

REPRESENTATIONS NON LINEAIRES DE L'AUTOMATIQUE AVANCEE. APPLICATION AU MOTEUR DIESEL TURBOCOMPRESSE

Reçu le 14/07/1999 – Accepté le 12/11/2000

Résumé

Cet article décrit et commente les principaux modèles non linéaires de représentation, définis en temps discret. Il s'agit des séries fonctionnelles de Volterra, des modèles décrits dans l'espace vectoriel d'état, des systèmes à non linéarités séparées et des modèles sous forme d'équations aux différences. Ceci offrira aux utilisateurs un aperçu pratique sur les choix à réaliser par rapport aux objectifs liés à l'exploitation de ces modèles: simulation ou commande. Quelques exemples portant sur l'identification non linéaire du comportement dynamique du moteur Diesel suralimenté par turbocompresseur, illustrent l'intérêt des modèles NARMAX (Non linear Auto Regressive Moving Average with eXogenous inputs), notamment par leur puissance prédictive.

Mots clés: Modélisation- Identification- Systèmes non linéaires.

Abstract

This paper describe and comment the main of "Black-Box" non linear models defined in discrete-time. Its deals with Volterra series representation, vectorial state space models, block oriented systems and difference equation models. Hence, users can have a practically point of view to select an appropriate mathematical description of the system taking into account the exploitation finality: simulation or control. A turbocharged Diesel engine application is presented to show the important interest of NARMAX (Non linear Auto Regressive Moving Average with eXogenous inputs) models, notably their predictive capacity.

Key words: Modelling- Identification- Non linear systems.

A. LIAZID

Laboratoire des Technologies
de l'Environnement
Département de Mécanique
ENSET B.P 1523
El-Mnaouer, Oran, Algérie

ملخص

يصف هذا المقال و يعلق على النماذج الأساسية غير الخطية والموصوفة في زمن متقطع. يتعلق الأمر بسلاسل دوال فولتيرا (Volterra). إذ توجد بعض النماذج موصوفة في الفضاء الشعاعي، كما توجد بعض الأنظمة اللاخطية منفصلة و نماذج أخرى على شكل معادلات تفاضلية. مما يعطي للمستعملين نظرة تطبيقية على الاختيار بالنسبة للأهداف المنوطة و المتعلقة باستغلال هذه النماذج : المحاكاة أو التحكم الآلي.

إن بعض الأمثلة الخاصة بتعريف التصرف غير الخطي و الحركي لمحرك ديزال (DIESEL) مزود بهواء مضغوط بواسطة تيربو-كومبريسير (Turbo-Compresseur)، تبين مدى أهمية نماذج NARMAX:

"Non linear Auto Regressive Moving Average
With eXogenous inputs"

خاصة من حيث قوتهم التنبؤية .
الكلمات المفتاحية: النمذجة، التعريف، النظام غير الخطي.

La modélisation des systèmes a toujours attiré beaucoup d'attention et d'intérêt tant sur le plan théorique qu'au niveau des applications. Il faut dire que l'enjeu est de taille puisqu'il s'agit de réduire un phénomène à une équation mathématique. La tentative d'une modélisation d'un système complexe devient quelque peu ardue dès que l'on s'éloigne des "sentiers battus". C'est le cas, par exemple, des systèmes non linéaires qui englobent une multitude de comportements différents, difficiles à caractériser. En pratique, la plupart des systèmes physiques présentent des non linéarités plus ou moins accentuées dans une zone réduite et il est souvent possible de les représenter par des modèles linéaires.

On considère ici la modélisation des systèmes non linéaires discrets, basée exclusivement sur les données entrées - sorties. Il existe essentiellement quatre approches de base pour l'identification des systèmes non linéaires. Ce sont les méthodes basées sur les séries de fonctions spéciales (Volterra, Wiener, Laguerre, Walsh, Fourier, etc.), les méthodes basées sur une description dans l'espace vectoriel d'état, les systèmes à non linéarités séparées et les modèles sous forme d'équations aux différences. Chacune de ces quatre approches possède ses propres caractéristiques qui résultent de la description mathématique utilisée pour décrire le système, les méthodes appliquées pour l'estimation des paramètres pouvant éventuellement avoir des points communs. La description des algorithmes développés pour ces approches est détaillée dans la littérature spécialisée [1-4].

TYPOLOGIE DES MODELES NON LINEAIRES

Les principales formes mathématiques utilisées pour décrire les systèmes non linéaires sont ici succinctement présentées. On considère pour la simplicité des notations, les systèmes monovariables.

