

**TEXTE REFAIT SELON L'ORIGINAL. FORMAT NON RESPECTE**  
**MODELISATION DYNAMIQUE DES EMISSIONS GAZEUSES DU DIESEL**  
**PAR LES METHODES DE L'AUTOMATIQUE**

**UNSTEADY MODEL OF DIESEL GASEOUS EMISSIONS**  
**BY AUTOMATIC'S METHODS**

*MM. A. LIAZID, J-C. CHAMPOUSSIN, R. YOUNES, A. RACHID, B. GARAUDEE*

**LMT, Ecole Centrale de Lyon**

**SIA N 93052**

**Abstract**

Two methods of estimating non-linear models from input-output measurements are presented. The first uses results concerning non-linear discrete-time systems approximation with difference equation model. The second method is an adaptive constant trace recursive algorithm. The techniques are illustrated by analyzing experimental data collected on a 64 kW, 4 cylinders diesel engine. The modeling deals with diesel characteristics, particularly its gaseous emissions, in transient run. Simulations are presented. The control strategy will determine the choice of the well suited model.

**Keywords:** Turbocharged diesel engine, transient regime, pollution, non linear modeling.

---

**Résumé**

Deux méthodes de construction de modèles non linéaires basés sur l'analyse de mesures des grandeurs entrées-sorties d'un diesel de puissance nominale 64 kW sont présentées. La première repose sur l'approximation de ces systèmes par des modèles en temps discret sous forme d'équation aux différences. La seconde, a caractère adaptatif, a été utilisée pour s'affranchir des phénomènes hautement non linéaires du moteur. La modélisation porte sur les caractéristiques du moteur, notamment ses émissions gazeuses pendant les phases transitoires. Des exemples de simulation sont présentés. C'est en fonction de la stratégie de commande que s'opère le choix du modèle le mieux adapté.

**Mots clés:** Diesel suralimenté, régimes transitoires, pollution, modélisation non linéaire

---

## 1- INTRODUCTION

L'intérêt particulier porte sur les caractéristiques des moteurs alternatifs, visant à les rendre performants, économes, propres et silencieux, est essentiellement dictée par des contraintes du marché et le respect des normes internationales. Quand on sait que pendant les phases transitoires de leur fonctionnement, leur surconsommation se traduit par une augmentation moyenne de 30% de la pollution [1], on comprend la nécessité de leur gestion optimale. L'étude présentée porte sur le comportement du moteur Diesel suralimenté en régime transitoire en vue de sa commande pour une pollution minimale. La relation entre les entrées "La" (représentant la position de levier de commande de la position de la crémaillère), "C" (représentant le couple résistant appliqué sur l'arbre moteur) et les sorties de nature chimique (polluants émis) est non linéaire.

La première étape consiste à déterminer la structure mathématique qui permet de représenter l'évolution des polluants mesurables en régime transitoire de fonctionnement du moteur dans tout son domaine d'exploitation admissible. Dans l'optique d'une commande par ordinateur numérique, une démarche classique consiste à rechercher un modèle en temps discret.

On résume ici deux propositions de modélisation non linéaire de moteur Diesel. La première est basée sur les modèles de type NARMAX, et la seconde utilise l'approche adaptative.

## 2- PRESENTATION DU BANC D'ESSAI

Les essais ont porté sur un moteur Diesel de série turbocompressé, à quatre temps et quatre cylindres en ligne, d'une cylindrée totale de deux litres, fournissant une puissance maximale de 64 kW à 4250 tr/mn. La figure (1) présente le schéma du banc d'essai.

