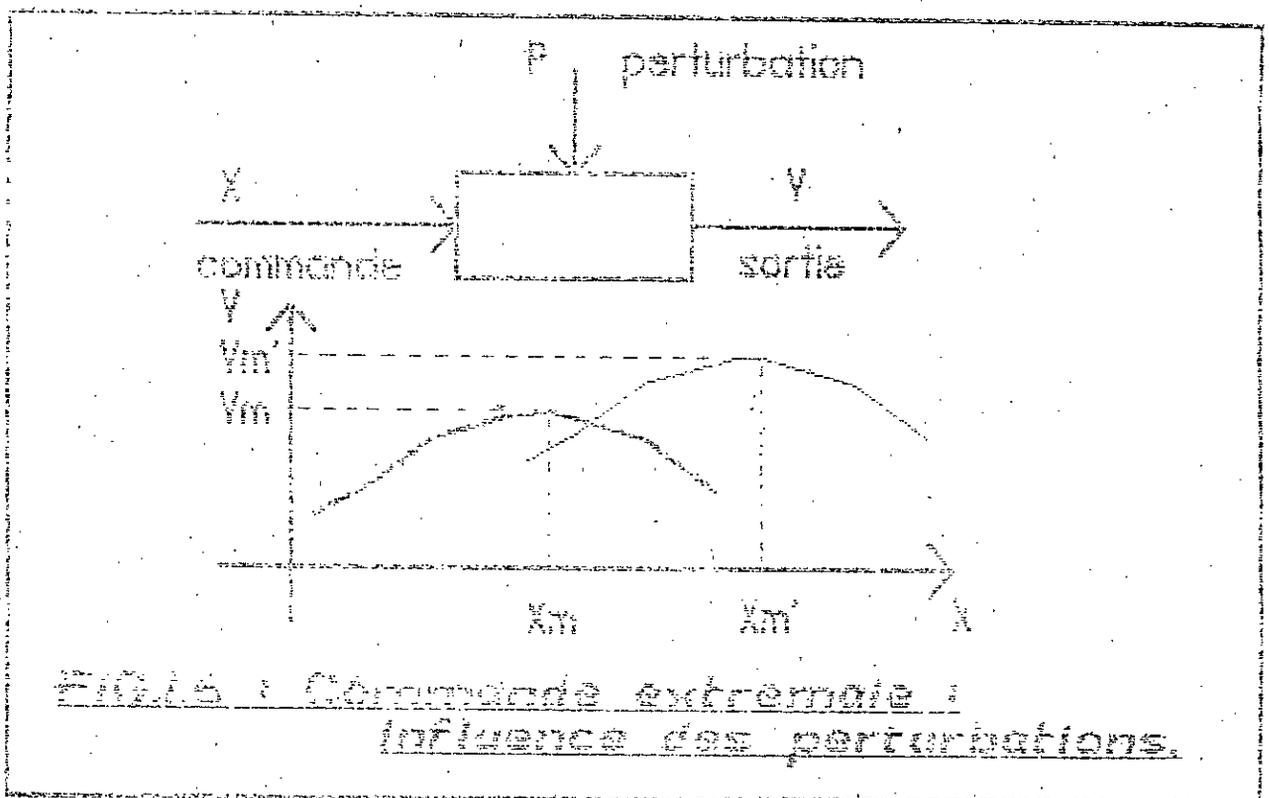
b_ analyse de la détérioration du critère (bruit, oscillation permanente, ...);

c_ étude de l'influence des perturbations (variations brusques

et dérivées): Régimes statiques;

d_ étude des commutations.

F\ Etude de réalisation: Un asservissement extrême réalise à la fois des opérations " analogiques " sur des grandeurs physiques et des opérations " logiques " sur des variables booléennes (Signes des grandeurs, synchronisation, etc...); il fait donc appel aux deux types de techniques. On conçoit que l'étude du fonctionnement d'un asservissement extrême soit difficile. C'est une des raisons pour lesquelles cette technique, malgré son grand intérêt pratique, était parfois délaissée au profit de l'optimisation avec modèle. Mais les fabuleux développements qu'ont connus et que connaissent encore les outils informatiques nous permettent d'entrevoir un horizon clair et prometteur pour la commande extrême.



DEUXIEME
PARTIE:
LE MOTEUR
D'AUTOMOBILE

II.1. INTRODUCTION

L'objet de cette partie est avant tout l'analyse fonctionnelle qualitative du système à commander, qui est le point de départ du travail de l'automaticien. Le moteur à explosion est au carrefour des disciplines scientifiques que sont la chimie, la thermodynamique et la mécanique.

II.2. BASE DE FONCTIONNEMENT DU MOTEUR 4 TEMPS A ALLUMAGE COMMANDE : (Bidan [10])

II.2.1. LE CYCLE DE BEAU DE ROCHAS :

Le moteur à 4 temps à allumage commandé appelé aussi moteur à explosion est un moteur thermique alternatif à combustion interne. Les moteurs thermiques au sens le plus large ont pour but de transformer la chaleur en énergie mécanique.

Pour les moteurs à combustion interne, c'est au sein même du fluide moteur que la chaleur est produite, par combustion ou tout au moins par réaction chimique. Dans le moteur à allumage commandé qui nous intéresse, le mécanisme utilisé pour réaliser le cycle thermodynamique est une machine à capsulisme, i.e. un mécanisme étanche réalisant des volumes variables d'une manière cyclique, ici par le mouvement de translation alternatif d'un piston dans un cylindre. C'est en 1862 qu'Alphonse Beau de Rochas a déposé un mémoire décrivant le cycle de fonctionnement du moteur alternatif 4 temps à allumage commandé.

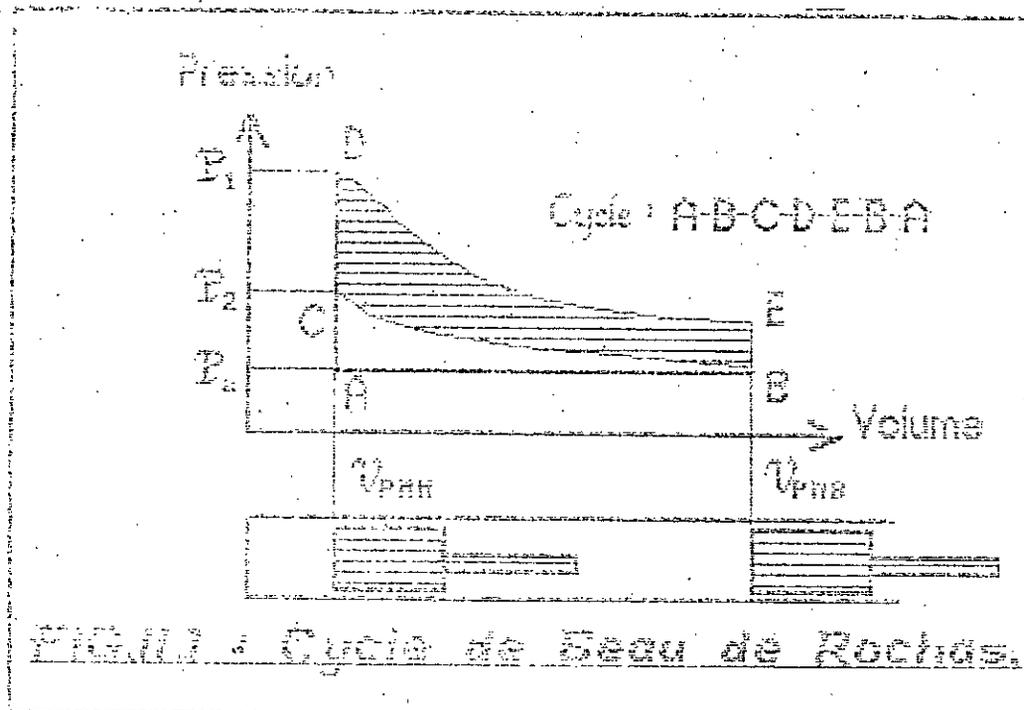
Le fluide moteur étant un mélange gazeux, il est commode de représenter le cycle obtenu par un diagramme de Clapeyron sur lequel est tracée la pression en fonction du volume. Nous supposons que le fluide est un gaz parfait qui obéit à l'équation d'état :

$$PV = nRT \quad (\text{unités S.I.}) \quad \{II.1\}$$

Du point de vue thermodynamique, nous pouvons décrire le cycle comme suit :

1\ Le temps AB constitue la phase d'admission isobare durant laquelle le mélange est aspiré à la pression atmosphérique P_a . A partir de B le cycle est fermé et le mélange va subir le cycle proprement dit.

2\ Entre B et C est réalisée une compression adiabatique i.e.



sans échange de chaleur avec l'extérieur :

$$PV = Cte \quad (II.2)$$

3\ L'apport de chaleur a lieu de C à D par combustion isochore ($V = Cte = V_{pmh}$) et adiabatique. Il s'agit de réactions chimiques exothermiques avec expansion moléculaire (le nombre de molécules avant et après combustion est différent). Si la combustion produit la chaleur Q , les gaz chauds formés, supposés parfaits, voient leur température s'élever en obéissant à la relation: $Q = Cv (T1 - T2)$ (II.3)

où Cv est la capacité calorifique à valeur constante de ces gaz exprimée en $J/^{\circ}K$. Pour un gaz parfait

$$Cv = nR / (\tau - 1) \quad (II.4)$$

Le fait d'une transformation isochore permet d'en déduire:

$$Q = (P2 - P1) V_{pmh} / \tau - 1 \quad (II.5)$$

La variation de pression, à volume constant, est proportionnelle à

- la quantité qui dépend quant à elle de la nature du mélange combustible, i.e. du comburant, du carburant et de leur proportion.
- 4\ Durant DE se déroule le temps moteur proprement dit de détente adiabatique des gaz chauds.
- 5\ En E le cylindre s'ouvre, le cycle thermodynamique se termine, et les gaz brûlés commencent à s'échapper de façon isochore entre E et B.
- 6\ Finalement, l'évacuation des gaz brûlés se poursuit de façon isobare jusqu'en A où un nouveau cycle peut commencer.
- L'exécution du cycle complet demande donc 4 courses du piston.

Travail échangé avec l'extérieur: Le travail élémentaire des forces de pression exercé globalement par les gaz sur le piston s'exprime par:

$$\delta W = (P - P_a) dV \quad (II.6)$$

où P est la pression dans le cylindre si l'on suppose que la face antérieure du piston est soumise à la pression atmosphérique P_a . Dans notre cas :

$$\begin{aligned} W &= W_{AB} + W_{BC} + W_{CD} + W_{DE} + W_{EB} + W_{BA} && \text{qui devient:} \\ W &= W_{BC} + W_{DE} && (II.7) \end{aligned}$$

Le travail fourni à l'extérieur est ainsi constitué de la différence entre la surface sous-tendue par DE et la surface sous-tendue par BC, représenté par la surface hachurée de la figure (FIG.II.1). Le calcul de ce travail donne:

$$W = Q \left[1 - \left(\frac{V_{pmh}}{V_{pmb}} \right)^{\gamma-1} \right] \quad (II.8)$$

Donc le travail est strictement proportionnel à la chaleur apportée par la combustion quelle que soit sa valeur.

Rendement thermodynamique idéal: Le rendement thermodynamique,

défini comme le rapport de la chaleur consommée au travail produit, n'est autre que le facteur de proportionnalité de la relation précédente :

$$\xi_{br} = 1 - 1/(V_{pmb}/V_{pmh})^{\tau-1} \quad \{II.9\}$$

Cette expression montre que le rendement du cycle croît avec le rapport V_{pmb}/V_{pmh} appelé rapport volumétrique noté : σ .

II.2.2. Mise en oeuvre du cycle :

II.2.2.1. Description du capsulisme :

L'enceinte à l'intérieur de laquelle se déroule le cycle est constituée d'un cylindre dont l'une des extrémités est fermée par une culasse dans laquelle sont aménagées des orifices d'entrée et de sortie des gaz (obturables le plus souvent au moyen de soupapes), et l'autre extrémité est définie par la tête du piston. Le mouvement du piston est dans le cylindre est contraint par un système bielle-manivelle (manivelle appelée aussi vilebrequin) sur lequel est récupéré le travail mécanique. Le mouvement de translation du piston est ainsi transformé en mouvement de rotation. On peut bien sûr associer sur un même vilebrequin plusieurs pistons et réaliser ainsi un moteur multicylindre. Nous allons analyser qualitativement le cycle 4 temps sur un cylindre. (Fig. II.1).

1^{er} temps : Admission (AB) :

A cause de l'inertie et des frottements de l'air sur les parois et du passage de la soupape, l'admission accuse en général une légère dépression qui justifie un retard à la fermeture de la soupape (R.F.A.).

2^{ème} temps : Compression (BC) :

D'abord réchauffés par les parois dont la température est supérieure, les gaz sont ensuite refroidis lorsque la différence de la température s'inverse.

3ème temps : Combustion, Détente :

La combustion n'est pas instantanée vis-à-vis du mouvement du piston. De ce fait, son initiation par étincelle est déclenchée avant le point mort haut et la combustion se poursuit au début de la détente.

4ème temps : Echappement :

La soupape d'échappement est ouverte avant le PMB (A.O.E) afin que la pression des gaz brûlés chute suffisamment pour ne pas freiner exagérément le piston lors de sa remontée (EA).

Rendement mécanique :

Le rendement mécanique est par définition le rapport entre le travail mécanique W_m récupérable en sortie du moteur et le travail des forces de pression sur le piston :

$$R_m = \frac{W_m}{W} \quad \{II.10\}$$

A cause des diverses pertes par frottement, il ne peut atteindre dans le meilleur des cas que 90 % pour un moteur à explosion.

II.2.2.2. Caractéristiques du cycle réel :

La figure (fig. II.2) représente schématiquement le cycle réel obtenu dans un moteur à piston. Ce cycle s'écarte sensiblement du cycle théorique pour les raisons que nous avons énoncé précédemment. De plus, un travail négatif représenté par la surface S2 apparaît sur l'ensemble des temps d'admission et d'échappement.

Rendement de forme :

Les motoristes ont défini la notion de rendement de forme R_f permettant de comparer le cycle réel au cycle de Beau de Rochas. C'est

macroscopique normalisée caractérisant les proportions de carburant et de comburant dans un mélange combustible. La normalisation de cette grandeur nécessite au préalable la définition du mélange neutre appelé aussi mélange stochiométrique qui est un mélange combustible contenant la proportion de comburant (air) juste nécessaire pour oxyder totalement le carbone, l'hydrogène et le soufre composant le combustible, avec l'aide éventuelle de l'oxygène que ce combustible peut contenir, mais sans qu'il reste aucun résidu d'oxygène utilisé.

Le mélange stochiométrique possède un rapport en masse carburant/comburant de :

$$\left. \frac{M_c}{M_a} \right|_s = \frac{1}{15} \quad \{\text{II.12}\}$$

Il varie bien sûr avec la composition de l'essence, voire avec celle de l'air. La richesse d'un mélange est définie comme :

$$\underline{r} = \frac{M_c}{M_a} * \left. \frac{M_a}{M_c} \right|_s = \frac{M_c}{M_a} * 15 \quad \{\text{II.13}\}$$

Il résulte de cette définition que les mélanges pauvres (en combustible) ont une richesse plus petite que 1, et les mélanges riches une richesse plus grande que 1.

Pour mémoire, R_c varie de 0.65 à 0.9 dans la plage de richesse couramment utilisée sur les moteurs à explosion.

Combustion et rendement de forme :

Nous nous sommes intéressés jusqu'à présent à la combustion sur le plan thermodynamique, alors que sa durée est aussi un paramètre important, car elle entraîne des déformations du cycle préjudiciables au rendement de forme.

A partir de l'allumage, le processus de combustion peut être divisé en 3 phases : Arqués [1]

- Délai d'inflammation.
- Combustion principale.
- Achèvement de la combustion.

De manière schématique, on peut dire que c'est avant tout la richesse du mélange, variable commandable, qui influence le rendement de forme.