Représentation sous forme de séries fonctionnelles

La description des caractéristiques entrées-sorties d'un système non linéaire sous forme de série fonctionnelle a été largement utilisée en temps continu. Les séries de Volterra ou de Wiener sont la généralisation pour un système non linéaire de la réponse impulsionnelle des systèmes linéaires. Les séries de Volterra permettent d'obtenir une solution approchée à certaines équations différentielles non linéaires relativement "douces" [5]. C'est une généralisation du théorème de Stone-Weierstrass sur l'approximation d'une fonction continue par une suite polynomiale.

En temps discret, une description entrées-sorties des systèmes non linéaires sous forme de série de Volterra discrète est donnée par:

$$y(t) = h_0(t) + \sum_{i=0}^t h_{1i} u(t-i) + \sum_{i=0}^t \sum_{j=0}^t h_{ij} u(t-i)u(t-j) + \dots + \sum_{i,j,k,l}^t h_{n(i,j,k,l,\dots)} u(t-i)u(t-j)u(t-k)u(t-l)\dots + \dots \quad (1)$$

où $h_i(t)$ sont les noyaux d'ordre i représentant le système non linéaire.

Représentation sous forme d'équations d'état

Les systèmes physiques non linéaires peuvent être décrits à l'aide d'une représentation dans l'espace vectoriel d'état. En temps discret, le modèle s'écrit:

$$\begin{cases} x(t+1) = g_d[x(t), u(t)] \\ y(t) = h_d[x(t), u(t)] \end{cases} \quad x(0) = 0 \quad (2)$$

où t désigne l'instant d'échantillonnage, $x(t)$ est le vecteur d'état de dimension finie à l'instant t , $x(0)$ représente l'état initial, $u(t)$ et $y(t)$ sont respectivement les entrées et les sorties du système à l'instant t . Si $x(0)$ est un état d'équilibre, un simple changement de variable peut transférer le système à un état initial nul. La forme exacte du modèle (2) est en général inconnue et sa détermination difficile. En effet, le développement de la fonction $g_d[x(t), u(t)]$ est de dimension théoriquement infinie.

Les modèles à état affine représentent une voie pour approximer le modèle (2). En supposant (pour la simplicité) que $x(0) = 0$, on remplace (2) par un modèle sous forme d'espace d'état approché, basé sur un polynôme de degré $2m$ [6]:

$$x(t+1) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m A_{ij} x^{(i)}(t) u^{(j)}(t), \quad A_{00} = 0$$

$$y(t) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m B_{ij} x^{(i)}(t) u^{(j)}(t), \quad B_{00} = 0$$

où $x^{(i)}(t) = x(t) \otimes \dots \otimes x(t)$ (i termes de $x(t)$ et \otimes symbolise le produit de Kronecker). Ensuite, on définit un nouveau vecteur d'état:

$$x^*(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ x^2(t) \\ \vdots \\ x^m(t) \end{bmatrix}$$

Alors, le modèle d'état affine, pour l'état augmenté $x^*(t)$ peut être obtenu. Les méthodes de construction des modèles à état affine à partir d'observations expérimentales sont décrites et discutés dans [7], [8] et [9]. L'utilisation de ce type de représentation se justifie pleinement pour les systèmes qui apparaissent naturellement affines dans leurs états, comme par exemple l'échantillonnage exacte des systèmes continus bilinéaires [6].

Systèmes à non linéarités séparées

Dans le but de réduire le volume des calculs associés aux méthodes basées sur les séries fonctionnelles, on peut, selon l'application étudiée, considérer les systèmes à non linéarités séparées. Ces systèmes peuvent être représentés par l'interconnection de sous systèmes linéaires dynamiques à des sous systèmes non linéaires statiques. La philosophie sous-jacente à cette approche consiste à éviter une description boîte noire en identifiant ces systèmes en terme d'éléments individuels et en préservant la structure du système tout en fournissant de précieuses informations pour la commande. Les systèmes les plus étudiés dans cette classe sont représentés par figure 1.

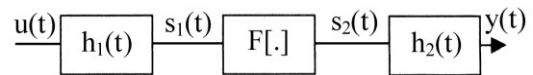


Figure 1: Système à non linéarités séparées.

Dans ces systèmes, les signaux intermédiaires $s_1(t)$ et $s_2(t)$ de la figure 1 sont supposés inaccessibles aux mesures. Une forme bien connue issue de cette représentation correspond au modèle d'Hammerstein dont la relation entrée-sortie s'écrit:

$$y(t) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} F[u(t)] \quad (3)$$

La représentation schématique correspondante est celle de la figure 2.

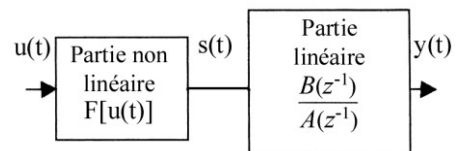


Figure 2: Structure d'Hammerstein.