L'installation est équipée d'une instrumentation permettant d'assurer des mesures en régimes stationnaire et transitoire avec système d'acquisition de données rapides et de traitement de ces informations, figure (1). Les grandeurs instantanées mesurées sont la position du levier de commande du cran de combustible, le couple et le régime du moteur, la pression cylindre, la pression de suralimentation, le débit d'air, le régime du turbocompresseur, la concentration des hydrocarbures "HC" et l'opacité des fumées. L'accouplement entre le moteur et le frein à courant de Foucault est réalisé par un couple-mètre instantané de haute sensibilité. Cette installation est également dotée d'une chaîne de mesure des polluants : les oxydes d'azote (NO, NOx), les oxydes de carbone (CO, CO<sub>2</sub>), les hydrocarbures "HC" et l'opacité des fumées.

La détermination des constantes de temps relatives aux différents analyseurs utilisés (tableau 1), a permis de conclure que seules la concentration des hydrocarbures «HC» et l'opacité des fumées être mesurées correctement en régime transitoire.

Les essais sont effectués à une température d'eau de refroidissement moteur, réglée à 80°C. La température moyenne d'admission d'air est de 25°C et la pression ambiante dans la cellule d'essais, voisine de la pression atmosphérique. On a effectué des essais en régime transitoire dans tout le domaine de fonctionnement du moteur. L'enregistrement des signaux est réalisé "on line" avec une fréquence de 20 Hz. Les transitoires sont ceux créés soit par une variation rapide du couple résistant "C" appliqué au vilebrequin soit par une variation rapide de la position du levier de commande du cran de combustible "La". Ce sont ces derniers transitoires qui intéressent le plus notre étude. En effet, pour une variation rapide de "La", il est montré que la réponse du carburant est immédiate alors que l'air accuse un retard pendant lequel la richesse émet très rapidement et conduit à un accroissement des émissions HC. L'analyse des réponses expérimentales a révélé que dans le cas des transitoires créés uniquement par une variation de couple résistant "C", la quantité des HC émise par les gaz d'échappement est toujours faible comparée à celle produite par le transitoire dû levier de commande "La", figure (2). Cela est dû au fait qu'un freinage du moteur conduit à une action quasi sur l'air et le carburant, contrairement au cas des transitoires d'accélération. En conséquence, La variable "C" sera considérée comme une perturbation mesurable pour le modèle décrivant l'évolution des HC et l'opacité des fumées.

### **3- MODELES ELABORES**

La modélisation en régime transitoire des espèces polluantes par voie de connaissance est extrêmement complexe à cause des forts couplages aéro/thermo/chimique, Des modèles de formation des suies, HC, NO, NOx et COx sont actuellement en cours de développement [2, 3] dont certains dans notre laboratoire mais n'ont pas encore donné, à notre connaissance, des résultats utilisables sur des codes de calculs directs du type KIVA ou SPEED. Ceci est dû au fait que l'état global instantané du moteur dépend d'un grand nombre de variables mécaniques (vitesse moteur, vitesse turbocompresseur, couple moteur des gaz, couple résistant de frottement...), thermodynamiques (températures et pressions des gaz dans la chambre de combustion...), aérodynamiques (vitesse des gaz, taux de tourbillon et de turbulence...), chimiques (vitesse de combustion et de libération d'énergie, vitesse de formation des espèces polluantes...), etc....

La forme du modèle physique qui décrit l'évolution transitoire des polluants HC et des fumées est de loin encore inconnue.

#### **3.1- Présentation du modèle NARMAX\***

(\*) *NARMAX: Non linear AutoRegressive Moving Average with exogenous inputs*

Il existe essentiellement trois classes d'approches pour l'identification des systèmes non linéaires. Ce sont les méthodes basées sur les séries fonctionnelles, les systèmes à non linéarités séparées et les modèles sous forme d'équations différentielles ou d'équations aux différences. Chacune de ces approches possède ses propres caractéristiques qui résultent de la description mathématique utilisée pour décrire le système, les méthodes appliquées pour l'estimation des paramètres des modèles correspondants pouvant éventuellement être les mêmes. La description des algorithmes développés pour ces trois approches peut être trouvée dans la littérature [5] [6] [7].