AVANCE A L'ALLUMAGE

Le fait que la combustion possède une durée et un délai d'inflammation variable en fonction du régime de la richesse du mélange, montre la nécessité de régler le point d'allumage par rapport au cycle moteur si l'on veut maximiser le rendement de forme. La notion d'avance à l'allumage est communément admise pour repérer le point d'allumage : C'est l'angle compté positivement dans le sens inverse de celui de la rotation du moteur, entre la position angulaire du vilebrequin au point d'allumage et le PMH de fin de compression.

II.3. NECESSITE DE LA COMMANDE

DE LA RICHESSE ET DU POINT D'ALLUMAGE:

II.3.1. La consommation et les normes anti-pollution: Depuis 1974, date de la première crise du pétrole, la recherche d'économies d'énergie sur le véhicule automobile n'a cessé de progresser. Parallèlement, le problème de la pollution atmosphérique occasionné par le trafic automobile, surtout en milieu urbain où il est particulièrement dense, a donné lieu à une réglementation de plus en plus sévère sur les émissions de gaz toxiques, sous la forme des différentes normes anti-pollution. Dès lors, la course à la consommation spécifique (i.e., à la masse de carburant utilisée par une unité de travail fournie) la plus basse possible, sous des contraintes de pollution a donné une nouvelle orientation à l'évolution des moteurs à explosion, favorisant la mise en oeuvre de

technologies et d'organes de commande de plus en plus évolués.

II.3.2. Amélioration des rendements: L'étude réalisée plus haut conduit à l'expression suivante:

$$R = \frac{Q}{W} = f_{br} R_c R_f R_m \quad (II.14)$$

Q : chaleur théoriquement récupérable de la combustion complète du carburant.

R_c : rendement de combustion.

f_{br} : rendement thermodynamique théorie.

W : travail mécanique effectivement récupéré sur le vilebrequin.

Analysons maintenant les paramètres de fonctionnement permettant de d'améliorer ces rendements.

II.3.2.1. Rendement de combustion: Il dépend principalement de la richesse et de l'homogénéité du mélange.

Le maximum est obtenu pour un mélange d'autant plus pauvre que l'homogénéisation est meilleure, gage d'une combustion plus complète. Le réglage de la richesse à l'optimum est très sensible, car il correspond pratiquement à la limite de stabilité de la combustion en mélange pauvre (ce réglage varie de 0.7 à 0.85 selon le type de moteur).

II.3.2.2. Rendement thermodynamique: Il croît avec le rapport volumétrique, qui est lui-même limité par l'apparition du cliquetis.

Le cliquetis, appelé aussi cognement, demeure le problème majeur sur les moteurs à fort taux de compression. Il apparaît durant la phase finale d'une combustion déflagrante (par ailleurs tout à fait normale), et correspond à l'inflammation brutale en régime détonant du mélange restant, à partir de l'instant où, durant la combustion

normale, un certain seuil de pression et de température (dépendant de la température d'inflammation spontanée du mélange), est dépassé. Serruys [6] . Le cliquetis, de par les élévations locales de température qu'il entraîne dans la chambre de combustion (tête du piston) ainsi que les ondes de choc accompagnées d'oscillations de pression, est extrêmement destructeur pour le moteur. L'apparition du cliquetis est d'autant plus probable que le rapport volumétrique et la pression d'alimentation sont élevés et que la température d'inflammation spontanée du mélange est basse (i.e. son indice d'octane est faible). Il nous faudra donc pour l'éviter, pouvoir détecter les conditions de son apparition probable (plutôt que seulement sa présence comme cela se fait maintenant), à cause de l'hystérésis important qui le caractérise.

II.3.2.3. Rendement de forme: Pour un moteur donné il dépend d'abord de la richesse, de la densité du mélange admis et de l'avance à l'allumage, en second lieu du régime moteur.

Le point de fonctionnement optimal recherché en avance et en richesse, nous permet d'obtenir un bon compromis entre rendement de forme et de combustion.

II.3.2.4. Rendement mécanique: Il dépend quasi-uniquement du régime; et est pratiquement indépendant de nos variables commandables. Il est à noter qu'il est donc souhaitable de rechercher la puissance à bas régime, car les pertes mécaniques augmentent avec le régime moteur.

** RESUME **

En définitive, pour un moteur donné et en ce qui concerne les paramètres commandables en temps réel, le rendement global est maximum

pour les mélanges pauvres, avec une avance optimisant le rendement de forme.

II.3.3. Nature des émissions de polluants: Raynal [6]

En utilisation normale, il existe trois sources de pollution sur un véhicule automobile :

- _ Les vapeurs d'essence dégagées par le système de stockage et de distribution du carburant du véhicule.
- _ Les gaz du carter, composés d'huile et d'essence mélangées avec des résidus de combustion.
- _ Les gaz d'échappement.

Si les deux premières ont été quasiment supprimées par des dispositifs appropriés tels que le piégeage des vapeurs d'essence au moyen de charbon actif ou de système à condensation, ainsi que la réaspiration des gaz du carter par le système d'admission du moteur, la troisième source de pollution demeure une préoccupation majeure à l'heure actuelle. Théoriquement parmi les produits de la combustion complète d'un hydrocarbure en présence d'air, seul le dioxyde de soufre est toxique, mais il est émis en faible quantité.

En pratique néanmoins on note en général la présence de plusieurs autres composés dont principalement :

- * Le monoxyde de carbone (CO).
- * Les hydrocarbures imbrûlés (HC).
- * Les oxydes d'azote (NO , NO₂) notés NO_x .
- * Des composés de plomb.

Le plomb tend actuellement à être supprimé comme additif anti-détonant et la recherche porte sur son remplacement.

Monsieur Bidan [10] dans sa thèse de doctorat, démontre que les

émissions des gaz imbrûlés Hc et du CO₂ sont minimales lorsque la puissance du moteur est maximale, mais que les NOx sont alors à leur taux d'émission maximal.

Cela nous révèle un intérêt supplémentaire pour la commande extrémale, qui permettra de diminuer considérablement la pollution de l'air. Quant aux NOx, le fait d'éliminer les autres polluants nous laisse le loisir de bien les cibler par les filtres chimiques classiques qui gagneraient alors en efficacité.

II.3.4. Problèmes de commande sur le groupe motopropulseur :

II.3.4.1. Commande de la masse d'essence

A) Régime permanent :

a) Injection mélangée indirecte :

En régime permanent tout d'abord, c'est-à-dire à régime de rotation et à ouverture du papillon constante, et lorsque le moteur a atteint sa température de fonctionnement l'approche classique est d'ajuster la richesse du mélange et l'avance à l'allumage sur banc moteur et de les mémoriser (analogiquement ou numériquement) de manière à assurer une consommation minimale tout en respectant les contraintes de pollution. On applique notre indépendamment à chaque injection sur un moteur L'étape suivante étant constituée par la régulation en boucle fermée autour du point de consigne cartographique.

B) Régime transitoire :

II.3.4.2. Commande de la masse d'air

L'utilisation réelle d'un moteur à essence sur une automobile remplit rarement les conditions du régime permanent. D'abord, après un démarrage, l'équilibre thermique du moteur n'est atteint qu'à la suite d'une phase de mise en température, ensuite les changements fréquents de vitesse du véhicule avec les variations de puissance qu'ils nécessitent conduisent à un mode de fonctionnement essentiellement dynamique du moteur.

II.3.4.3. Commande du point d'allumage :

Un système d'allumage se divise en deux parties :

- l'étage de commande qui crée l'énergie à l'allumage pour chaque point de fonctionnement.
- l'étage de puissance qui crée l'énergie électrique.

air \underline{ra} et celui en essence \underline{re} qui déterminent la qualité et la nature du mélange admis.

Définitions :

- \underline{ra} : Grandeur normalisée sans dimensions définie par le rapport entre la masse d'air frais M emprisonnée par un cylindre durant l'admission considérée et la masse d'air qu'il pourrait théoriquement aspirer entre le PMH et le PMB dans les conditions normales (1 bar, 20 °C) :

$$\underline{ra} = \frac{M}{M_{cn}} \quad \text{où} \quad M_{cn} = \rho_m * V_{pmb} * \left(1 - \frac{1}{\sigma}\right) * \frac{P_a}{RT_a} \quad \{\text{II.15}\}$$

- \underline{re} : Le rapport entre la masse d'essence admise m et la masse d'essence m_{cn} contenue dans un mélange stochiométrique pour un taux de remplissage en air donné :

$$\underline{re} = \frac{m}{m_{cn}} \quad \text{avec pour l'essence} \quad m_{cn} = \frac{M_{cn}}{15} \quad \text{on tire :}$$

$$\underline{re} = \frac{15 m}{M_{cn}} \quad \{\text{II.16}\}$$

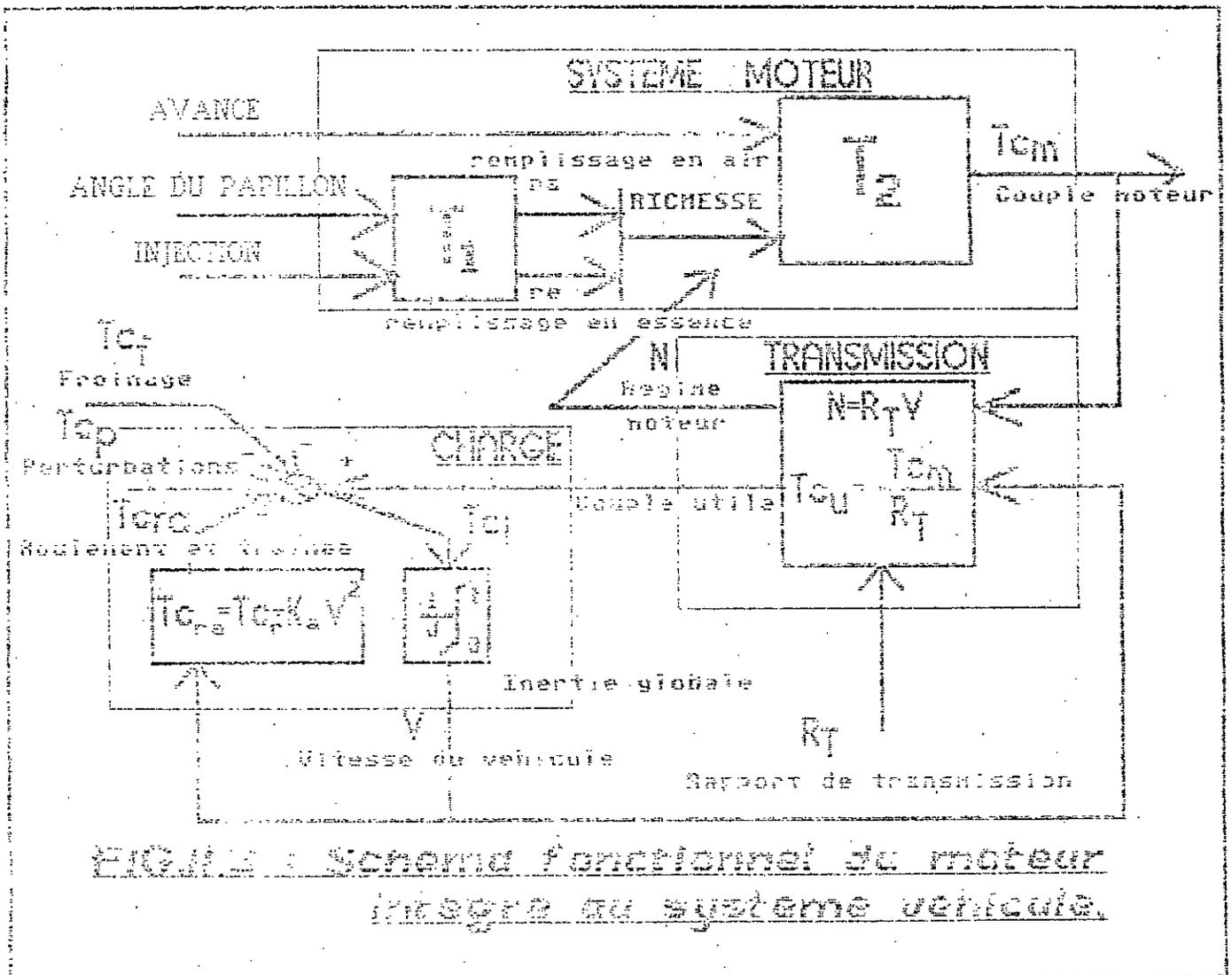
Remarque :

La richesse du mélange admis est alors :

$\underline{ri} = 15 \underline{m}$ que l'on écrit avec les définitions M précédentes :

- **Ouverture du papillon** : La position angulaire du papillon Φ permettant d'agir sur le remplissage en air global du moteur.

b) Avance à l'allumage : L'avance à l'allumage \underline{Av} constitue



une variable directement commandable.

II.5.2.3. Variables de sortie:

- **Couple moteur:** Note T_c , il dépend de la qualité globale du mélange, de sa richesse et de son point d'allumage, mais aussi du régime de rotation du moteur.

II.5.2.4. Schéma général: Bidan [10] s'est intéressé à la

modélisation du bloc T1 et T2, quant à nous, nous supposons que r_i est directement commandable, ce qui suppose une commande classique indépendante de la notre où r_i suivrait une référence et Φ , T_i et α_i seraient les variables à commander réellement. Donc, nous allons juste nous intéresser au bloc T2 qui a comme fonction : la conversion de l'énergie chimique en énergie mécanique au sein du moteur.

II.5.3. Modélisation du transfert moteur via le couple :

II.5.3.1. Couple-Richesse : Bidan [10]

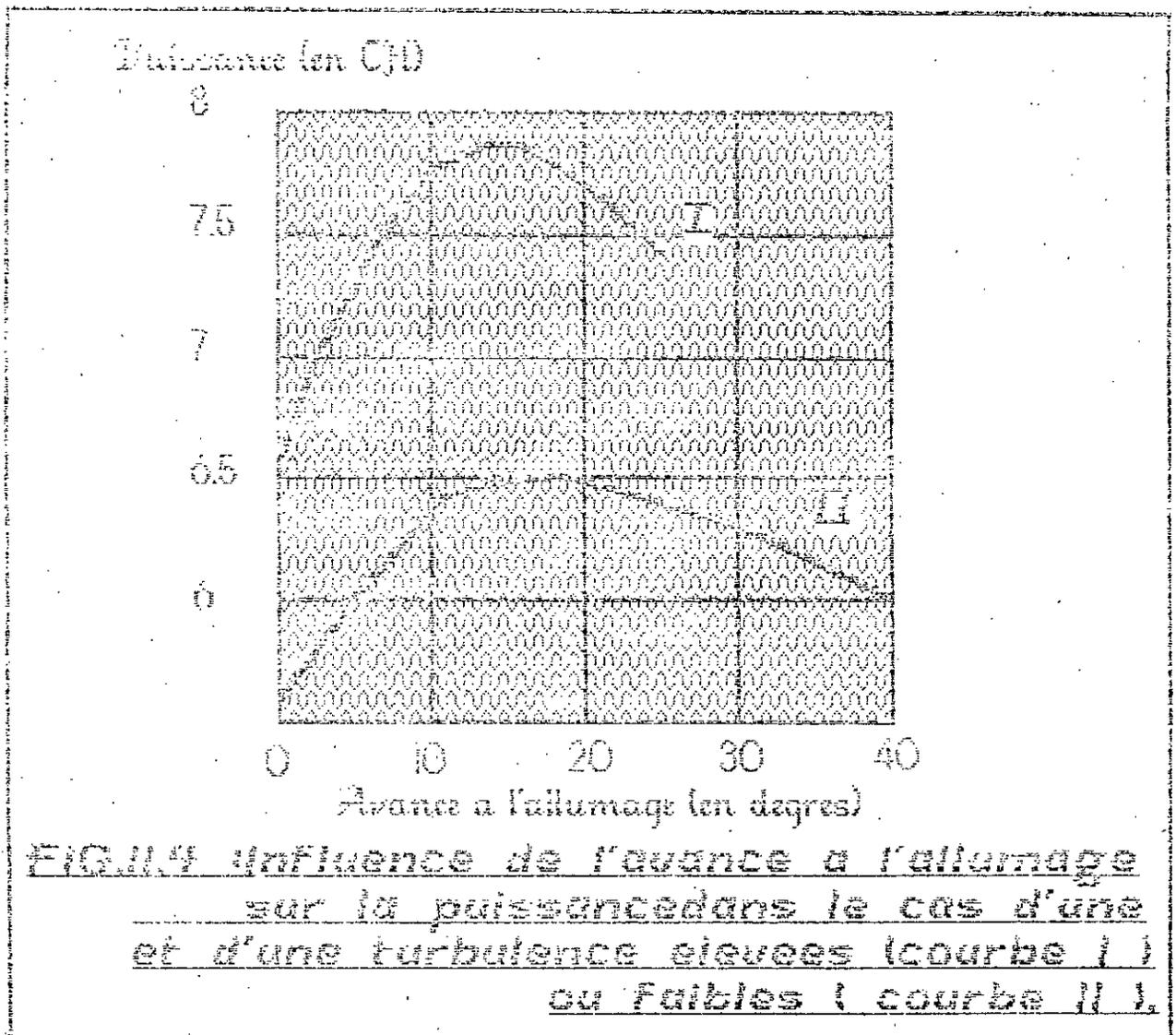
MODELE DE BASE PROPOSE :

Sur un banc d'essai, on a effectué les mesures du couple moteur pour différentes valeurs de Richesse et de Vitesse, ce qui a permis d'identifier et de valider un modèle approximatif de la forme :

$$T_{cm} = a_0 * r_a * \{1 - a_1 * [r_i - r_{in}]^2\} - T_{cf} - a_2 * N - a_3 * N^2 \quad \{\text{II.18}\}$$

II.5.3.2. Couple-Avance : Serruys [8]

On prévoit a priori que l'avance à l'allumage doit avoir une influence très marquée sur la puissance développée et la consommation spécifique obtenue, puisque c'est de sa valeur que dépend essentiellement la forme, donc la surface du diagramme pression-volume, et par conséquent le travail produit.