Si l'on associe en parallèle plusieurs modèles d'Hammerstein, on retrouve le modèle d'Uryson [1].

Représentation sous forme d'équations aux différences

Pour les systèmes linéaires discrets, le modèle sous forme d'équations aux différences s'écrit:

$$y(t) = a_0 + \sum_{i=1}^{ny} a_i y(t-i) + \sum_{i=1}^{nu} b_i u(t-i) + \sum_{i=0}^{ne} c_i e(t-i) \quad (4)$$

Il est bien connu que ces modèles fournissent une description plus concise que la réponse impulsionnelle et avec moins de volume de calcul si la matrice de Hankel est de rang fini. Les modèles décrits par l'équation (4) sont appelés modèles du type ARMAX (Auto Regressive Moving Average with eXogenous inputs). Une description analogue existe pour les systèmes non linéaires. En effet, le modèle:

$$y(t) = F[y(t-1), \dots, y(t-ny), u(t-1), \dots, u(t-nu), \dots, e(t-1), \dots, e(t-ne)] + e(t) \quad (5)$$

est connu sous le nom de modèle NARMAX (Non linear Auto Regressive Moving Average with eXogenous inputs) [6,10], pour sa ressemblance au modèle (4). Leontaritis et Billings [11] ont rigoureusement prouvé qu'un système discret non linéaire invariant peut toujours être représenté par un modèle NARMAX dans une région autour d'un point d'équilibre s'il répond aux deux conditions suffisantes: la réponse du système possède une réalisation finie et il existe un modèle linéarisé autour d'un point d'équilibre choisi. L'extension au cas multivariable et les conditions d'existence de tels modèles sont définies rigoureusement au plan mathématique [12].

COMMENTAIRES TECHNIQUES DES DIFFERENTES APPROCHES

Quelques commentaires clefs sont maintenant développés pour une utilisation pratique rationnelle des modèles présentés.

Si l'approche basée sur la représentation de Volterra offre l'avantage de séparer la partie linéaire des parties non linéaires avec des développements mathématiques forts séduisants, son intérêt pratique reste très limité car les calculs et modèles auxquels elle peut aboutir sont très complexes. En effet, c'est une méthode difficile à mettre en œuvre vu le nombre excessif d'observations nécessaires pour caractériser une non linéarité, conjugué avec le grand nombre de termes à identifier pour connaître simplement les premiers noyaux du développement.

L'intérêt pratique de l'utilisation des modèles à état-affine consiste en la possibilité d'élaborer une loi de commande pour les procédés qui peuvent être supposés valablement comme linéaire à paramètres variables [7,8,9,13]. Par ailleurs, cette approche permet de rendre compte du niveau de complexité de la non linéarité du procédé sans toutefois nécessiter autant de volume et de temps de calcul que les séries fonctionnelles. Cependant, la

$$\left| y(t) = \sum_{i=1}^r \frac{f_i[u(t-1), \dots, u(t-r)]}{f_0[u(t-1), \dots, u(t-r)]} y(t-i) + \dots + \frac{f_{r+1}[u(t-1), \dots, u(t-r)]}{f_0[u(t-1), \dots, u(t-r)]} + \sum_{i=1}^r \frac{f_{r+1+i}[u(t-1), \dots, u(t-r)]}{f_0[u(t-1), \dots, u(t-r)]} e(t-1) + e(t) \right| \quad (7)$$

détermination de la forme exacte du modèle reste un problème très difficile à résoudre.

Une comparaison exemplaire entre les approches basées sur les séries fonctionnelles, les systèmes à non linéarités séparées et les modèles sous forme d'équations aux différences a été effectuée en identifiant un système non linéaire simple, constitué d'une partie linéaire dynamique connectée à une non linéarité statique. Elle montre que les séries fonctionnelles nécessitent l'estimation d'environ 500 paramètres, les modèles à non linéarité séparée n'en utilisent que 40 alors que les modèles sous forme d'équations aux différences exigent moins de 10 paramètres [14].

C'est la raison majeure qui permet de recommander le choix de la forme générale du modèle non linéaire sous forme d'équations aux différences, modèle du type NARMAX [6]. Ce modèle généralise en fait les modèles ARMAX largement utilisés pour les systèmes linéaires. S'ajoute à cela le fait qu'avec ce type de modèle, on peut approcher la non linéarité du procédé à l'aide de fonctions spéciales [15] ou de simples fonctions polynomiales [16-18]. De surcroît, grâce à l'algorithme déduit des travaux de Diaz et Desrochers [19], on peut toujours, à partir d'un modèle non linéaire déterministe écrit sous forme d'équations aux différences polynomiales, traduire aussi bien vers une représentation dans l'espace vectoriel d'état que vers une série de Volterra. En fait, ce type de modèle peut être considéré comme une généralisation des autres modèles, comme ceux d'Hammerstein, de Volterra, de Wiener, ou encore les modèles bilinéaires.