Une comparaison de ces trois approches, a été effectuée en identifiant un système non linéaire simple, constitué d'une partie linéaire dynamique connectée à une non linéarité statique [8] [9]. Elle montre que les séries fonctionnelles nécessitent souvent l'estimation d'environ 500 paramètres, les modèles dont la structure est à non linéarités séparées n'en utilisent que 40 et les modèles sous forme d'équation aux différences exigent moins de 10 paramètres.

C'est la raison majeure qui nous a conduit à choisir la forme d'équations aux différences prise dans un environnement stochastique: modèle du type NARMAX. De plus avec ce type de modèle on peut approcher la non linéarité du moteur à l'aide de simples fonctions polynomiales [12] Le modèle s'écrit:

$$y(t) = F(y(t-1), \dots, y(t-ny), u(t-1), \dots, u(t-nu), \dots, e(t-1), \dots, e(t-ne)) \pm e(t) \quad (1)$$

Où :  $u(t)$ ,  $y(t)$  et  $e(t)$  représentent respectivement la variable d'entrée, la variable de sortie et une séquence de bruit blanc supposée non corrélée, de moyenne nulle et de variance finie. La fonction  $F$  est non linéaire par rapport aux entrées-sorties et aux écarts prédits, ces variables étant prises aux instants passés jusqu'à leur ordre respectifs "ne", "ny" et "nu". L'extension au cas multivariable est simple et les conditions d'existence de tels modèles sont définies rigoureusement au plan mathématique dans [11].

Le modèle NARMAX nécessite cependant une procédure d'identification efficace afin d'en extraire une structure simple, car la dimension du modèle peut rapidement croître, conduisant à un modèle ayant peu d'intérêt pratique. On constate sur l'équation (1) que ce modèle possède une infinité des structures équivalentes. En effet, en remplaçant  $y(t-1)$  par le modèle  $F$ , un autre modèle différent de (1) peut être obtenu comme suit:

$$y(t) = F [y(t-2), \dots, y(t-ny-1), u(t-1), \dots, u(t-nu-1), e(t-1), \dots, e(t-ne-1)] + e(t) \quad (2)$$

La difficulté consiste à extraire de (2) le modèle jugé minimal (plus faibles valeurs de  $ny$ ,  $nu$  et  $ne$ ) sur l'application étudiée. L'approche retenue consiste d'abord à rechercher un modèle linéaire local qui sera étendu par la suite aux entrées non linéaires. On choisit un modèle du type ARMAX (\*) défini par:

$$A(z^{-1}) y(t) = B(z^{-1}) u(t-nk) \pm C(z^{-1}) e(t) \quad (3)$$

(\*) ARMAX : Autoregressive Moving Average with eXogenous inputs

avec

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_{na} z^{-na} \quad (4)$$

$$B(z^{-1}) = 1 + b_1 z^{-1} + \dots + b_{nb} z^{-nb} \quad (5)$$

$$C(z^{-1}) = 1 + c_1 z^{-1} + \dots + c_{nc} z^{-nc} \quad (6)$$

$z^{-1}$  étant l'opérateur retard, ( $z^{-1} x(t) = x(t-1)$ ), et  $nk$  le retard pur du système.

La forme de  $y(t)$  résulte de deux considérations. D'une part les grandeurs "La" et "C" sont indépendantes. D'autre part, par suite de l'additivité des déplacements induits par "La" et "C" sur la position de crémaillère et donc sur le débit de gazole, on admet que ces variables se combinent encore linéairement durant l'étape transitoire. Cette hypothèse a été vérifiée dans [2]. Les grandeurs "La" et "C" sont des données séparables dans le modèle (1) de la forme:

$$y(t) = F_1[y(t-1), \dots, y(t-ny_1), La(t-1), \dots, La(t-1), \dots, La(t-nu_1), e(t-1), \dots, e(t-ne_1)] + F_2[y(t-1), \dots, y(t-ny_2), \dots, C(t-1), \dots, C(t-nu_2), e(t-1), \dots, e(t-ne_2)] + e(t) \quad (7)$$