MODELE PROPOSE: On effectue plusieurs essais avec différentes valeurs de l'angle d'avance à régime constant et Richesse optimale, ce qui donne la courbe de la figure (FIG.II.4) et qui nous permet de valider une caractéristique parabolique qu'on peut écrire:

$$T_{cm} = c_0 + c_1 \underline{Av} + c_2 \underline{Av^2} \quad (II.23)$$

57

II.5.3.3: Modèle mathématique global:

Le Dr Duan [11] a développé un modèle assez réaliste du moteur à allumage commandé de la forme:

$$T_c = C_1 + C_2 \text{Map} + C_3 \underline{R_i} - C_4 \underline{R_i^2} + C_5 \underline{A_v} - C_6 \underline{A_v^2} + \\ + C_7 \underline{A_v} * N + C_8 N + C_9 N^2 \quad (\text{II.24}) \quad \text{avec:}$$

T_c : Couple moteur de sortie (Nm).

C_1-9 : Coefficients de régression.

Map : Flux de la masse d'air dans la chambre de comb. (Kg/Hr) R_i : Richesse.

A_v : Avance à l'allumage (°).

N : Régime moteur (tr/min).

La dernière charge utilisée dans l'obtention de la puissance d'un cylindre donné est induite un cycle au paravant. Un modèle simple est obtenu par Powell [20] en définissant une constante de temps du couple moteur (t_e sec) et en l'appliquant à l'équation (II.24) :

$$t_e \frac{dT_c}{dt} + T_c = C_1 + C_2 \text{Map} + C_3 \underline{R_i} - C_4 \underline{R_i^2} + C_5 \underline{A_v} + C_6 \underline{A_v^2} + \\ + C_7 \underline{A_v} N - C_8 N - C_9 N^2 \quad (\text{II.25})$$

II.6. CONCLUSION :

Nous avons donc pu obtenir un modèle approximatif du moteur à combustion interne d'automobile, et prouver par là-même la nature quadratique de la linéarité de la caractéristique reliant le rendement, la puissance ou le couple moteur au deux variables indépendantes qui sont la Richesse du carburant et le degré d'avance à l'allumage. Nous pouvons donc appliquer la fameuse commande extrême à ce processus.

TROISIEME PARTIE:

**SYNTHESE DE LA
COMMANDE**

III.1.INTRODUCTION

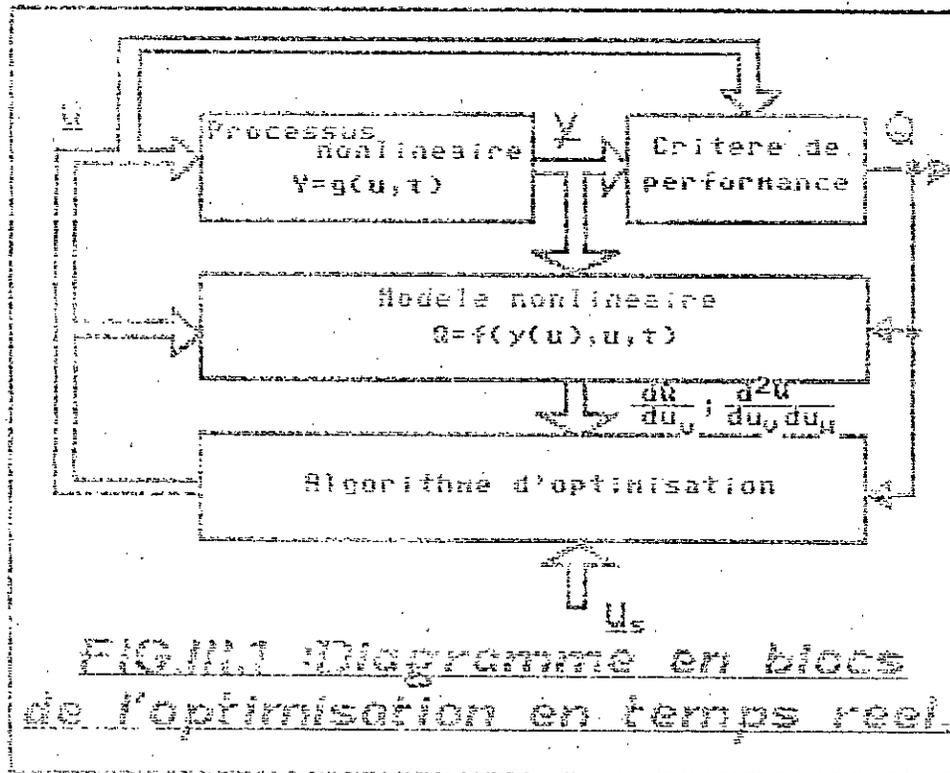
Rappelons d'abord notre but dans cette étude, c'est l'optimisation du couple moteur et donc du rendement (il est montré dans la partie II que les deux ont le même comportement) du moteur à allumage commandé d'automobile et ce, en jouant sur l'angle d'avance à l'allumage et la richesse de l'essence.

Après une bonne lecture de la partie I , il n'est plus évident, comment aborder la synthèse de la commande extrême, vu le grand nombre de méthodes et d'approches possibles. Néanmoins, après une étude détaillée et à notre avis, la technique élaborée par W.Banberger et R.Isermann en 1978 [15] , est la meilleure pour ce genre d'applications, encore qu'il faut la remettre à jour et l'adapter aux problèmes affrontés.

C'est une méthode rapide d'optimisation en temps réel, qui détermine le comportement statique des processus dynamiques en identifiant un modèle non-linéaire et en déterminant des entrées optimales pour augmenter l'efficacité opérationnelle.

III.2.PRESENTATION DE LA METHODE UTILISEE:

III.2.1.Plan d'attaque: Nous voulons optimiser en temps réel le comportement statique du processus dynamique en une période relativement courte. Dans la phase de départ, les entrées indépendamment variables sont excitées par un signal-test spécial. Un modèle du processus dynamique non-linéaire est identifié en temps réel. En se basant sur la partie statique du modèle et les entrées connues, on calcule les gradients de l'Indice de performance. Un algorithme d'optimisation les utilise pour faire converger les entrées vers leurs valeurs optimales. L'identification continue, et la



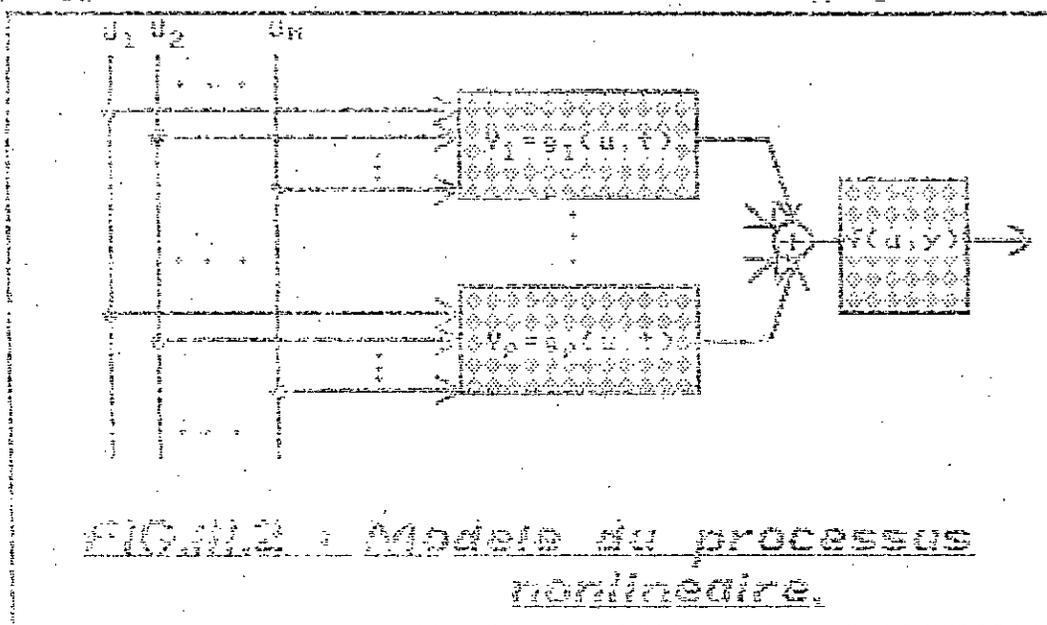
prédiction de l'optimum s'améliore dans la dernière phase. Les entrées prennent alors leurs valeurs optimales, et le processus de même tend vers son état statique optimal.

III.2.2. Elements de base: Nous savons que pour atteindre l'état optimal le plus rapidement possible, il faut tenir compte des dynamiques. Dans les années 70, cette méthode était proposée pour les processus lents (processus thermal pilote) et qui nécessitent un calcul relativement rapide de la commande optimale. De nos jours , avec le niveau de développement atteint dans les outils informatiques, il nous est demandé pour des processus très rapide, un rapport temps

de calcul/temps de convergence aussi petit sinon plus petit encore.
 Pour la description mathématique des conduites optimales de travail, un critère d'optimisation:

$$\underline{Q} = f(\underline{U}, \underline{Y}) = f(\underline{U}, \underline{Y}(U,t)) \quad (III.1)$$

doit être utilisé et qui relie l'indice de performance \underline{Q} en régime établi à l'entrée mesurable \underline{U} et la sortie \underline{Y} . L'équation (III.1)



est une relation algébrique de \underline{U} et \underline{Y} , où $\underline{Y} = g(\underline{U}, t)$ décrit le modèle du processus non-linéaire. La figure (FIG.III.1) montre un diagramme en blocs de la méthode présentée.

On suppose a priori, que la relation entre l'entrée \underline{U} et la sortie \underline{Y} est décrite par un modèle non-linéaire. L'I.P. \underline{Q} est calculé en suivant l'équation (III.1). En se basant sur les signaux mesurés d'entrée et de sortie, un modèle global non-linéaire et dynamique $\underline{Q} = f(\underline{U}, \underline{Y})$ est identifié par l'estimation des paramètres; cf.(FIG.III.2). Le modèle contient une partie statique:

$$\bar{Q} = \bar{f}(\bar{U}, \bar{Y}) \quad (III.2)$$

61

Seul ce modèle statique, obtenu pendant la phase transitoire, est appliqué pour chercher l'entrée optimale \underline{U} pour l'optimisation de \underline{Q} en utilisant des techniques de Gradients d'ordre plus élevé. Pour commencer la procédure, un signal -test \underline{U} , qui doit vérifier certaines conditions, est utilisé pour accélérer l'identification du processus. Après l'obtention d'un modèle grossier, l'optimisation commence à donner des changements additionnels à l'entrée \underline{U} . Dès lors si le modèle du processus statique et la procédure appelée Montée de colline (Hill Climbing) ont convergé, \underline{U}_{opt} est identifié et peut être fixé. Le processus s'établit alors à son point de fonctionnement optimal \underline{Q}_{opt} selon les dynamiques du processus. La dernière phase est réalisée en boucle ouverte pour éviter les changements autour du point extrême. Les informations a priori sur le modèle du processus sont relativement très limitées. Les dynamiques du processus n'ont pas à être exactement connu parce que le modèle du système suit aussi les processus variants dans le temps par l'estimation récursive des paramètres avec un facteur d'oubli exponentiel, et le point de fonctionnement n'est pas alors fixé définitivement, il sera poursuivi s'il venait à changer. Cette optimisation est donc une procédure adaptative.

III.2.3. Modèle du processus non-linéaire: On suppose que le processus est stable et peut être approximé par un modèle non-linéaire. Le modèle utilisé du processus, prend en compte n différentes entrées: $\underline{U} = [\underline{U}_1, \underline{U}_2, \dots, \underline{U}_v, \dots, \underline{U}_n]$ et p sorties différentes: $\underline{Y} = [\underline{Y}_1, \underline{Y}_2, \dots, \underline{Y}_1, \dots, \underline{Y}_p]$ et une relation analytique $\underline{Q} = f(\underline{U}, \underline{Y})$ ou juste $\underline{Q} = f(\underline{Y})$ qui relie l'I.P. \underline{Q} aux données mesurables; cf. (FIG.III.2). Chaque sortie \underline{Y}_1 est supposé.

62

$$\begin{aligned}
 A_{11}(q^{-1}) &= 1 + a_{111} q^{-1} + \dots + a_{11m} q^{-m} \\
 A_{11}(q^{-1}) &= 1 + A_{11}(q^{-1}) \\
 B_{1v\mu}(q^{-1}) &= b_{1v\mu 1} q^{-1} + \dots + b_{1v\mu m} q^{-m} \quad (III.4)
 \end{aligned}$$

Les indices des polynômes B sont organisés de la sorte:

B_{1v0} pour les signaux U_v ;

$B_{1v\mu}$ pour les signaux $U_v U_\mu$; $v, \mu = 1, 2, \dots, n$

III.2.4. Identification du processus: L'optimisation en temps

réel basée sur un modèle paramétrique du processus requière une estimation récursive des paramètres inconnus du processus dans les polynômes $A(q^{-1})$ et $B(q^{-1})$.