DESCRIPTION DES MODELES NARMAX

La densité des fonctions polynomiales dans l'espace des fonctions continues a permis l'émergence de trois formes particulières du modèle (5). Elles peuvent servir de base pour l'identification des systèmes non linéaires. Ces formes étudiées par Stontag [17] sont introduites et comparées par Chen et Billings [6].

La première forme est la plus simple. Elle correspond à l'équation (5) avec F comme fonction polynomiale des entrées, sorties et écarts prédits, ces variables étant décalées dans le temps. La deuxième forme est dite modèle stochastique rationnel. Elle correspond aux systèmes dont la réponse F est polynomiale et de réalisation finie. Elle s'écrit:

$$\left| y(t) = \frac{f[y(t-1), \dots, y(t-r), u(t-1), \dots, u(t-r), e(t-1), \dots, e(t-r)]}{g[y(t-1), \dots, y(t-r), u(t-1), \dots, u(t-r), e(t-1), \dots, e(t-r)]} + e(t) \right| \quad (6)$$

où r est l'ordre du système, $f(\cdot)$ et $g(\cdot)$ sont des polynômes de degré fini.

Il est clair que ce modèle contient le modèle polynomial comme cas spécial. Il est d'ailleurs plus efficace d'approcher les systèmes non linéaires en cherchant dans cette classe plus large. Si en plus, la réponse polynomiale F est bornée, le modèle stochastique à sortie affine (7) correspond à la troisième forme. C'est un modèle qui possède une réalisation d'état-affine [6]. Il s'écrit:

$$\left| y(t) = \sum_{i=1}^r \frac{f_i[u(t-1), \dots, u(t-r)]}{f_0[u(t-1), \dots, u(t-r)]} y(t-i) + \dots + \frac{f_{r+1}[u(t-1), \dots, u(t-r)]}{f_0[u(t-1), \dots, u(t-r)]} + \sum_{i=1}^r \frac{f_{r+1+i}[u(t-1), \dots, u(t-r)]}{f_0[u(t-1), \dots, u(t-r)]} e(t-1) + e(t) \right| \quad (7)$$

où $f_i(\cdot)$, $i = 0, 1, \dots, r+1$ sont des polynômes de degré fini.

On note que les modèles (7) ne contiennent pas de termes de sorties élevées en puissance ou des termes de produits croisés avec la sortie. Cela peut être considéré comme une restriction. Par conséquent, l'approximation des systèmes hautement non linéaires par ces modèles exige beaucoup de termes et on ne sait pas trop comment approximer les termes tels que $y^2(t-1)$. De plus, quand le procédé fonctionne autour d'un point de fonctionnement où le modèle non linéaire est valide, il est souhaitable que le modèle non linéaire dégénère en un modèle linéaire. L'inconvénient avec un modèle à sortie-affine est qu'on ne sait pas comment effectuer cela. S'ajoute aussi le fait que pour les modèles (7) il faut que la condition: $f_0[u(t-1), \dots, u(t-r)] \neq 0$ soit toujours respectée, et si $f_0(\cdot)$ est différent de zéro mais de valeur faible, une haute précision dans l'exécution des opérations algébriques est nécessaire. Le modèle rationnel (6) présente les mêmes difficultés, ce qui n'est pas le cas du modèle polynomial.

Le grand avantage du modèle NARMAX polynomial sur les modèles (6) et (7) est probablement qu'il est linéaire par rapport aux paramètres. Par conséquent, plusieurs techniques d'identification linéaire peuvent être facilement étendues au modèle non linéaire polynomial et plusieurs procédures combinées de détermination de structure et d'estimation des paramètres peuvent être appliquées.

APPLICATION DU MODELE NARMAX

Le modèle NARMAX peut être exploité pour identifier une large classe de procédés hautement non linéaires. A titre d'illustration, on présente quelques applications publiées, appuyées par nos résultats. L'ensemble des applications portent sur le moteur Diesel suralimenté par turbocompresseur. En effet, les moteurs Diesel suralimentés sont défaillants en régimes de fonctionnement transitoires. C'est ainsi que la consommation et la pollution peuvent dépasser de 30% celles des régimes stabilisés. Par conséquent, un réglage dynamique du fonctionnement du moteur et souhaitable et s'avère bénéfique sur les plans économique et écologique.