Les fonctions  $F_1$  et  $F_2$  caractérisent les non linéarités du modèle recherché, respectivement en "La" et "C". Elles peuvent prendre plusieurs formes mathématiques. Dans le but de garder une certaine simplicité à ce modèle, nous avons choisi de simples monômes de degré maximal égal a deux. On aboutit à un modèle relatif aux variables liées à la pollution de structure explicite 7.

$$y_k(t) = \sum_{i=1}^2 \left\{ a_i \cdot y_k(t-i) + \sum_{j=1}^2 \left[ \left( b_{1ij} \cdot u_i(t-j)^2 + b_{2ij} \cdot u_i(t-j) \cdot y_k(t) + \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. b_{3ij} \cdot u_i(t-j-1)^2 + b_{4ij} \cdot u_i(t-j-2) \cdot y_k(t) \right) \right] \right\} + c_{1ij} \cdot u_i(t-j-1)^2 + b_{2j} \cdot e_i(t-j-2) \cdot y_k(t) \quad (8)$$

avec:

$y_k$  : sortie,  $k = 1$  ---> sortie HC,  $k = 2$  ---> sortie Opacité des fumées,  $u_i$ : entrée,  $i = 1$  ---> entrée "La",  $i = 2$  ---> entrée "C",  $a_j, b_{nij}, C_{nj}$  : coefficient du modèle.

Par rapport à l'équation (7), on remarque que dans le modèle (8) on a :  $ny_1 = ny_2 = 2$  et  $nul = nu_2 = nd = ne_2 = 4$ , ce qui lui confère une certaine simplicité. Ce modèle contient le modèle linéaire local instationnaire et le modèle non linéaire stationnaire.

### 3.2- Résultats obtenus

Les courbes des figures (3-4) illustrent des exemples types de résultats obtenus par ce modèle pour simuler les HC et l'opacité des fumés. Le débit massique d'air et le régime moteur sont également représentés sans décrire le modèle correspondant. Les essais montrent que le temps de réponse du

moteur Diesel et son retard pur (temps qui s'écoule entre l'action sur l'excitation "La" et l'instant du début de variation de la variable de sortie) sont différents, selon qu'il s'agit d'un échelon positif ou négatif sur le levier de commande "La". L'intérêt du modèle proposé réside dans la capacité à prendre en compte correctement ce type de comportement tout en restant bien prédictif et en affichant une bonne stabilité.

Sur le plan expérimental, on confirme que les régimes transitoires sont nocifs du point de vue des émissions d'hydrocarbures "HC". En effet, le calcul de la valeur moyenne de ces émissions lors de notre campagne de mesure indique des augmentations comprises entre 30 et 50% lors de transitoires de durée égale 30 secondes.

### 3.3 Modèle adaptatif

Deux considérations incitent à réaliser un modèle adaptatif. D'une part le modèle non linéaire obtenu, équation (8), reste valable tant que les caractéristiques du moteur sont constantes. Or, ces dernières évoluent avec le vieillissement du moteur et le modèle élaboré perd de sa représentativité. Il est donc nécessaire d'avoir un modèle adaptatif pouvant compenser les variations des paramètres. D'autre part, on sait [2] que le comportement du moteur peut-être correctement approché par un modèle linéaire lorsqu'il fonctionne dans une zone restreinte autour d'un point de fonctionnement. Lorsqu'il s'agit des transitoires importants pour lesquels l'excursion autour du point de fonctionnement est large, le modèle linéaire n'est plus valable à cause de la non-stationnarité de ses paramètres. Leurs variations peuvent être compensées par un modèle linéaire dont les paramètres s'adaptent automatiquement à tout instant en fonction de l'évolution du point de fonctionnement. Il s'agit alors d'un modèle linéaire à paramètres variables en temps réelle, en fonction des variables "La" et C. Les paramètres sont recalculés à chaque pas d'échantillonnage. Comme la grandeur "La(t)" est appliquée par un bloqueur d'ordre zéro, elle est constante pendant une période d'échantillonnage. On peut donc considérer une structure similaire au modèle linéaire (3) dont les paramètres sont recalculés à chaque pas d'échantillonnage.