L'équation (III.3) est écrite maintenant sous la forme:

$$Y_1(K) = \phi^T(K) \theta(K) \quad (III.5)$$

où $\phi^T(K) = [1 \quad U_1(K-d) \quad \dots \quad U_1(K-d-m)$

$$U_{1^2}(K-d) \quad \dots \quad U_{1^2}(K-d-m)$$

$$U_v(K-d) \cdot U_\mu(K-d) \quad \dots \quad U_v(K-d-m) \cdot U_\mu(K-d-m)$$

$$U_{n^2}(K-d) \quad \dots \quad U_{n^2}(K-d-m)$$

$$Y_1(K-1) \quad \dots \quad Y_1(K-m)] \quad (III.6)$$

et $\theta = [b_{000} \quad b_{101} \quad \dots \quad b_{110m} \quad b_{111} \quad \dots \quad b_{111m}$

$$b_{1v\mu 1} \quad \dots \quad b_{1v\mu m} \quad \dots \quad b_{1nn1} \quad \dots \quad b_{1nnm}$$

$$-a_{111} \quad \dots \quad -a_{11m}] \quad (III.7)$$

L'estimation des moindres carrés récursifs de $\bar{\theta}$ est donnée sous la forme : Landau [4]

$$\bar{\theta}(K+1) = \bar{\theta}(K) + \lambda(K) [\frac{Y_1(K) - \phi^T(K+1) \cdot \bar{\theta}(K)}{\phi^T(K+1) \cdot P(K) \cdot \phi(K+1) + \lambda}] \quad (III.8)$$

$$\text{et } \lambda(K) = P(K) \cdot \phi(K+1) / [\phi^T(K+1) \cdot P(K) \cdot \phi(K+1) + \lambda] \quad (III.9)$$

$$P(K+1) = [I - \lambda(K) \cdot \phi^T(K+1)] \cdot P(K) / \lambda \quad (III.10)$$

$$\text{avec } P(0) = G \cdot I, \quad G \gg 1000 \quad (III.11)$$

et $\theta(0) = 0$

(III.12)

λ introduit une pondération exponentielle des données passées dQes à la fonction de coût :
$$J = \sum_{i=m+d}^k \lambda^{k-i} e(i)$$

L'estimation par les moindres carrés converge vers les paramètres réels seulement pour l'équation du modèle de Hammerstein et avec un filtre $1/A_{11}(q^{-1})$ qui n'est pas pratiquement réalisable.

Pour cela, la méthode des variables instrumentales sera utilisée dans la suite. Cette méthode converge pour un bruit stationnaire arbitraire. Landau [4]

Dans l'optimisation du régime établi, seul le modèle du comportement statique du processus est requis. Cela est obtenu à partir des équations (III.3) et (III.4) en mettant $q = 1$. (La règle de la valeur finale pour la transformée en Z). Donc :

$$Y_1 = \frac{b_{00}}{A_{11}(1)} + \frac{B_{110}(1)}{A_{11}(1)} U_1 + \frac{B_{111}(1)}{A_{11}(1)} U_1^2 + \dots + \frac{B_{1vR}(1)}{A_{11}(1)} U_v U_R + \dots + \frac{B_{1nn}(1)}{A_{11}(1)} U_n^2 \quad (III.13)$$

III.2.5. Optimisation du régime établi: Pour l'estimation du régime établi, des algorithmes du gradient sont utilisés :

$$U(K+1) = U(K) - \Gamma(K) \frac{\delta Q}{\delta U} (\bar{\theta}, K) \quad (III.14)$$

où, (cf. (FIG. III,2))

$$\frac{\delta Q}{\delta U_v} = \left[\frac{\delta Q}{\delta Y} \right]^T \left[\frac{\delta Y}{\delta U_v} \right] \quad (III.15)$$

et
$$\left[\frac{\delta Q}{\delta Y} \right]^T = \left[\frac{\delta Q}{\delta Y_1} \quad \frac{\delta Q}{\delta Y_2} \quad \dots \quad \frac{\delta Q}{\delta Y_p} \right] \quad (III.16)$$

peut être déterminée par le critère d'optimisation (III.1) . Les éléments du vecteur :

$$\left[\frac{\delta Y}{\delta U_v} \right]^T = \left[\frac{\delta Y_1}{\delta U_v} \quad \dots \quad \frac{\delta Y_1}{\delta U_v} \quad \dots \quad \frac{\delta Y_p}{\delta U_v} \right] \quad (III.17)$$

résultent directement du modèle statique identifié. l'équation

paramétrique;

$$\frac{\delta Y_1(K)}{\delta U_v} = \frac{B_{v0}(1)}{A_{11}(1)} + \sum_{\mu=1}^n \frac{B_{v\mu}(1)}{A_{11}(1)} \frac{U_{\mu}(K)}{A_{11}(1)} + 2 \frac{B_{vv}(1)}{A_{11}(1)} \frac{U_v(K)}{A_{11}(1)} \quad (III.18)$$

Une longueur de pas optimale $U(K)$ est obtenue en utilisant la méthode de Newton-Raphson. Cela mène à:

$$\Gamma^{-1}(K) = \begin{bmatrix} \frac{\delta^2 Q(K)}{\delta U_1^2} & \dots & \frac{\delta^2 Q(K)}{\delta U_1 \delta U_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\delta^2 Q(K)}{\delta U_n \delta U_1} & \dots & \frac{\delta^2 Q(K)}{\delta U_n^2} \end{bmatrix} \quad (III.19)$$

Cette méthode génère des pas optimaux seulement pour des caractéristiques non-linéaires du second ordre. Comme la méthode de Newton-Raphson est sensible aux paramètres erronés du modèle mathématique, tous les gradients $\frac{\delta^2 Y_1}{\delta U_v \delta U_{\mu}}$ doivent être filtrés passe-bas. La correction optimale au temps K est: Zypkin [9]

$$Y_{1v\mu}(K+1) = Y_{1v\mu}(0) + \alpha \sum_{i=1}^K \frac{\delta^2 Y_1[\theta(i), U(i)]}{\delta U_v \delta U_{\mu}} \quad (III.20)$$

et sa version récursive:

$$Y_{1v\mu}(K+1) = Y_{1v\mu}(K) + \alpha \frac{\delta^2 Y_1(K)}{\delta U_v \delta U_{\mu}} \quad (III.21)$$

avec la condition initiale:

$$Y_{1v\mu}(0) = 1 \text{ Sign} \left(\frac{\delta^2 Y_1(0)}{\delta U_v \delta U_{\mu}} \right) \quad (III.22)$$

Dans le but d'accélérer l'optimisation, un signal-test additif U_s est appliqué, cf. (FIG. III.1), utilisant des signaux $U_{sv}(K) = \alpha v(K)$ pseudo-aléatoires à trois niveaux pour chaque entrée $U_v(K)$. L'algorithme de recherche devient:

$$U(K+1) = U(K) - [I + \beta \epsilon(K)] \Gamma^{-1}(K) \frac{\delta Q}{\delta U}(0, K) \quad (III.23)$$

avec:

$$\epsilon(K) = \begin{bmatrix} \epsilon_1(K) & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \epsilon_n(K) \end{bmatrix} \quad (III.24)$$

ev peut prendre les valeurs $-U_{sv}$, 0 , $+U_{sv}$.

β est un facteur de pondération pour diminuer l'amplitude du signal-test ; dans le cas de la convergence ($2 \leq \beta \leq 5$)

Pour commencer l'optimisation en régime établi, les paramètres suivants doivent être sélectionnés a priori :

- _ n le nombre des entrées linéaires indépendantes U_v .
- _ q nombre des sorties Y_l .
- _ m l'ordre du Processus.
- _ d le temps de retard du processus.
- _ L'équation algébrique du critère de performance Q .
- _ Les amplitudes U_{sv} des signaux tests U_{sv} .
- _ La période d'échantillonnage T_0 .
- _ Les facteurs d'amortissement α et de pondération β .
- _ La valeur ξ du seuil.
- _ La zone morte Q_{opt} pour la phase de supervision.

III.2.4. Phases de l'Optimisation en régime établi: Nous avons d'abord, vérifié la méthode présentée sur un exemple simple proposé par Bamberger et Isemann [15] :

$$U_n(k) = 1 + 2 U(k) - 0.25 U^2(k) \quad (III.25)$$

$$Q(k) = Y(k) = b_1 U_n(k-1-d) + b_2 U_n(k-2-d) - a_1 Y(k-1) - a_2 Y(k-2) \quad (III.26)$$

avec: $a_1 = -1.425$ $a_2 = 0.496$ $b_1 = -1.102$
 $b_2 = 0.173$ $d=1$ $T_0 = 2 \text{ sec}$ (III.27)

Ce processus possède une phase non-minimale et un maximum pour $U = 4$. La figure (FIG.III.4) montre l'exécution de l'optimisation. Quatre phases peuvent être distinguées.

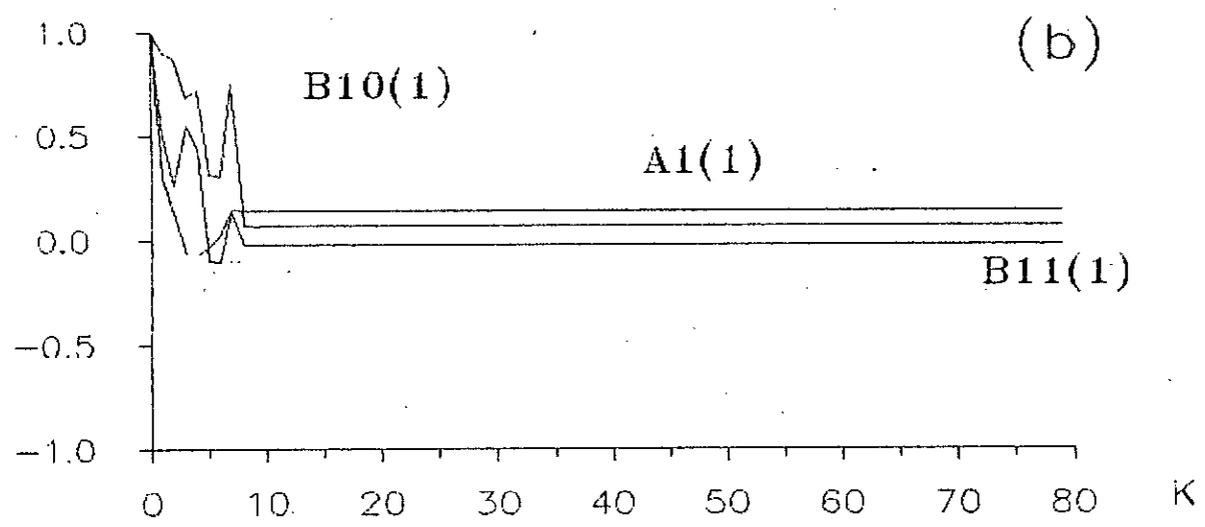
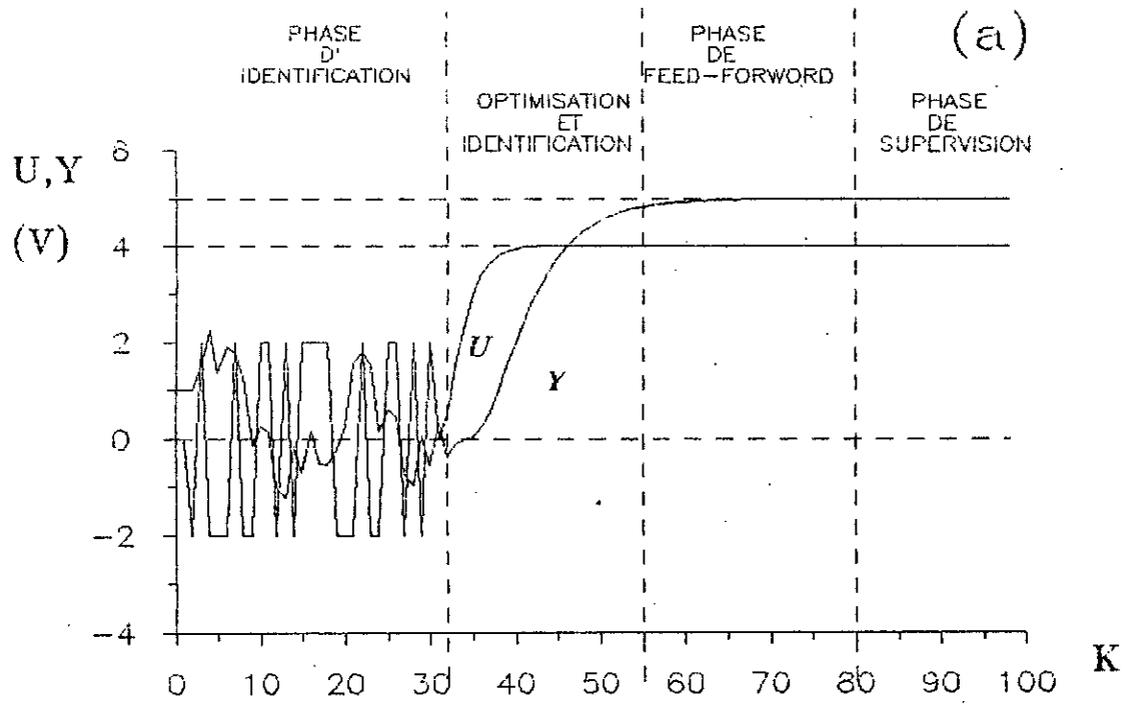


FIG.III.4: LES QUATRE PHASES DE L'OPTIMISATION

1_ Phase d'Identification: Grâce à l'Identification par signal-test, l'estimation des paramètres mène à un modèle grossier du système. Cette phase se termine après:

$$K_{id} \geq [4m+1+d](n-1)$$

2_ Phase d'Identification et d'optimisation: En se basant sur le modèle statique primaire $Q (Y(K) , U(K))$, les gradients sont calculés et l'équation (III.14) donne une nouvelle $U(K+1)$. L'Identification est répétée donnant un modèle amélioré. La phase 2 peut être regardée aussi comme une commande en boucle fermée de la valeur extrême, où l'extrémum est inconnu.

3_ La phase du feedback: Si $\| U(K+1) - U(K) \| \leq \underline{\epsilon}$, l'optimisation est interrompue et $U(K+1)$ est fixée. Alors le processus s'installe à son régime établi optimal en un semblant de commande par feedback, à cause de son comportement dynamique. La phase est donc une commande en boucle fermée de la valeur extrême.

4_ Phase de supervision: Après que le régime établi optimal ait été atteint, l'optimum est supervisé par comparaison du Q_{opt} identifié avec le Q_{opt} mesuré. Si une certaine différence Q_{sub} est excédée, la procédure d'optimisation commence de nouveau.

III.3.OPTIMISATION EN TEMPS RÉEL D'UN MOTEUR A ALLUMAGE COMMANDÉ:

Dans notre algorithme de commande nous allons bien sûr supposer que le moteur possède un modèle dynamique de la forme de l'équation (II.25) ; qu'on peut mettre _ en mettant à profit les équations d' Euler pour approximer la dérivée _ sous la forme:

$$Tc(K+1) = -a1 Tc(K) -a2 Tc(K-1) +c1 +c2 M_{ap}(K) +c3 Ri(K) -c4 Ri^2(K) +c5 Av(K) -c6 Av^2(K) +c7 Av \cdot N -c8 N -c9 N^2 \quad (III.28)$$

Comme nous n'aurons comme variables directement commandables que Ri

et \underline{Av} , on doit considérer un terme constant qui englobe les variations de N et \underline{Map} soit:

$$\begin{aligned} Tc(K+1) = & -a_1 Tc(K) - a_2 Tc(K-1) + b_1 + b_2 Ri(K) + b_3 Ri^2(K) + \\ & + b_4 Av(K) + b_5 Av^2(K) + e(K) \end{aligned} \quad (III.29)$$

Dans le modèle réel, ces constantes ont les valeurs:

$$\begin{aligned} a_1 = 0.17 & \quad ; \quad a_2 = -0.17 & \quad ; \quad b_1 = 31.2 & \quad ; \\ b_2 = 70.065 & \quad ; \quad b_3 = -43.25 & \quad ; \quad b_4 = 4.76 & \quad ; \quad b_5 = -0.14 \end{aligned}$$

Les variations de N et de \underline{Map} sont considérées comme des perturbations. Une approche nous a semblé meilleure, celle qui prendrait en compte l'évolution du régime N ; mais pour cela il faudra pouvoir identifier les constantes c_7 , c_8 , c_9 . Nous pourrions pour cela ajouter une perturbation à la vitesse; mais à ce niveau de l'étude on a préféré le cas où N est supposée relativement constante pendant un temps assez long.