Plusieurs auteurs ont traité la modélisation du moteur Diesel suralimenté par turbocompresseur au vu de son importance dans l'industrie du transport et de l'énergie. Ce système est très complexe et sa modélisation physique est une tâche très fastidieuse qui fait intervenir des dizaines de variables internes "microscopiques". L'utilisation de ce type de modèles en vue d'une commande nécessiterait beaucoup de capteurs onéreux et serait très difficile à mettre en œuvre. Pour toutes ces raisons, l'approche d'une modélisation à l'aide des outils de l'automatique est entreprise car elle ne fait intervenir que des variables "macroscopiques" exogènes.

Les applications qui suivent rentrent dans ce cadre et portent aussi bien sur des moteurs de traction automobile que sur des Diesel lourds stationnaires prévus dans les groupes de secours de production d'énergie électrique.

Ainsi, on peut évoquer les travaux effectués par Billings et al. [14] portant sur la modélisation du couple moteur en

fonction de la position du cran de combustible d'un Diesel stationnaire de 12 cylindres et 4.6 MW de puissance. Le modèle obtenu est représenté par l'équation (8):

$$y(t) = a_1 + a_2y(t-1) - a_3u(t-1) - a_4y(t-2)u(t-1) + a_5y(t-2)u(t-2) + a_6u^3(t-1); \quad a_i > 0 \quad (8)$$

Il s'agit donc d'un modèle polynomial renfermant seulement 6 paramètres. La figure 3 traduit les résultats graphiques de ce modèle.

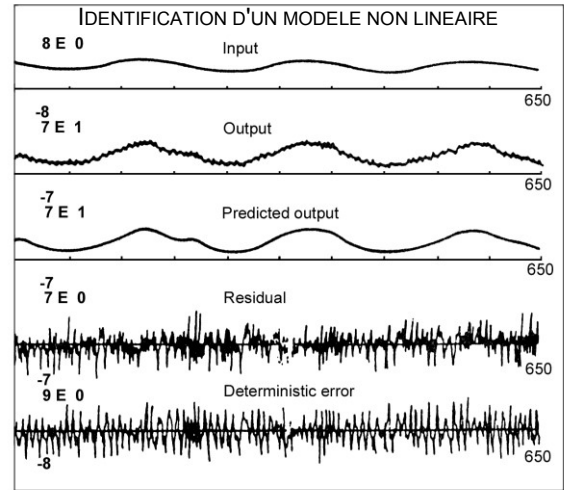


Figure 3 [14]: Simulation non linéaire du couple moteur en fonction de la position du cran de combustible d'un moteur Diesel stationnaire d'un groupe électrogène de 4.6 MW de puissance.

De façon similaire, S. Chen et al. [15] ont abouti à un modèle NARMAX polynomial de 23 paramètres lors de la modélisation d'un moteur Diesel de traction automobile. Leur objectif consistait à traduire la relation entre la vitesse de rotation du moteur et la position du cran de combustible. En comparaison, Billings et al. [20] ont, pour la même application, abouti à un modèle de plus de 220 paramètres car l'approche adoptée s'écartait de la structure polynomiale. Le modèle obtenu est construit sur la base des fonctions RBF (Radial Basis Functions) et est présenté par l'équation (9). Ce modèle est considéré par ses auteurs comme "parcimonieux", mais au vu du nombre de ses paramètres (228 paramètres), il reste d'un niveau de complexité élevé.

$$y'(t) = \lambda_0 + \sum_{i=1}^{32} \lambda_i \phi(|x(t) - c_i|) \quad (9)$$

où:

$$|x(t) - c_i| = \left[\sum_{k=1}^3 (y(t-k) - c_{ki})^2 + \sum_{k=4}^6 (u(t-k+3) - c_{ki})^2 + \sum_{k=7}^9 (\varepsilon(t-k+6) - c_{k0})^2 \right]^{1/2}$$

$$\phi(|x(t) - c_i|) = |x(t) - c_i|^2 \log(|x(t) - c_i|)$$

λ_i : paramètres ($0 \leq i \leq p$)

$x(t)$: vecteur de données tel que:

$$x(t) = [y(-1) \dots y(t-ny), u(t-1) \dots u(t-nu), \varepsilon(t-1) \dots \varepsilon(t-ne)]^T$$

$\varepsilon(t)$: écart prédit,

nu , ny , ne : respectivement retards maximaux de $y(t)$, $u(t)$ et $e(t)$.