Nous considérons le modèle linéaire ARX (\*) défini par:

$$A(z^{-1}) y(t) = z^{-nk} B(z^{-1}) u(t) + c(t) \quad (9)$$

(\*) ARX *AutoRegressive with eXogenous inputs*

Le vecteur des paramètres définis par les équations (4) et (5) du modèle (9) a donné pour composantes :  $q = [a_1, \dots, a_{na}, b_0, \dots, b_{nb}]$ .

L'estimation du retard pur "nk", équation (9), reposera sur la procédure multi-modèles [13] avec identification de trois modèles (équation (9)) en parallèle ayant respectivement des retards nk-1, nk et nk+1. Le retard pur est obtenu par comparaison des variances des résidus des trois structures.

L'estimation des paramètres du modèle est obtenue en minimisant un critère de moindres carrés simples :

$$J(\theta) = \sum_{k=1}^{np} R^2(t, \theta) \quad (10)$$

où  $R(t, \theta)$  est le résidu à l'instant "t", défini par

$$R(t, \theta) = y(t) - y_M(t, \theta) \quad (11)$$

$y_M(t, \theta)$  contient le vecteur des paramètres et  $np$  le nombre de données.

L'algorithme utilisé récurrent C trace constante, est décrit dans [13]. L'absence ou la faiblesse éventuelle de l'excitation "La" sur certains intervalles du temps autour des points de fonctionnement, peut occasionner des difficultés algorithmiques. Il est alors commode, pour mesurer l'information contenue dans les observations, d'introduire une règle de décision [14] qui peut alors être utilisée pour notifier sur l'algorithme si les données vont améliorer ou non l'estimation. Ainsi, tant que la fonction:

$$\sigma(t) = \lambda(t-1) \Phi_n(t-1)^T \Phi_n(t-1) \quad (12)$$

reste inférieur à un certain seuil, les paramètres doivent être figés durant ces intervalles de temps.

Un exemple de résultat type obtenu par le modèle adaptatif est montré sur la figure (5). Nous observons la stabilité de l'algorithme au cours d'un grand nombre d'essais très variés. Ainsi, grâce à l'approche adaptative, on a considéré la non linéarité observée comme une suite d'états linéaires très rapprochés.

#### 4- CONCLUSION

Le moteur Diesel de traction des véhicules est un système à dynamique rapide. Il est le siège d'un ensemble de phénomènes complexes et fortement non linéaires (processus de combustion, suralimentation, transmission du mouvement à l'arbre...). Sa modélisation à l'aide d'une structure NARMAX conduit à une loi qui permet une description concise pendant les régimes transitoires. L'approche adaptative donne satisfaction dans notre cas, bien que l'estimateur utilisé ne possède pas toutes les conditions qui améliorent sa robustesse (factorisation U-D, filtrage et normalisation des données...).

Les modèles développés dans cet article sont essentiels pour la conception d'une stratégie de commande optimale du moteur Diesel.