III.3.1. Algorithme de la commande: Comme on l'a vu dans l'exemple précédent, il comporte quatre étapes importantes:

I IDENTIFICATION : On introduit aux deux entrées \underline{Av} et \underline{Ri} des signaux ternaires pseudo-aléatoires, et à l'aide des M.C.R. simples on obtient un modèle assez grossier mais qui permettra à la méthode du gradient de converger vers le modèle réel du moteur.

$$\left. \begin{aligned} \underline{Ri}(K) &= \epsilon_1(K) + \overline{Ri} \\ \underline{Av}(K) &= \epsilon_2(K) + \overline{Av} \end{aligned} \right\} \quad (III.30)$$

où \overline{Ri} et \overline{Av} sont deux valeurs moyennes acceptables par le système à commander dans les conditions paramétriques actuelles, 2 valeurs qui nous évitent un couple moteur trop bas et surtout le cliquetis, et qui sont obtenus par la méthode cartographique classique 1. $\epsilon_i(K)$ pouvant prendre comme valeurs: $+\epsilon_i$, 0 , $-\epsilon_i$; et l'amplitude ϵ_i étant choisie

LADACI, S. *70*

de telle sorte que l'on évite la saturation (cliquetis) ou une puissance trop faible, voir l'arrêt du moteur.

$e(K)$: bruit aléatoire; on aurait pu choisir d'autres modèles de bruit plus compliqués $C(q)e(K)$, il suffirait alors d'introduire en plus, l'identification des paramètres ci dans l'algorithme des MCR. Dans ce choix là on a été surtout influencés par la thèse de Ph.D. de Scotson et Wellstead [14] , qui ont traité le même sujet en ne commandant que l'avance à l'allumage.

_ II _ RECHERCHE DE L'EXTREMUM: Après que l'erreur d'identification atteigne un certain seuil, on peut déclencher le processus d'auto-régulation. On aura à calculer le vecteur de commande $U(K) = [R_i(K) ; A_v(K)]$ (III.31) selon l'équation (III.23) en laissant se poursuivre la marche de l'estimation par les MCR en utilisant la variable instrumentale auxiliaire qui nous permet de parvenir à un modèle très proche du réel.

_ III _ FIXATION DE LA COMMANDE: Dès que la condition : $(R_i < \delta R_i \text{ et } A_v < \delta A_v)$ est remplie on stabilise R_i et A_v à leur dernières Valeurs. Le processus converge alors rapidement vers la valeur maximale du couple moteur, à la précision d'identification près tout en étant indifférent aux bruits et autres petites perturbations.

_ IV _ PHASE DE SUPERVISION: Le couple a atteint une valeur optimale et la commande est fixée à des valeurs précises. Le test $(T_c < \delta T_c)$ est constamment observé, et dès qu'il n'est pas valide on relance la première phase d'identification car le modèle ne reflète plus alors le comportement du moteur commandé.

III.3.2.Application au moteur:

Le Critère est bien sûr égal à la sortie T_c qui est le couple moteur

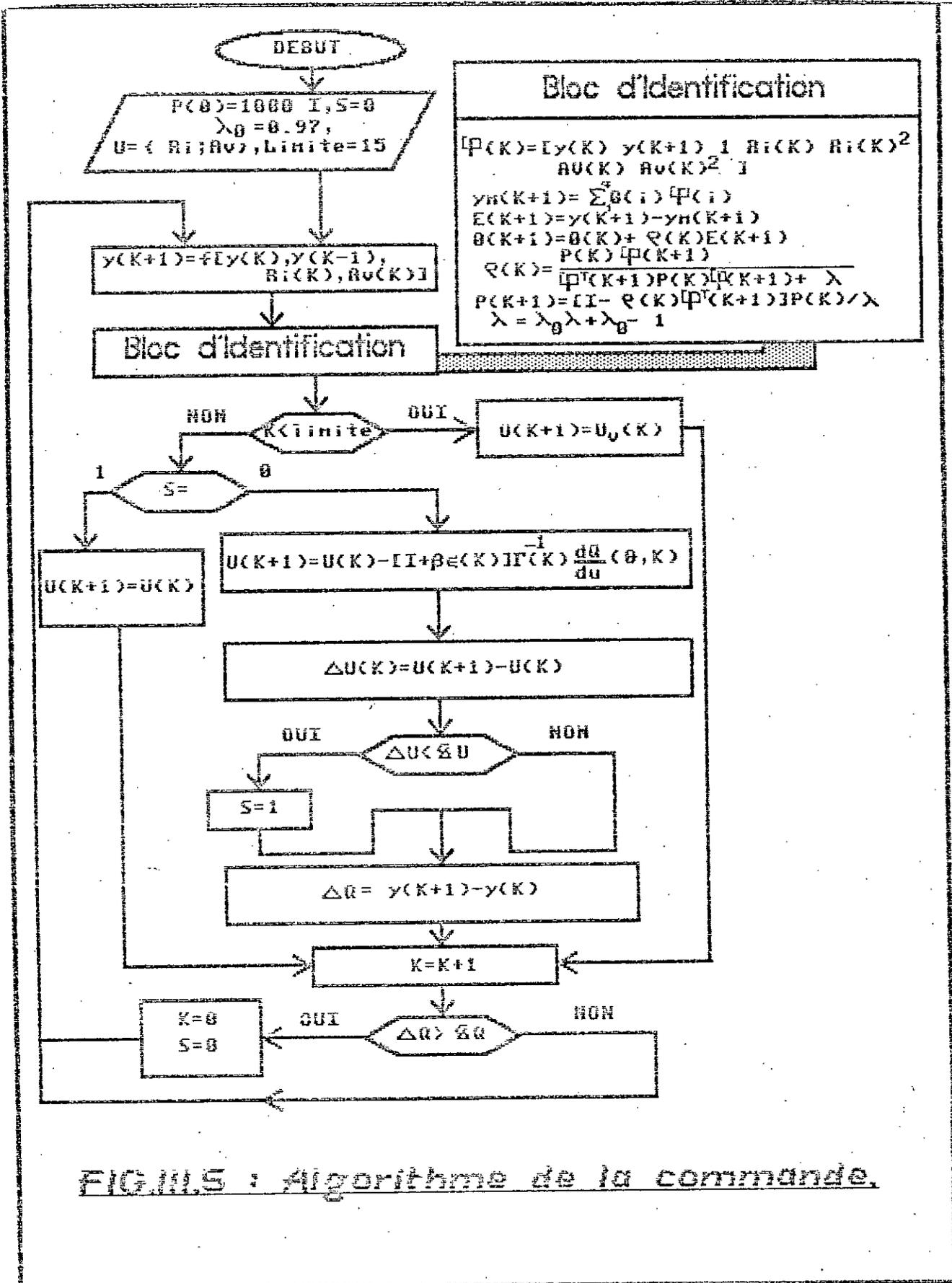


FIG. III.5 : Algorithme de la commande.

moien: $Q(K) = Tc(K)$

Le retard du processus d est déterminé pratiquement, ici $d \approx 0$.

Choix de la période d'échantillonnage: Ce choix est imposé par deux facteurs importants:

_ Les bruits intervenant sur le système, et pour lesquels on n'a pas intérêt à choisir une période trop longue, mais au contraire la plus petite possible.

_ Les temps de retard du processus, qui sont essentiellement dus aux capteurs, et à la commande indirecte de la richesse et qui nous imposent une période au moins aussi longue.

Nous avons vu dans la partie modélisation que les capteurs les plus modernes dans ce domaine en 1988, ont un temps de retard de l'ordre de la seconde, ce qui nous a permis de prendre $T_0 = 1$ sec, sachant qu'à l'heure actuelle ces performances sont considérablement améliorées chaque années par les firmes automobile en mal de concurrence.

REMARQUES: Nous savons d'après l'étude théorique que les deux variables R_i et A_v n'interagissent pas donc elles sont supposées indépendantes dans le modèle d'identification choisi; ce qui nous évite le problème du filtrage des dérivées secondes car:

$$\frac{\delta^2 Tc}{\delta R_i \delta A_v} = 0 ; \quad \forall K$$

Quant au facteur de pondération β nous avons trouvé que $\beta = 6$ donnait de très bons résultats.

Pour les seuil de performances : On s'est fixé des valeurs assez petites car le système a pu être très bien identifié.

$$\delta R_i = 10^{-3} ; \quad \delta A_v = 10^{-1} ; \quad \delta Q = \delta Tc = Tc(K+1) - Tc(K) = 10 \text{ Nm}$$

III.3.3. Simulations: Pour les simulations d'application de la commande, on a essayé de démontrer certaines qualités nécessaires à tout

algorithmes de commande pour être opérationnel dans l'industrie et dans la vie pratique, on entend par là :

- ① Premièrement que cette commande converge réellement vers l'optimum.
- ② Deuxièmement qu'elle est suffisamment robuste vis à vis des bruits et perturbations.
- ③ Enfin, qu'elle suit bien le point de fonctionnement optimal s'il venait à changer.

III.3.4. Interprétations:

Y_CONVERGENCE:

- * Les courbes de la figure (FIG.III.3.1) montrent que la méthode converge rapidement et cela tout en ne perdant pas beaucoup de performance au cours de la phase d'identification. Les commandes sont toujours limitées par des valeurs non-préjudiciables pour le système; et quand elles sont à leur niveau le plus bas, elles n'y restent pas un temps suffisamment long pour que ses répercussions sur le couple moteur soient perceptibles au conducteur. La courbe de la figure (FIG.III.3.2) montre que le modèle paramétrique réel est approché pendant la phase d'identification, pour être atteint juste quelques pas après le démarrage de la deuxième phase.
- * La phase d'identification ne nécessite pas plus de 12 itérations. Le modèle grossier obtenu alors permet la convergence rapide du processus vers son état optimal.
- * Dans nos simulations théoriques, nous avons établi que la méthode du Gradient permet au processus de trouver et de poursuivre l'optimum même en ne disposant pas de phase d'identification. L'inconvénient est évident : Les fluctuations des commandes et de la sortie sont trop

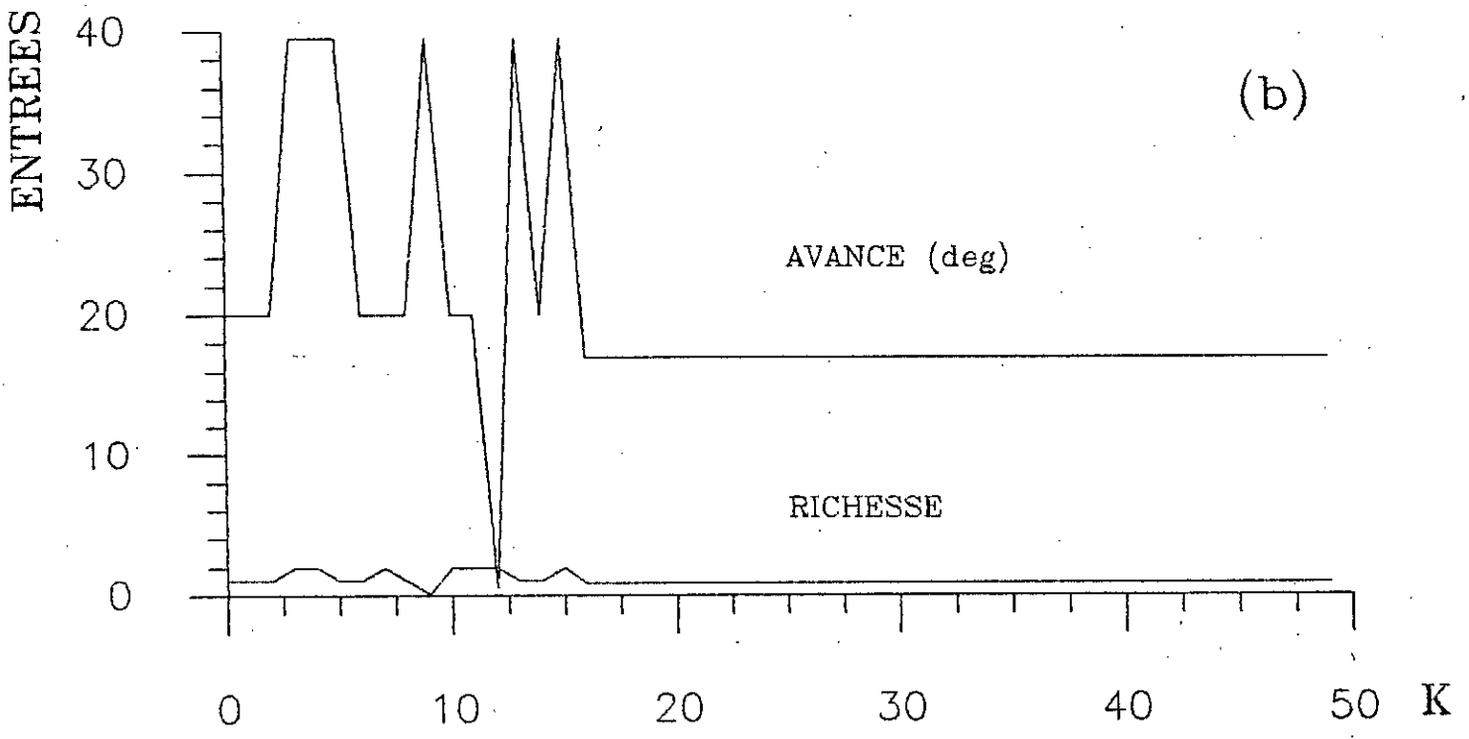
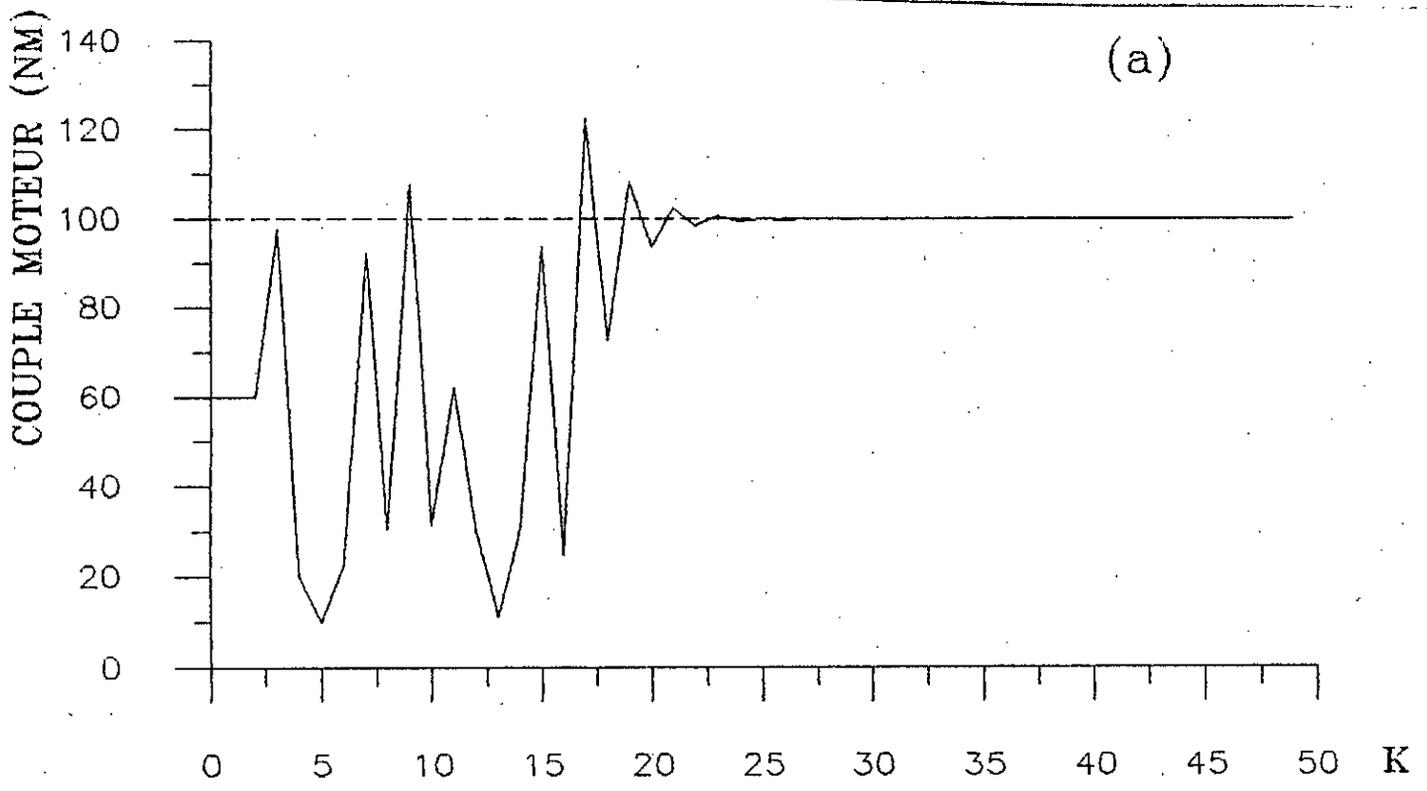