L'identification des caractéristiques mécaniques et écologiques d'un Diesel à injection indirecte de traction automobile à 4 temps, 4 cylindres en ligne et de puissance nominale 64 kW, a fait l'objet de travaux effectués par A. Rachid *et al.* [21] ainsi que A. Liazid *et al.* [22]. Le premier travail a couplé la procédure d'identification GMDH (Group Method of Data Handling) au modèle NARMAX. Cette idée originale avait pour objectif d'établir une procédure d'identification systématique de la structure du modèle NARMAX polynomial. Cependant, le succès de cette méthode n'a pas conduit à un modèle réduit puisqu'il renfermait 180 paramètres. Pour des raisons d'allègement de cet article, ce modèle ne sera pas présenté. Seuls des résultats graphiques seront montrés dans la figure 4 où sont identifiées les émissions gazeuses des hydrocarbures imbrûlés 'HC' à l'échappement du moteur en fonction de la position de l'accélérateur 'La' et du couple résistant au moteur 'Cr'.

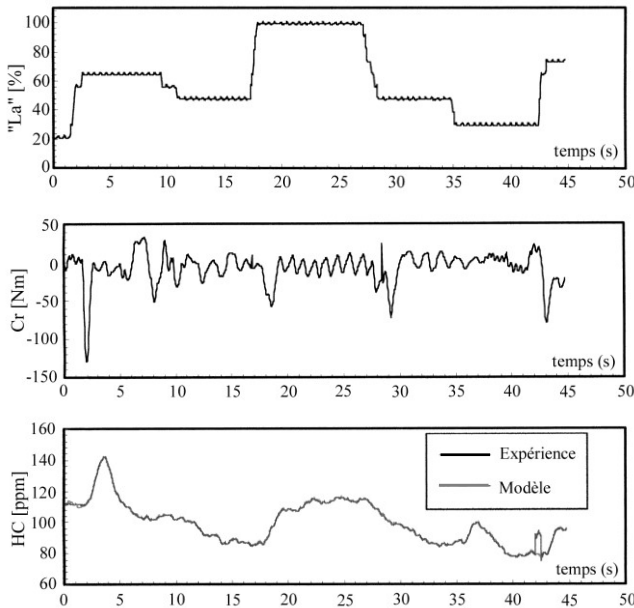


Figure 4 [21]: Simulation non linéaire des hydrocarbures imbrûlés 'HC' en fonction de la position d'accélérateur 'La' et du couple résistant au moteur 'Cr' d'un Diesel à injection indirecte, de traction automobile, de puissance nominale 64 kW.

Dans le second travail, l'approche repose d'abord sur la détermination d'un modèle linéaire local qui sera ensuite étendu au cas non linéaire en "forçant" les termes du modèle linéaire en termes non linéaires. Cette approche, très utile, nécessite une certaine expérience car elle repose sur le principe essai-erreur. Le modèle élaboré dans ce dernier travail est présenté par l'équation (10):

$$(10) \quad y(t) = \sum_{i=1}^2 \left\{ [a_i y(t-i)] + \sum_{j=1}^2 \left[(b_{1ij} u_i^2(t-j) + b_{2ij} u_i(t-j)) y(t-1) + (b_{3ij} u_i^2(t-j-1) + b_{4ij} u_i(t-j-2)) y(t-1) \right] \right\}$$

C'est un modèle MISO à structure polynomiale et renferme 18 paramètres. Il traduit le régime du moteur 'Nm' en fonction de la position d'accélérateur 'La' et le couple résistant au moteur 'Cr'. La figure 5 montre clairement la

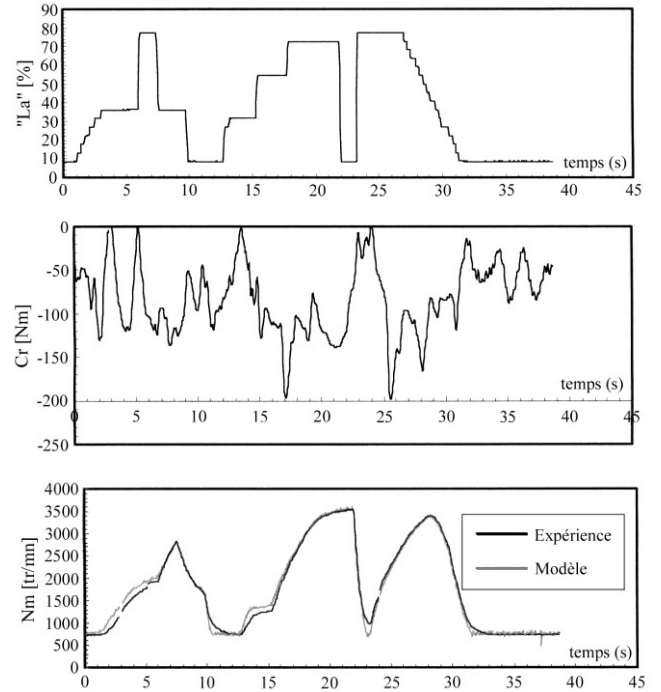


Figure 5 [22]: Simulation non linéaire de la vitesse de rotation 'Nm' en fonction de la position d'accélérateur 'La' et du couple moteur 'Cr' d'un moteur Diesel à injection indirecte, de traction automobile, de puissance nominale 64 kW.

capacité prédictive du modèle NARMAX.