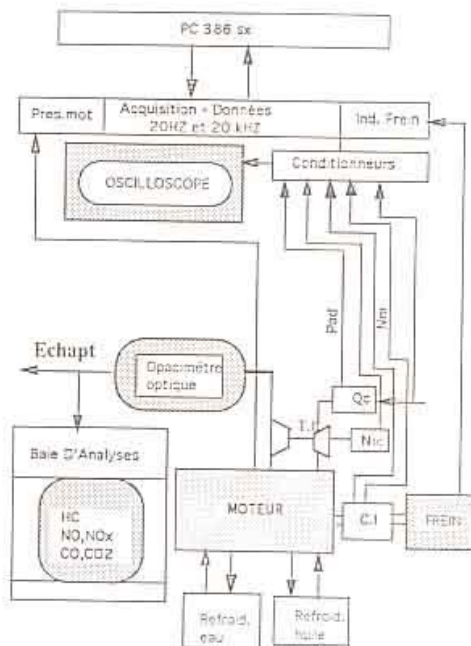


Fig 1 : schéma d'installation

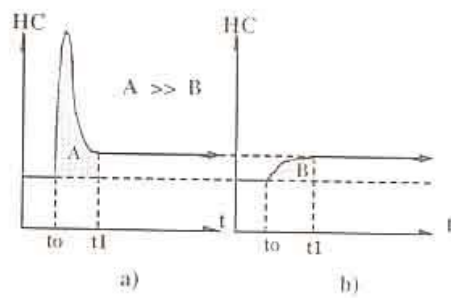


Figure 2 : Exemple type de réponse des HC  
 a) cas d'augmentation de " $L_a$ ", " $C$ " constant,  
 b) cas d'augmentation de " $C$ ", " $L_a$ " constant

Analyseur	Constante de temps (sec)
HC	$T_{HC} = 0,45$
NO	$T_{NO} = 7,50$
NOx	$T_{NOx} = 7,50$
CO	$T_{CO} = 6,50$
CO <sub>2</sub>	$T_{CO_2} = 6,00$
Opf	$T_{Opf} = 0,01$

Tableau 1 : Constantes de temps des analyseurs

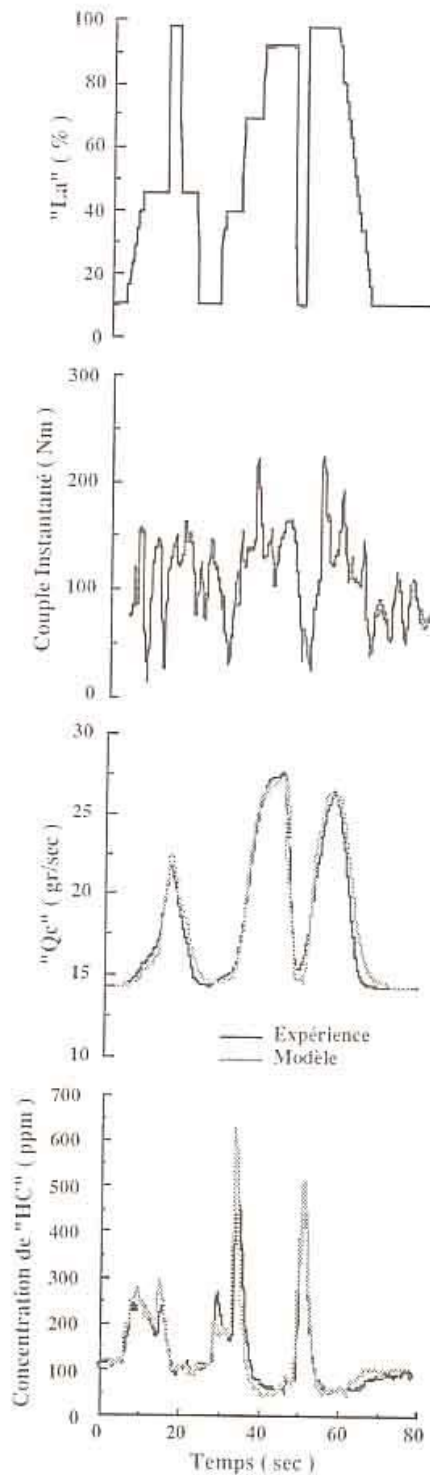


Fig 3 : Débit d'air aspiré et concentration des HC en fonction de " $L_a$ " et  $C$ . Modèle non-linéaire