FIG.III.2.1:OPTIMISATION 1:

sans bruit, sans perturbation

75

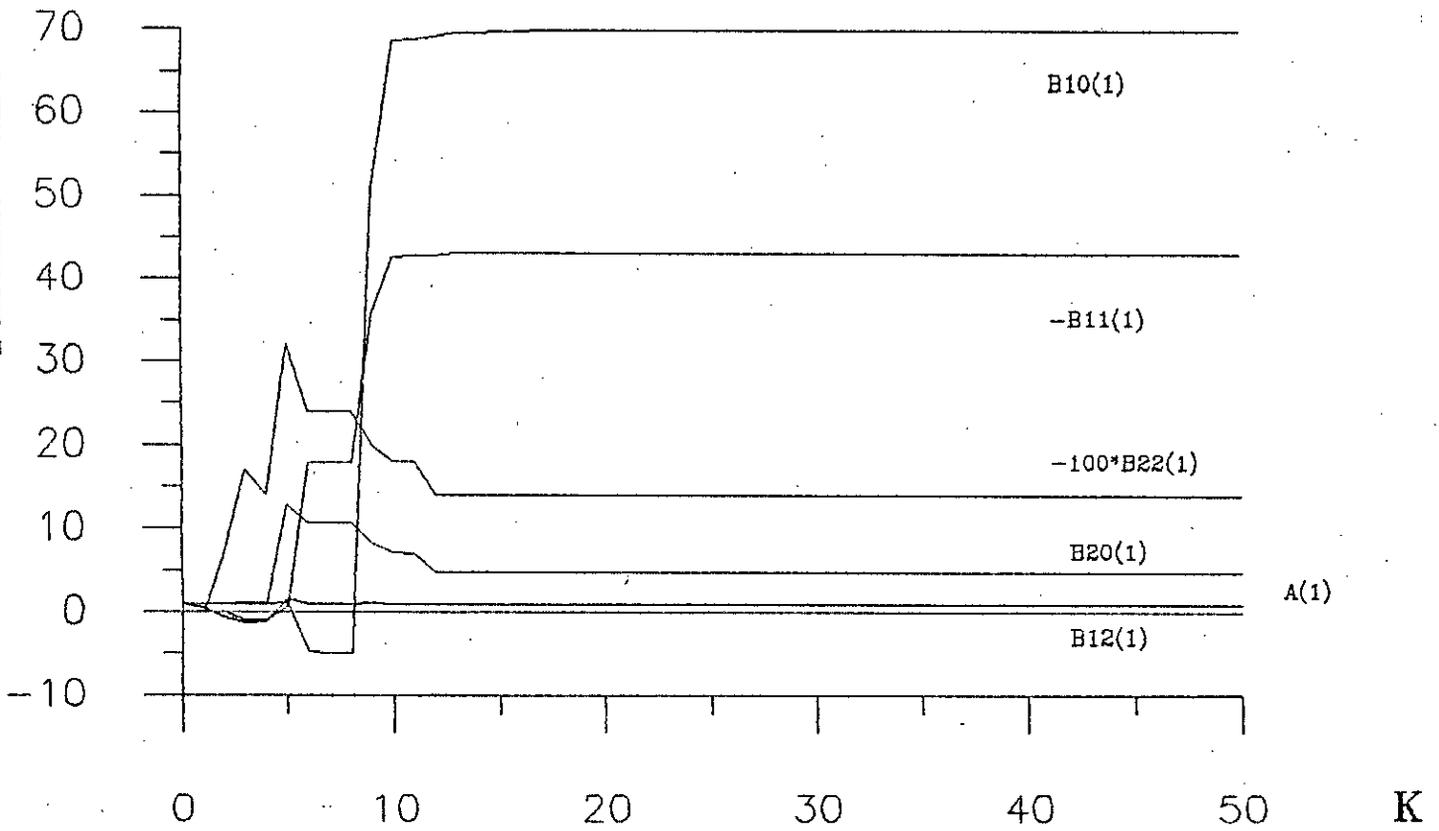


FIG.III.2.2: COEFFICIENTS DU MODELE STATIQUE.

$$A(1) \cdot Y = B10(1) \cdot U1 + B11(1) \cdot U1^2 + B20(1) \cdot U2 + B22(1) \cdot U2^2 + B21(1) \cdot U1 \cdot U2$$

importantes pour être acceptable. En effet le système n'est commandable que dans une plage donnée de richesse, d'angle d'avance et même de couple moteur.

Dans le sens inverse aussi, si on augmente le nombre d'itérations dans cette phase d'identification, le résultat ne saurait être meilleur car le système ne convergera pas plus rapidement qu'avant, bien au contraire, on peut dire qu'il possède une certaine dynamique de convergence.

II_EFFECT DU BRUIT:

\$ Nous voyons sur la figure (FIG.III.C.3) que le système converge ostensiblement presque aussi bien que pendant la première simulation, quand bien même on lui a ajouté un signal de bruit d'une amplitude qui peut atteindre 5% du signal de sortie soit ± 5 Nm.

La valeur optimale obtenue pour l'avance et la richesse ne sont pas trop différentes de celles obtenues pendant la simulation non-bruitée. En effet, l'erreur enregistrée est inférieure à 2,4% pour les valeurs optimale de la commande et tourne autour de 2% concernant le couple moteur. Donc l'algorithme peut être considéré comme robuste par rapport au bruit. Nous avons essayé de plus hauts niveaux de bruitage et remarqué pour une amplitude de bruit dépassant les 10% de la valeur de sortie en régime établi, une erreur de quelques degrés.

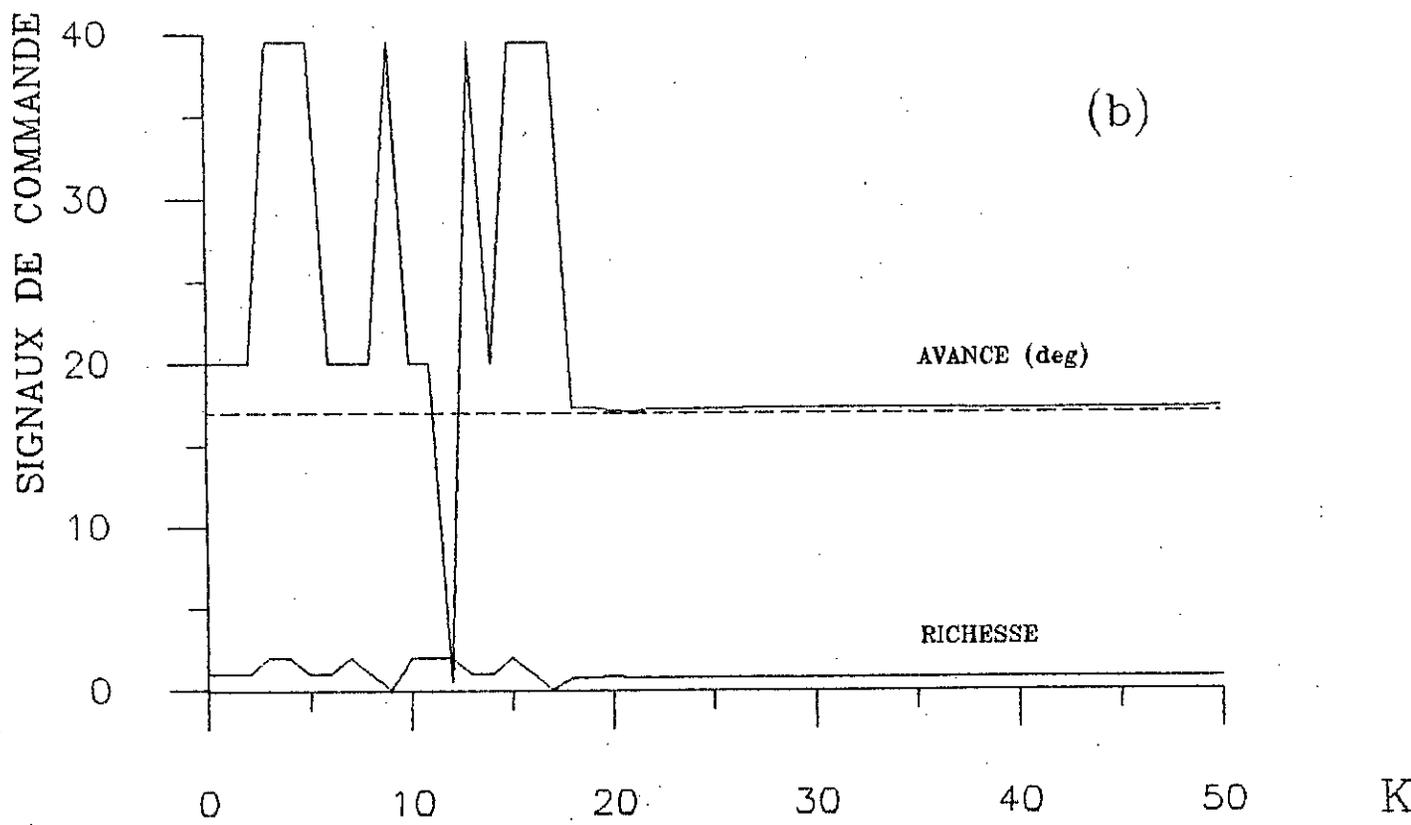
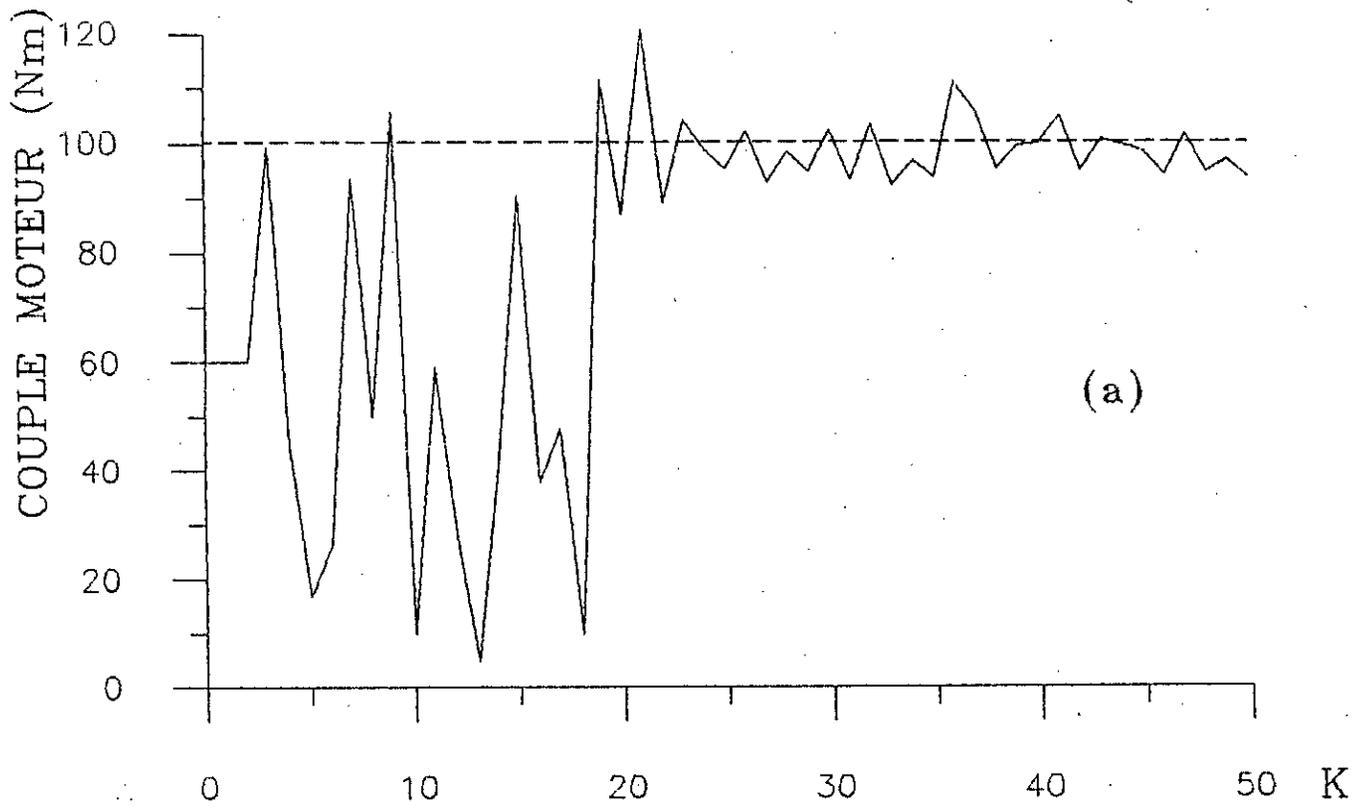


FIG.III.3.1: OPTIMISATION AVEC BRUIT.

78

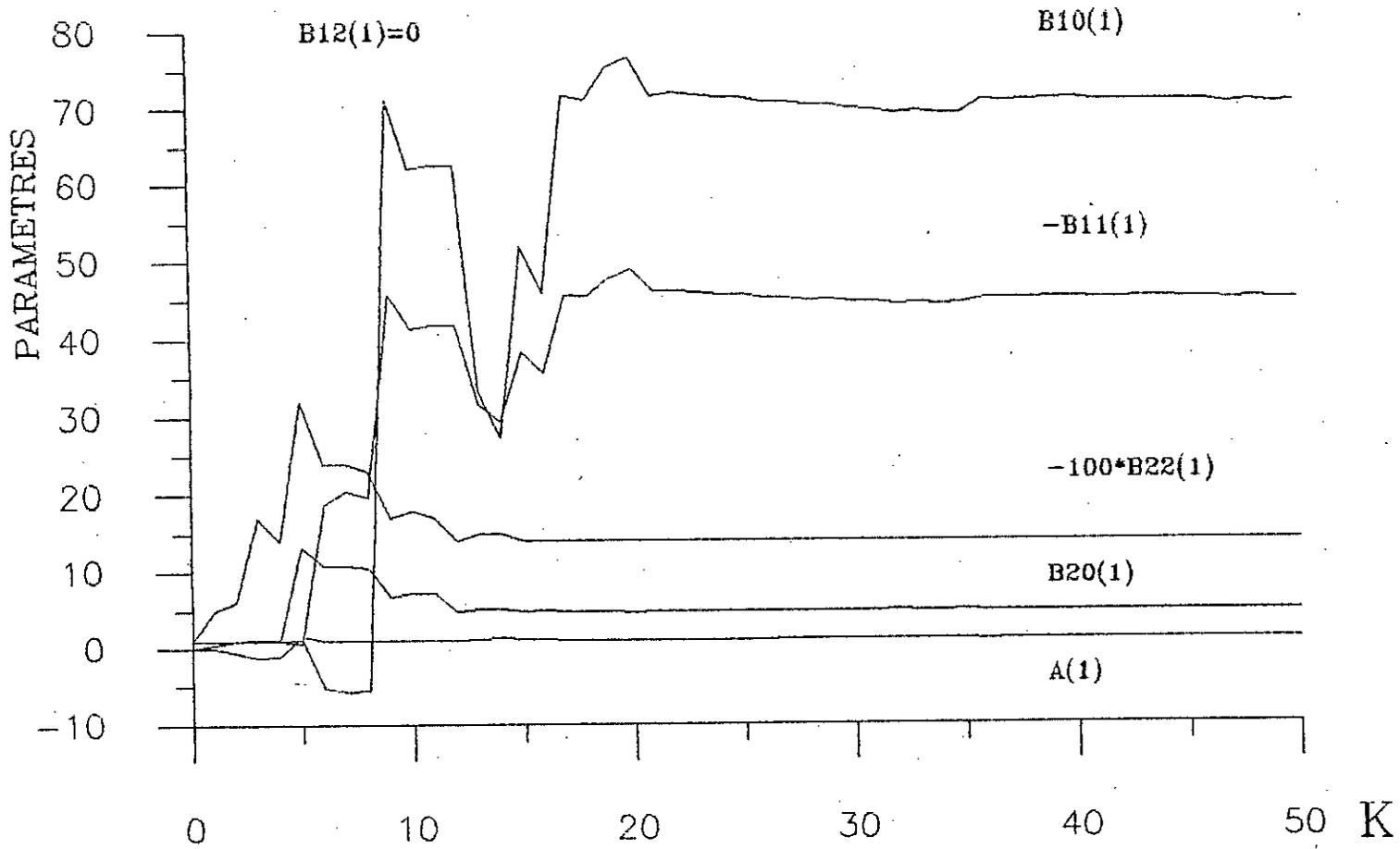


FIG.III.3.2: COEFFICIENTS DU MODELE STATIQUE.