Après ces exemples d'application, on présente maintenant les résultats d'un travail de modélisation que nous avons effectué sur un moteur Diesel à injection indirecte, équipant les véhicules lourds, à 4 temps, 6 cylindres en ligne et développant une puissance maximale ISO de 260 kW. Ce moteur est équipé d'un turbocompresseur à géométrie variable. Par conséquent, on présente spécialement le modèle de la pression de suralimentation. Ce modèle MISO à 5 paramètres est présenté par l'équation (11):

$$y(t) = y(t-1) \left\{ a_1 u_1^3(t-1) + a_2 u_1^2(t-1) + a_3 u_2(t-1) e(t-1) \right\} + a_4 y(t-2) u_3(t-1) e(t-1) + c_1 e^2(t-1) + e(t) \quad (11)$$

La figure 6 montre les résultats de simulation de la pression de suralimentation 'P2' en fonction de la position du cran de combustible 'CRMV', la vitesse de rotation du moteur 'Nm' et la position de la géométrie variable 'GV' du turbocompresseur. La technique d'identification adoptée est celle décrite dans [22]. Nous considérons ces résultats comme très satisfaisants aussi bien sur le plan de la précision, de la capacité prédictive que de la parcimonie (seulement 5 paramètres). La validation de ce modèle a

exploité deux types de test: le premier utilise les fonctions de corrélation pour les modèles non linéaires définies dans [23], et le second s'appuie sur le test statistique χ^2 dont les détails sont présentés dans [15]. Le temps de simulation

d'un transitoire de 40 secondes sur un micro-ordinateur Pentium II 350 MMX n'excède pas la milliseconde.

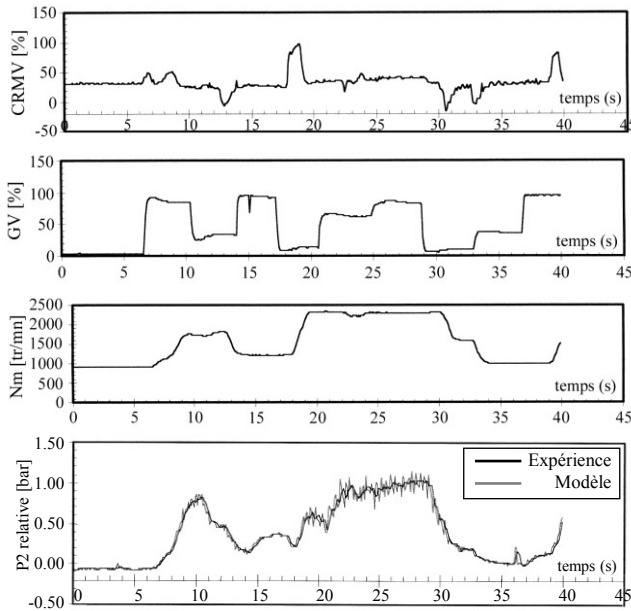


Figure 6: Résultats de simulation non linéaire de la pression de suralimentation 'P2' en fonction du régime moteur 'Nm', de la position 'GV' et de la position du cran de combustible 'CRMV' d'un Diesel à injection directe, de traction de véhicule lourd, de puissance nominale 260 kW. Modèle défini par l'équation (11).

CONCLUSION

Dans cet article, nous avons présenté les principales approches utilisées dans l'automatique avancée pour modéliser les systèmes non linéaires.

Quelques commentaires ont permis de faire émerger le modèle NARMAX. Celui-ci représente l'extension au cas non linéaire du modèle ARMAX très largement utilisé en linéaire. Il ressort également que le modèle NARMAX peut être considéré comme une généralisation des autres modèles non linéaires. Quelques exemples d'illustration montrent la puissance de ce modèle. Elle s'exprime par son degré de précision, sa capacité prédictive qui s'est révélée excellente dans de larges domaines de fonctionnement des moteurs modélisés, ainsi que sa parcimonie.

Enfin, il est recommandé d'exploiter la forme polynomiale du NARMAX afin de bénéficier de quelques techniques et outils d'estimation bien maîtrisés dans le domaine linéaire. Cependant, l'approche utilisée pour identifier sa structure devra faire l'objet d'une analyse critique qu'on développera ultérieurement puisqu'un même phénomène modélisé à l'aide du NARMAX peut être représenté par des modèles équivalents mais structurellement différents selon l'approche considérée.