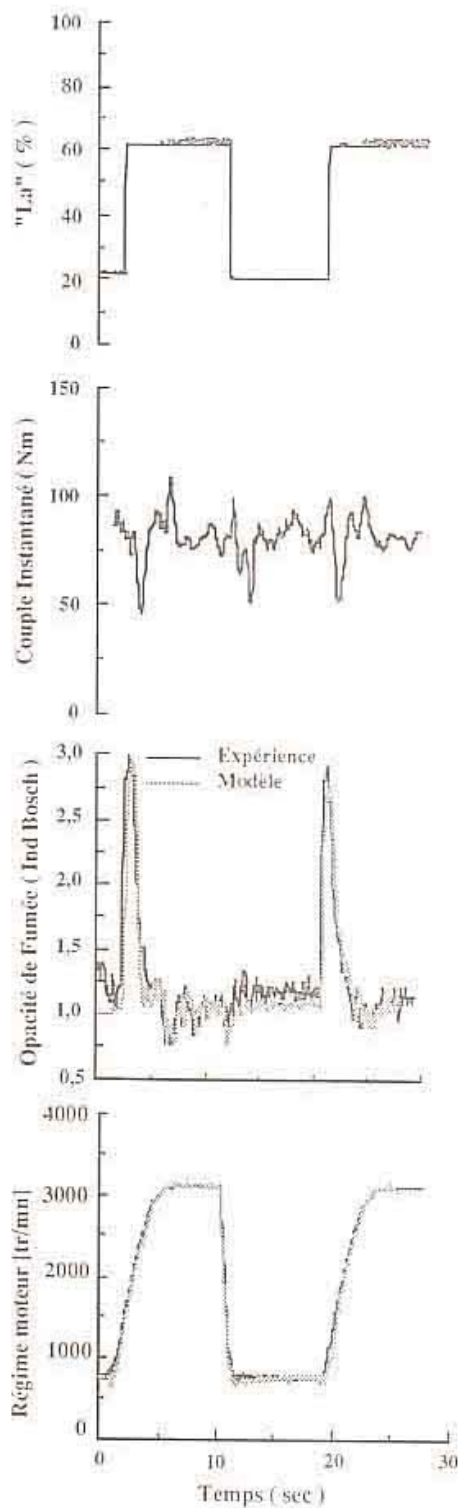


Fig 4 : Opacité des fumées et régime moteur en fonction de  $^{\circ}L_a$  et C. Modèle non-linéaire

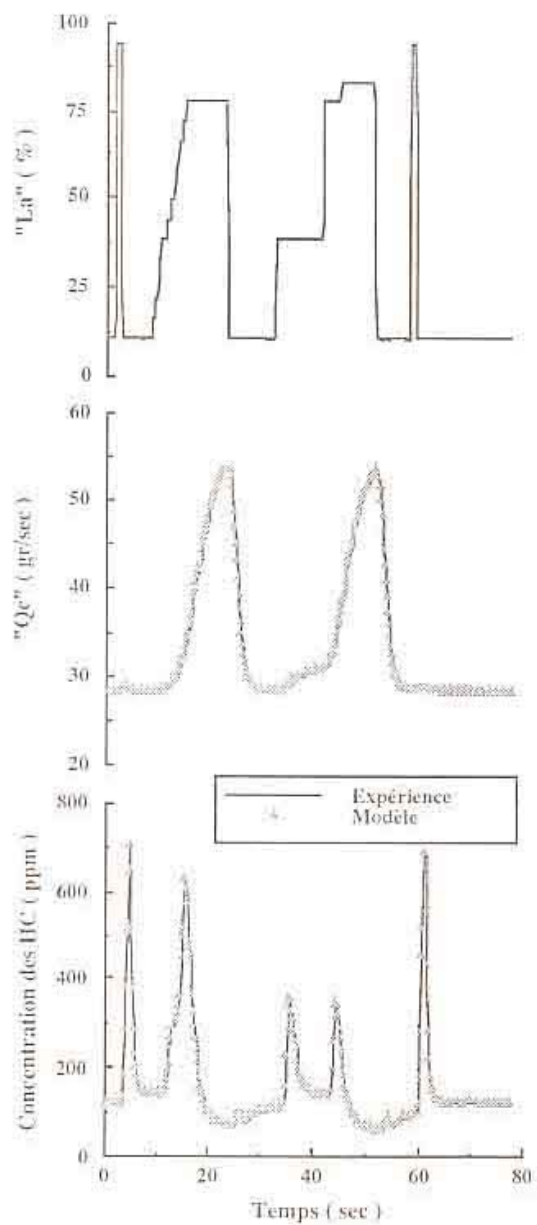


Fig 5 : Comparaison expérience-modèle adaptatif des variables  $Q_c$  et HC. Excitation de l'entrée  $^{\circ}L_a$  composée d'impulsions, de rampe et d'échelons.