79

pour l'avance et d'un dixième pour la richesse ce qui reste encore comparable aux performances réalisées par les méthodes cartographiques classiques.

\$ Un autre point positif de la méthode est que les signaux de commande sont fixés une fois qu'ils atteignent leurs valeurs optimales, et le bruit n'intervient plus alors sur le système que d'une façon minime, car il ne touche plus le modèle estimé et surtout la commande.

III_EFFECT DES PERTURBATIONS:

(Changement des paramètres du processus)

A) Variation du régime moteur

\$ Les courbes des figures (FIG.III.3.5) et (FIG.III.3.6) montrent que le système réagit de la même façon qu'au départ à un changement brusque de la vitesse qu'il perçoit comme une altération intolérable des paramètres du modèle estimé, ce qui nous oblige à remettre en marche le processus d'identification.

\$ Il nous semble important de marquer ici l'une des différences capitales entre l'algorithme de Bamberger et Isermann et le notre. Ils proposaient en effet, dans le cas d'une perturbation importante, de redémarrer le processus d'identification non pas par la séquence pseudo-aléatoire encore une fois comme on l'a fait ici, mais par la deuxième phase d'identification et d'optimisation. L'inconvénient de leur procédure que nous avons essayé est le fait que cette identification ne peut prendre en charge une variation trop importante du modèle réel sans générer des valeurs des signaux de commande qui peuvent être nuisibles pour le bon fonctionnement du moteur. Car dans notre étude nous avons fait un réel effort de modélisation dans le souci d'être le plus proche possible de la réalité qui n'est pas

80

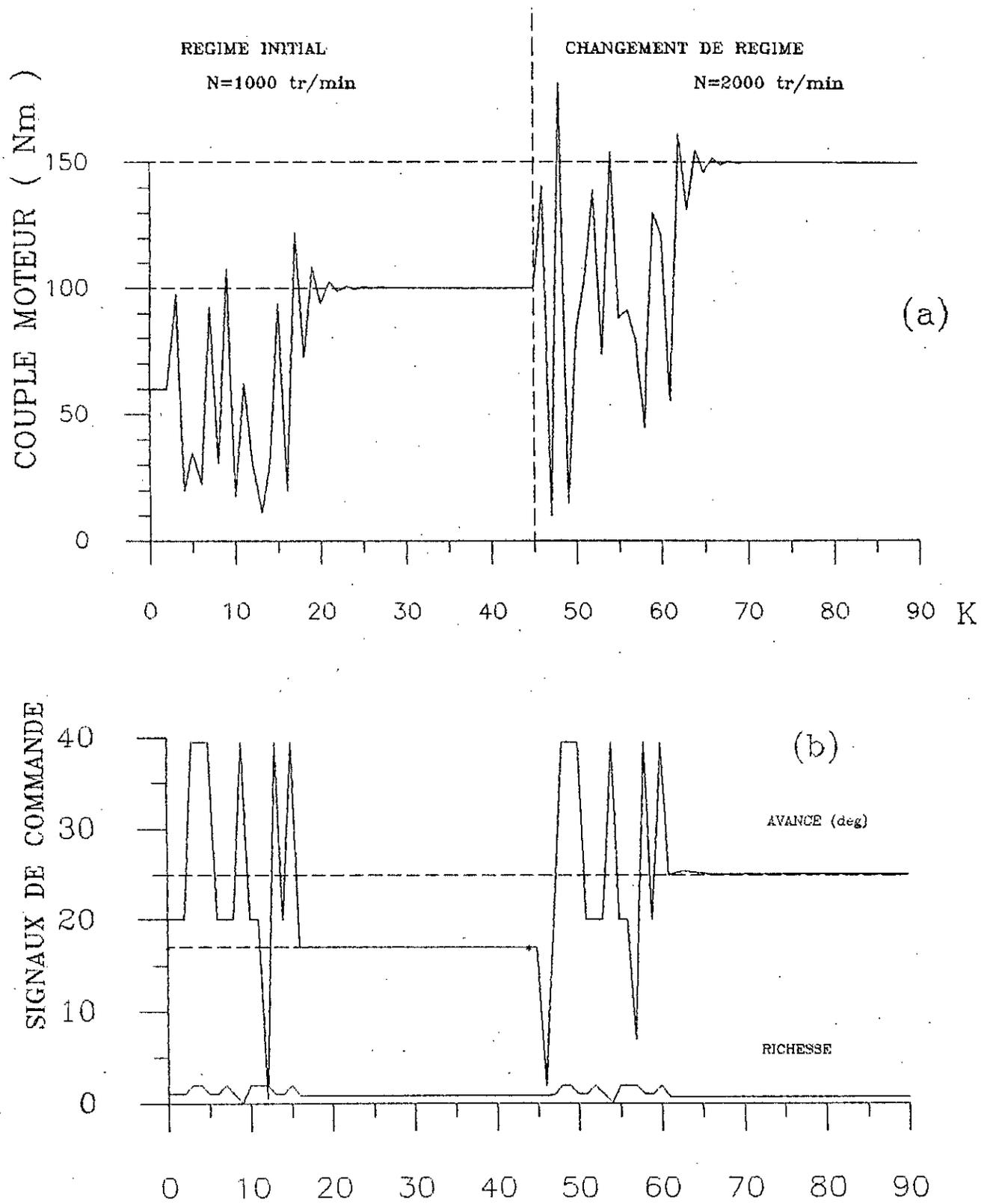


FIG.III.4.1: CHANGEMENT DU REGIME-MOTEUR

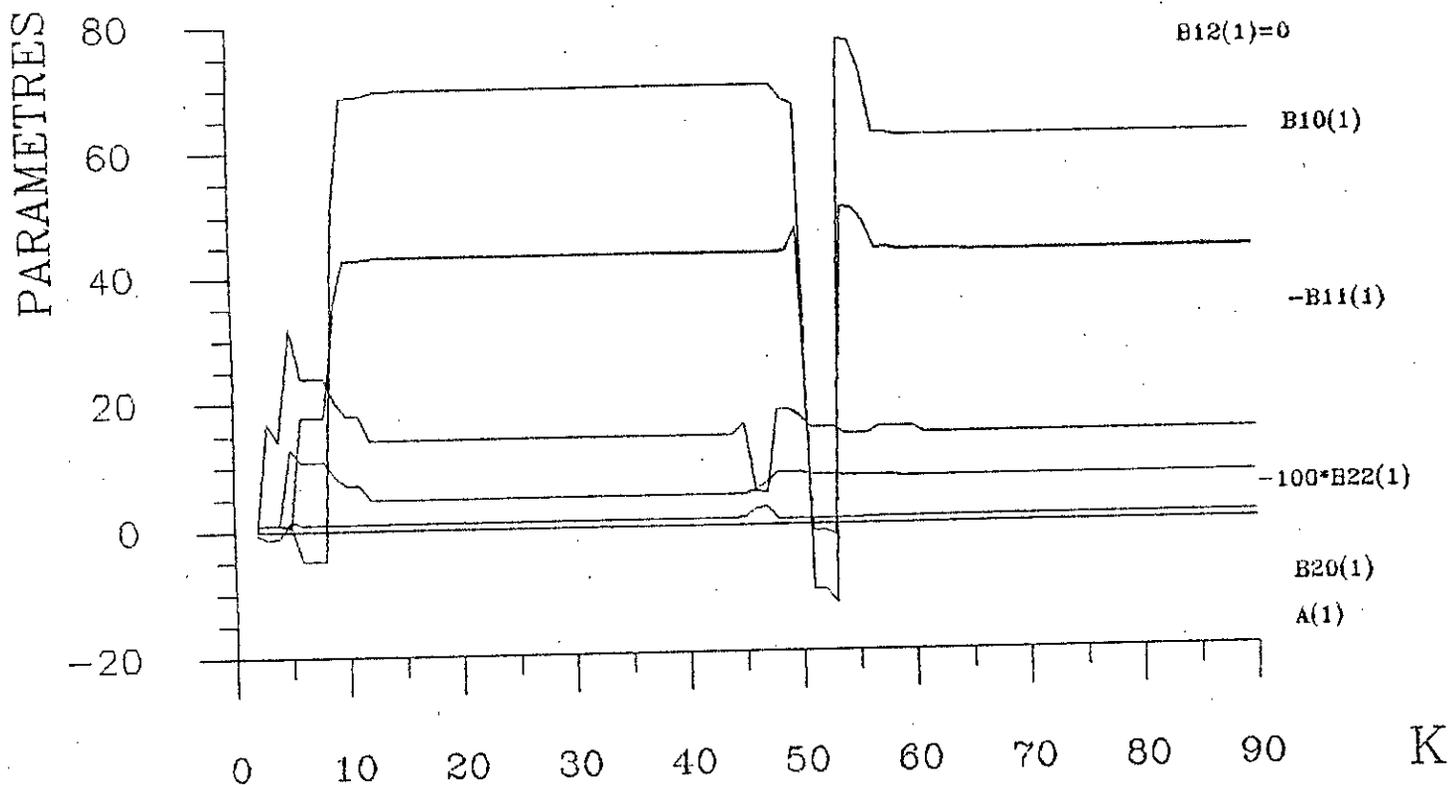


FIG.III.4.2: COEFFICIENTS DU MODELE STATIQUE.
 Perturbation due a la variation du regime-moteur.

toujours rose. A noter aussi que Bamberger et Isermann avaient appliqué la commande extrême à un processus très lent.

* Un problème assez épineux surgit alors, c'est la possibilité très probable que le régime soit toujours en variation comme c'est l'habitude de tous les automobilistes, donc l'algorithme ne peut pas prendre en charge l'identification d'un modèle constamment variant dans le temps; deux solutions peuvent être proposées:

1_ Le filtrage et le moyennage de la mesure de la vitesse i.e., prendre la moyenne de plusieurs mesures pour que le régime moteur ne change pas trop subitement.

2_ On peut proposer une commande par paliers qui imposerait des valeurs constantes pour chaque plage de valeur de la vitesse, exemple: 1000 tr/min pour une vitesse variant entre 800 et 1200 r/min; 2000 tr/min pour une vitesse variant entre 1200 et 1600 tr/min;... etc

* Il nous semble clair qu'une recherche plus approfondie sur le sujet, reste à réaliser aussi bien que pour la technologie des de la mesure afin de diminuer la période d'échantillonnage ce qui permettrait d'avoir une commande plus souple et plus performante.

B) Variations occasionnées par d'autres facteurs:

* Parmi les autres facteurs pouvant affecter le modèle, on a déjà cité: la charge, la température, les vibrations, le vieillissement... Dans la figure (FIG.III.7), on a délibérément agi sur les coefficients des variables dans le modèle du processus sans varier le régime et globalement le niveau de puissance du moteur, et on voit que notre algorithme reste fidèle à l'optimum même si pour cette variation, le couple mesuré ne semble pas avoir énormément évolué.

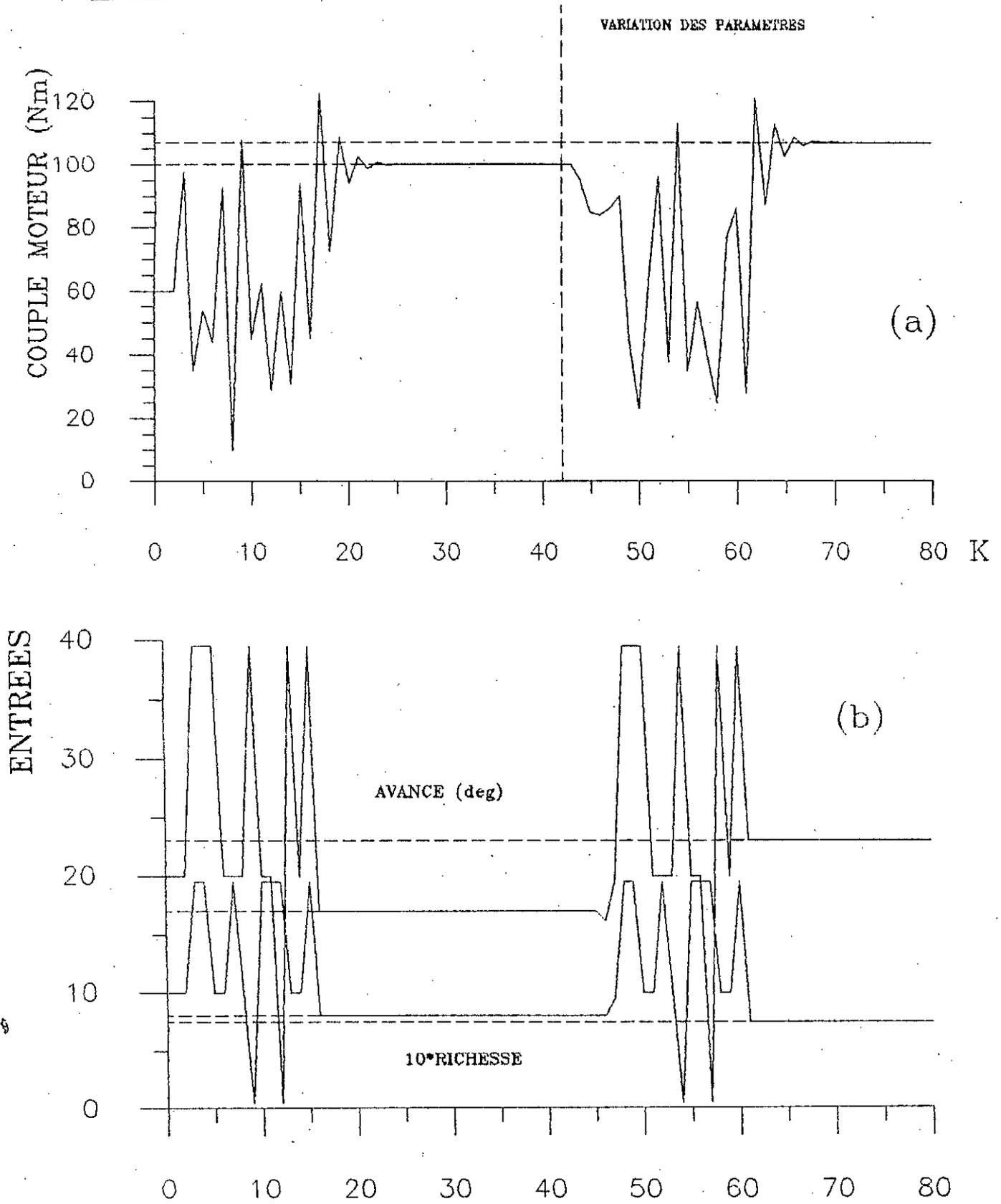


FIG.III.5.1: REACTION A UNE PERTURBATION.