BIBLIOGRAPHIE

[1]- Billings S.A., "Identification of non linear systems, a survey", *IEE Proc., Pt.D*, N°6, Nov. (1980), pp. 272-285.
 [2]- Billings S.A., Leontaritis I.J., "Parameter estimation techniques for non linear systems", 6th IFAC Symp., Identification and system parameter estimation, Washington, DC, 1982.

[3]- Chen S., Billings S.A., "Prediction error estimation algorithm for non linear output systems", *Int. J. Control*, 47 (1989), pp. 309-332.
 [4]- Jhorgn Chou, Ing-Rong Horgn, "Parameter identification of non linear systems via shifted Chebyshev series", *Int. J. Systems Sci.*, 18, N°5 (1987), pp. 895-900.
 [5]- Richalet, Rault, Pouliquen, "Identification des processus par la méthode du modèle", Gordon & Breach, (1980).
 [6]- Chen S., Billings S.A., "Représentation of non linear systems: The NARMAX model", *Int. J. Control*, 49 (1989), pp. 1013-1032.
 [7]- Neyran B., Paskiewicz D., Laggoune N., Thomasset D., Gilles G., "Différentes approches pour la modélisation et la commande non linéaires d'un procédé chimique pilote", *RAIRO-APII*, 23, N°6 (1989), pp.543-572.
 [8]- Neyran B., "Identification et commande en temps discret des systèmes linéaires à paramètres variables en utilisant des modèles à état-affine", Thèse de Doctorat de L'INSA de Lyon, Juillet (1987).
 [9]- Liazid A., Champoussin J.C., Younes R., "Modèle à état-affine en temps discret des émissions gazeuses d'un diesel suralimenté", *Entropie*, N°182 (1994), pp. 3-11.
 [10]- Billings S.A., Fadzil M.B., "The practical identification of non linear systems", IFAC Symp. Identification syst. Part. Est. York (1985), pp. 155-160.
 [11]- Leontaritis I.J., Billings S.A., "Input-Output parameter models for non linear systems. Part I: deterministic non linear systems", *Int. J. Control*, 41, N°2 (1985), pp. 303-328.
 [12]- Billings S.A., Chen S., Korenberg M.J., "Identification of MIMO non linear systems using a forward regression orthogonal estimateur", *Int. J. Control*, 49, N°6 (1989), pp. 2157-2189.
 [13]- Dan Van Mien H., Cyrot N.D., "Non linear state affine identification methods. Application to electrical power plants", IFAC Symposium on Aut. Control on power generation, distribution and protection, Pretoria, 449-462. *Automatica*, 20, N°2 (1984), pp. 175-188.
 [14]- Billings S.A., Fadzil M.B., Sulley J.L., Johnston P.M., "Identification of non linear difference equation model of an industrial diesel generator", *Mechanical systems and processing*, 2 (1988), pp. 59-76.
 [15]- Chen S., Billings S.A., Cowan C.F.N., Grant P.M., "Practical identification of NARMAX models using radial basis functions", *Int. J. Control*, 52, N°6 (1990), pp. 1327-1350.
 [16]- Sontag E.D., "Realization theory of discrete-time systems from input-output data", IFAC, 10th Triennial World Congress, Munich, FRG (1987).
 [17]- Sontag E.D., "Realization of discrete-time non linear systems. Part I, the bounded case", *IEEE Trans. On circuits and systems*, 26 (1979), pp. 342-356.
 [18]- Sontag E.D., "Polynomial reponse maps", Lectures notes in control and information science, 13, Berlin: Springer-Verlag (1979).
 [19]- Diaz H., Desrochers A.A., "Modeling of non linear discrete-time systems from input-output data", IFAC, 10th Triennial World Congress, Munich, FRG (1987).
 [20]- Billings S.A., Chen S., Korenberg M.J., "The identification of linear and nonlinear models of turbocharged automotive diesel engine", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 3 (1989), pp. 123-142.
 [21]- Rachid A., Liazid A., Champoussin J.C., "Non linear modelling of a turbocharged diesel engine", The 3rd IEEE Conference on control applications, Vol. I, 133-136, The University of Strath Clyde, Glasgow, Scotland U.K, August (1994).
 [22]- Liazid A., Rachid A., Champoussin J.C., "Modèle NARMAX des émissions gazeuses d'un diesel en régime transitoire", *RAIRO-APII*, Vol.27, N°6 (1993), pp. 645-667.
 [23]- Billings S.A., Voon W.S.F., "Correlation based model validity teste for non linear models", *Int. J. Control*, 44 (1986), pp. 235-244. □