## REFERENCES

- [1] R. Joumard, L. Paturel, R. Vidon, J.P. Guitton, A.I. Saber, E. Combette. Emissions unitaires de polluants des véhicules légers. Rapport INIRETS No. 116. Bron- France, 1990.
- [2] T. Hardianto. Etude expérimentale du diesel en régime transitoire, modélisation des émissions gazeuses.. Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, France, 1992.
- [3] N. Guerrassi, J.C.C. Champoussin. Time-space description of convective and radiative heat transfer on cylinder head of DI Diesel Engine. Eurotherm 15, IMF Toulouse, 251-256, 4-6 December 1991.
- [4] P. I. Willams, M. K. Abbass, G. E. Andrews, K. D. Bartle, Diesel particulate emissions: The role of unburned fuel. Combustion and Flame, 75, 1 - 24, 1989.
- [5] M. Korlmann and H. Unbehauen. Identification methods for non linear MISO systems. IFAC 10th Triennial World Congress, Munich, FRG, 1987
- [6] S.A. Billings and M.B. Fadzil. The practical identification of non-linear systems. IFAC Symp. Ident.& Syst. Part. Est. York, 155-160, 1985.
- [7] S. Chen, S.A. Billings. Representation of non-linear systems : the NARMAX model. Int. J. Control, 49, 1013- 1032, 1989.
- [8] S.A. Billings, M.B. Fadzil, J.L. Sulley, P.M. Johnson. Ident of a non linear d equation model of an industrial Diesel generator. Mechanical Systems and Processings 2, 59-76, 1988.
- [9] S. Chen, S.A.. Billings. C.F.N. Cowan, P.M. Grant, Practical identification of NARMAX models using radial basis function. Int. J. Control, 6, 1327-1350, 1990.
- [10] S.A. Billings. Identification of non-linear systems- a survey. Proceedings of the IEE, part D, 127, 272-285, 1980.
- [11] I.J. Leontaritis. S.A. Billings, Input-Output parametric models for non-linear systems - Part 1: Deterministic non-linear systems; Part 2: Stochastic non linear systems. Int. J. Control, 41, 303-344, 1985.
- [12] E.D. Sontag. Realization theory of discrete-time non linear systems: Part I, the bounded case. IEEE Trans. on circuits and systems, 26, 342-356, 1979.
- [13] K. Najim, H. Youlal, M. Najim, B. Dahhou, M. Haloua, R. Benayad. Modélisation et commande adaptative par placement de pôles d'une colonne à distiller. APII., 23, 263-282, 1989
- [14] M. M'saad. Sur l'applicabilité de la commande adaptative. Thèse de Doctorat d'état, INPG, France, 1987.
- [15] G.Gilles, N. Laggoune, Digital control of bilinear continuous process. Applications to chemical pilot plant. Symposium IFAC, Digital computer applications to process control, Vienne, Autriche, 1985.
- [16] Rameshwar P. Sharma, Subramaniam Ganesam, Bharat Thacker. Closed loop engine control using multiple microprocesseurs. Fuels, Controls and Aftertreatment for low Emissions Engines. ASME, ICE, 15, 57-64, 1991.
- [17] C. B. Vaughn, W. H. Sun, J. B. Howard, J. P. Longwell. Measurements and Modeling of Light Hydrocarbons in Rich C2 114 Combustion in a jet-Stirred Reactor. Combustion and Flame, 84, 38-46, 1991.