84

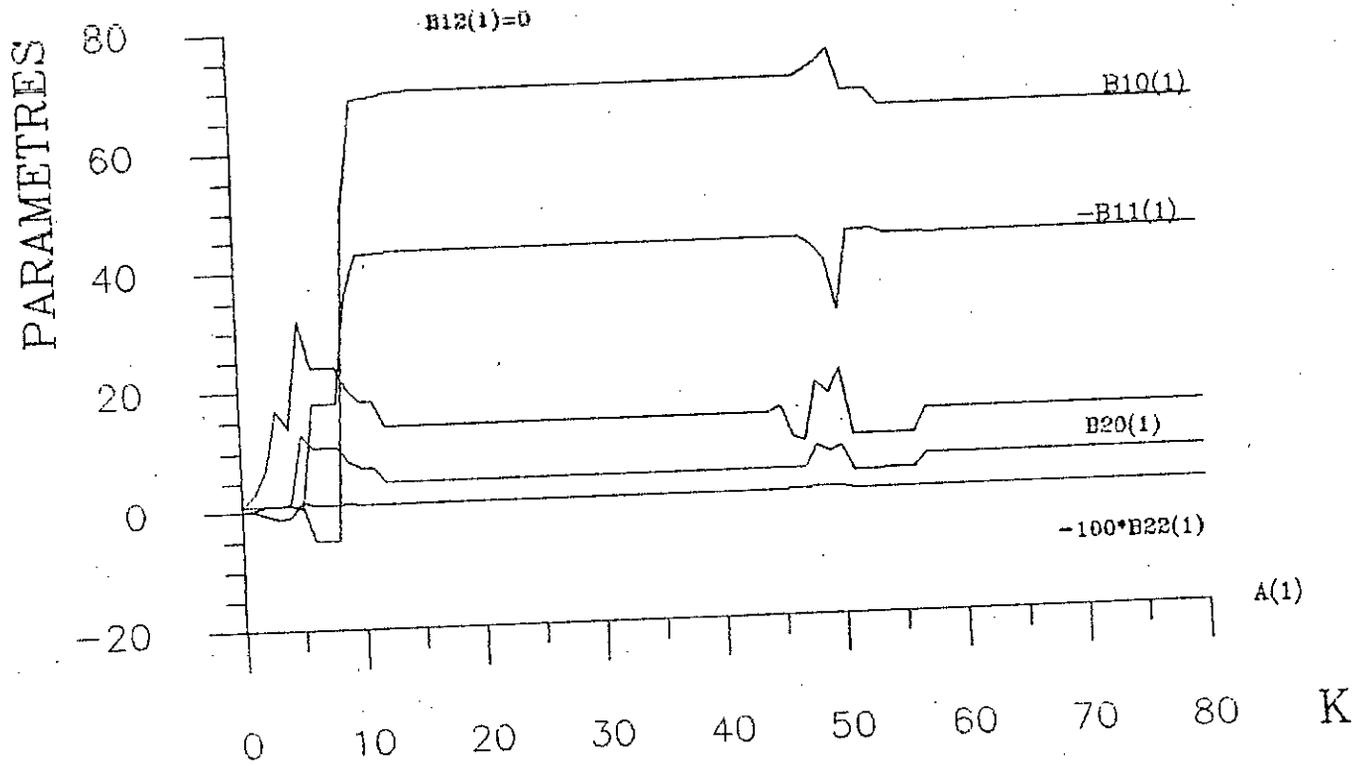


FIG.III.5.2: COEFFICIENTS DU MODELE STATIQUE.

Perturbation soudaine.(EX: Variation de la charge).

III.4.CONCLUSION

La méthode de la commande extrême par gradients nous permet d'atteindre et de garder l'état optimal du rendement du moteur d'automobile. Elle est assez robuste par rapport au bruit et aux perturbations diverses; et nous garantit d'atteindre l'état optimal sans que la phase d'identification ne nécessite que le moteur ait un état de fonctionnement dégradé pendant un temps trop long. L'étape d'identification pure n'exède pas en effet la dizaine de seconde, et les valeurs des signaux de commande ne risquent pas d'altérer la bonne marche du processus de combustion.

88

LADACI,S.

CONCLUSION
GENERALE

CONCLUSION GENERALE

La commande extrémale appelée aussi optimisation auto-ajustable, n'a pas jusque là été très populaire dans les milieux industriels et même universitaires. Mais depuis le début des années 90, un intérêt certain pour cette méthode a commencé à se dessiner, car elle constitue un terrain fertile pour la recherche et l'innovation.

Dans notre travail, on a pu se rendre compte, rien que pour la technique choisie, de toutes les améliorations dans le fond et dans la forme, qu'on pourrait réaliser à l'heure où aucun industriel ne peut rester indifférent devant le développement surprenant que connaissent certains axes de recherche plus que d'autres, surtout en parlant d'optimisation, vu le poids de la concurrence.

L'industrie automobile est sans aucun doute l'une des plus conscientes de ce problème, et la commande extrémale ne tardera pas à y être admise et consacrée. En effet, Comme on l'a déjà signalé pour le moteur si cher aux mécaniciens automobilistes, la plus grande course maintenant se fait dans le sens de la consommation la plus réduite d'énergie pour les meilleures puissance et rendement possibles, sans négliger le problème de la pollution dont on a démontré le lien étroit avec le niveau de performance du moteur.

La méthode proposée pour l'optimisation du régime établi en ligne, a montré avec les simulations de la section III que l'optimum peut être atteint en un temps relativement court.

22

L'algorithme de recherche est une combinaison des méthodes du gradient et des recherches aléatoires. Les oscillations autour de l'optimum sont évitées et le point extrême est poursuivi s'il venait à changer. L'influence des perturbations sur le processus est éliminée automatiquement.

Cette application a montré que seule une approximation grossière de la structure du processus réel par un modèle dynamique est requise. Mais la souplesse de cette commande réside dans le fait qu'on peut bénéficier de toute connaissance a priori sur le modèle du système ou les contraintes qui lui sont imposées.

Notons au passage que la méthode marche aussi bien pour les systèmes mono-entrées que les multi-entrées comme on l'a si bien vu pour la commande du couple moteur par la richesse de l'essence et l'avance à l'allumage conjointement. Notre souci d'être les plus proches possible de la réalité du moteur à explosion, nous a révélés des contraintes dont un algorithme réellement implémentable à ce processus, doit nécessairement tenir compte, parmi lesquelles les risques de saturation, de cliquetis, et de fonctionnement prolongé à basse puissance.

L'avenir prouvera sûrement l'utilité et l'originalité de cette commande; à nous d'en tirer profit!

BIBLIOGRAPHIE

- [1] ARQUES : " Moteurs alternatifs à combustion interne. "
 Masson, 1987
- [2] DECAULNE P., GILLE J-Ch., PELEGRIN M. : " Introduction aux
 systèmes asservis extrêmes et adaptatifs." Dunod, 1976
- [3] DENEMAUX B. : " Moteur à essence." 2 tomes.
 E.T.A.I., 1987
- [4] LANDAU : "Identification des systèmes."
 Dunod, 1986
- [5] PUN Lucas : " Introduction à la pratique de l'optimisation. "
 Dunod, 1971
- [6] RAYNAL B. : " Moteurs thermiques et pollution atmosphérique."
 Techniques de l'Ingenieur, B378
- [7] SERRUYS M. : " Cycles et problèmes de rendement dans les machines
 à combustion interne." Techniques de l'Ingenieur, B1225
- [8] SERRUYS M. : " Moteur à combustion interne." Tome 2
 Haber, 1961
- [9] ZYPKIN Y.Z. : " Adaptation and learning in Automatic Control
 Systems." Nauka Moskau, 1968

THESES

- [10] BIDAN Pierre : " Modélisation et commande d'un moteur à allumage
 commandé d'automobile." Thèse de Doc.Ing., Univ. Paul Sabatier
 C.N.R.S., Toulouse 1989
- [11] DUAN S.Y. : " Fuel injection control for I.C. engines."
 Ph.D. Thesis, Dept Mechanical Engineering, Q.U.B., 1990
- [12] GARRAUDEE B. : " Asservissement du dosage Air-Carburant par un
 dispositif électrique pour l'obtention du rendement maximal d'un
 moteur à allumage commandé."
 Thèse de Doc.Ing., Univ. Paul Sabatier, 1979
- [13] GARRIGUES M. : " Etude d'un procédé de régulation extrême du
 dosage Air-Carburant d'un moteur à combustion interne."
 Thèse de Doc.Ing., Univ. Lyon I, 1976

- [14] SCOTSON P.G. : " Self-tuning optimization of automatic engines"
Ph.D. Thesis, Control Systems Center, UMIST 1986

PUBLICATIONS

- [15] BAMBERGER W., ISERMANN R. : " Adaptiv on-line steady-state optimization of slow dynamics processes ",
Automatica, VOL. 14, 1978 , p223
- [16] DRAPER C.S., LI Y.T. : " Principles of optimalizing control systems and an application to the internal combustion engine ",
American Society of Mechanical Engineers , New York , Sept. 1951
- [17] GALLMAN P.G. : " A comparison of two Hamerstein Model Identification Algorithms " IEEE , Trans. on Automatic Control
VOL AC-21 n: 1 Fevrier 1976
- [18] KEVICZKY L., HABER R. : " Adaptiv dual extremum control by Hamerstein model" Proc. Third IFAC Word Congres, Londre, 1966
- [19] LEBLANC M. : "Sur l'électrification des chemins de fer au moyen de courants alternatifs de fréquence élevée ",
Revue Générale de l'Electricité , 1922
- [20] POWELL B.K. : " A dynamic model for automatic Engine Control Analysis ", Proc. 18th IEEE Conference on Decision & Control ,
Fort Lauderdale, Florida. Dec. 12-14 pp 120-126 , 1979
- [21] POWELL J.D. : " Closed loop control of Spark Advance Using Cylinder Pressure " International Association for vehicle Design,
Special Publications SP4, 1983
- [22] SCOTSON P.G., WELLSTEAD P.E. : " Self-tuning optimization of spark
ignition automatic engines" IEEE Control Syst. Mag. April 1990
- [23] STERNBY J. : " Extremum Control Systems, An area for Adaptiv Control ? " Automatica, VOL. , 1979
-

TABLE DES MATIERES

Nomenclature

Introduction générale 5

PREMIERE PARTIE : LA COMMANDE EXTREMALEI.1 Introduction 8I.2 Intérêt des asservissements extrémaux

2.1. Commande asservie à une valeur de consigne 9
 2.2. Commande extrême 13
 2.3. Applications de la commande extrême 16
 2.4. Intérêt de la commande extrême 17
 2.5. Remarque sur la grandeur de sortie 17

I.3 Les Modèles de la commande extrême

3.1. Systèmes statiques 19
 3.2. Systèmes dynamiques 19
 3.3. Bruit et dérive 19

I.4 Méthodes de recherche extrême

4.1. Méthode de FIBONACCI 21
 4.2. Méthode de la plus grande pente 21
 4.3. Recherche dans les problèmes quasi-statiques 23
 4.4. Recherche forçante d'extrémum 27
 4.5. Extension aux problèmes multidimensionnels 28

I.5 Classification des algorithmes

5.1. Méthode de perturbation 30
 5.2. Méthode de switching 31
 5.3. Systèmes auto-dérivants 32
 5.4. Méthode à modèle orienté 32
 5.5. Techniques adaptatives possibles 33

I.6 Conclusion : Etude et projets
 des asservissements extrémaux 36

DEUXIEME PARTIE : MOTEUR A ALLUMAGE COMMANDÉII.1 Introduction 38II.2 Base de fonctionnement du moteur

2.1. Cycle de Beau de Rochas 38
 2.2. Mise en oeuvre du cycle 42

II.3 Nécessité de la commande de la richesse
et du point d'allumage 48

89

3.1. Consommation et normes anti-pollution	48
3.2. Amélioration des rendements	49
3.3. Nature des émissions de polluants	51
3.4. Problèmes de commande sur le groupe motopropulseur	52
<u>II.4 Choix des actionneurs</u>	
4.1. Grandeurs à commander	54
4.2. Commande de la masse d'essence	
4.3. Commande de la masse d'air	55
4.4. Commande du point d'allumage conclusion	
<u>II.5 Elements de modélisation</u>	
5.1. Introduction	56
5.2. Schéma fonctionnel de principe	
5.3. Modélisation du transfert moteur via le couple	59
<u>II.6 Conclusion</u>	
<u>TROISIEME PARTIE : APPLICATION DE LA COMMANDE, SIMULATIONS</u>	
<u>III.1 Introduction</u>	63
<u>III.2 Présentation de la méthode utilisée</u>	63
2.1. Plan d'attaque	
2.2. Elements de base	64
2.3. Modèle du processus non-linéaire	66
2.4. Identification du processus	68
2.5. Optimisation du régime établi	69
2.6. Phases de l'optimisation	71
<u>III.3 Optimisation en temps réel d'un moteur à allumage commandé</u>	
3.1. Algorithme de la commande	74
3.2. Application au moteur	75
3.3. Simulations	77
3.4. Interprétation	78
<u>III.4 Conclusion</u>	90
<u>Conclusion Générale</u>	91
<u>Bibliographie</u>	93

COMMANDE EXTREMALE D'UN MOTEUR A ALLUMAGE COMMANDE D' AUTOMOBILE

Abstract : This work is concerned with the EXTERNAL CONTROL and its application for the Torque optimization in an internal combustion engine with a simultaneous action on the ignition advance and the Air/Fuel ratio.

The first part presents the External control theory, which allows on-line optimization of a non linear process with at least one extremum, even when the process model is not known exactly. A second part is concerned with the explosion engine modelization and the form of its Torque/advance ignition and Torque/(Air/Fuel) ratio characteristics.

In a third time, the gradient method is applied to the engine. It begins with the process identification and then the on-line optimization. The extremum is reached and can be followed if it changes. This control law has been tested by means of simulation.

Keywords : Extremal Control, Internal combustion engine, Air/Fuel-ratio, Ignition advance, GRADIENT METHOD, Identification, optimization.

Résumé : Ce travail concerne la commande extrême et son application à l'optimisation du couple moteur dans un moteur à combustion interne par une action simultanée sur l'avance à l'allumage et la richesse de l'essence.

La première partie présente la commande extrême, qui permet une optimisation on-line des processus non-linéaires ayant un extrémum au moins, sans nécessiter une connaissance exacte du système à commander.

Une deuxième partie concerne la modélisation du moteur à explosion et la forme de ses caractéristiques couple/avance à l'allumage et couple/richeesse.

Dans un troisième temps, on applique la méthode du gradient au moteur. Elle commence par l'identification du système dynamique puis son optimisation en temps réel. L'extrémum est atteint et peut être poursuivi s'il variait. Cette loi de commande a été testée en simulation.

Mots clés : Commande extrême, Moteur à allumage commandé d'automobile, Avance à l'allumage Richesse, Méthode du gradient, Identification, Optimisation.

ملخص : هذا العمل يخص التحكم التطرفي و تطبيقه في تحسين مستوى عزم القوة في محرك سيارة بإدارة النسبة بين البنزين و الهواء و درجة التقدم على الإشعال.

القسم الأول يقدم نظرية التحكم التطرفي التي تحول تحسين مستمر لمرود نظم غير خطي ذي نقطة متطرفة على الأول دون أن يستوجب معرفة دقيقة بالنظام المعالج.

القسم الثاني يدرس خصائص نموذج المحرك الانفجاري و شكل العزم/نسبة البنزين والعزم/التقدم على الإشعال.

في الأخير نطبق طريقة التدرج على المحرك و هي تبدأ بتشخيص النظام الديناميكي ثم تحسينه باستمرار. النقطة التطرفية تلحق ثم يمكن اتباعها إذا ما تغيرت. هذه الطريقة تم تجربتها بالحاكاة.

كلمات أساسية : تحكم تطرفي، محرك انفجاري لسيارة، طريقة التدرج، نسبة البنزين، التشخيص، التحسين.