



**HAL**  
open science

# Méthode à erreur de sortie pour l'identification en boucle fermée des paramètres dynamiques d'un robot à flexibilité localisée, sans mesure de flexibilité

A. Jubien, M. Gautier, A. Janot, P.O. Vandanjon

## ► To cite this version:

A. Jubien, M. Gautier, A. Janot, P.O. Vandanjon. Méthode à erreur de sortie pour l'identification en boucle fermée des paramètres dynamiques d'un robot à flexibilité localisée, sans mesure de flexibilité. 7e Conférence internationale d'Automatique francophone (CIFA 2012), Jul 2012, GRENOBLE, France. hal-01061188v1

**HAL Id: hal-01061188**

**<https://onera.hal.science/hal-01061188v1>**

Submitted on 5 Sep 2014 (v1), last revised 27 Jul 2022 (v2)

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Méthode à erreur de sortie pour l'identification en boucle fermée des paramètres dynamiques d'un robot à flexibilité localisée, sans mesure de flexibilité

A. Jubien<sup>\*\*\*</sup>, M. Gautier<sup>\*</sup>, A. Janot<sup>\*\*</sup>, P.O. Vandanjon<sup>\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup> Université de Nantes, Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes, France.

<sup>\*\*</sup> Office National d'Etude et de Recherche Aérospatiale -the french aerospace lab- DCSD, Toulouse, France

<sup>\*\*\*</sup> Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux, Bouaye, France

---

**Résumé:** Ce papier présente une nouvelle méthode à erreur de sortie en deux étapes pour l'identification en boucle fermée des paramètres inertiels, de frottements et de raideur d'un axe de robot avec flexibilité articulaire localisée. Cette méthode utilise uniquement l'effort et la position du moteur, sans aucune mesure de flexibilité. La première étape identifie la fréquence du mode rigide asservi et la fréquence du mode flexible à entrée bloquée, en utilisant un modèle haute fréquence double intégrateur du robot. L'identification utilise une méthode à erreur de sortie sur la position du moteur. Ces deux paramètres de fréquence optimaux sont ensuite utilisés dans la deuxième étape pour l'identification des paramètres dynamiques du robot par une méthode à erreur de sortie sur l'effort moteur. Cette méthode récente (*DIDIM*) qui utilise les modèles d'identification directe et inverse du robot permet d'obtenir une convergence des paramètres très rapide et insensible aux conditions initiales. Une validation expérimentale sur un robot un axe montre l'efficacité de la nouvelle méthode comparée à deux méthodes à erreur de sortie classiques.

---

## 1. INTRODUCTION

Des modèles dynamiques de robots précis sont nécessaires pour contrôler et simuler leurs mouvements. La modélisation et l'identification dynamique des robots rigides ont été largement étudiées ces dernières décennies. La méthode usuelle utilise le Modèle Dynamique Inverse (*MDI*) qui est linéaire par rapport aux paramètres. Ces derniers sont identifiés à l'aide des moindres carrés ordinaires ou pondérés (*OLS-WLS*). Cette méthode, appelée *IDIM-LS* (Inverse Dynamic Identification Model with Least Squares), a été appliquée avec succès sur plusieurs robots (Khosla et Kanade 1985) (Atkeson et al. 1986) (Gautier 1997) (Janot et al. 2007) (Khalil & Dombre 2002) parmi d'autres.

L'identification des robots à flexibilités localisées est plus complexe dans le cas où seules les variables articulaires actionnées sont mesurées (Spong 1987). Ceci peut être résolu par l'ajout de capteurs (Pfeiffer & Holz 1995) et/ou d'excitations externes (Albu-Schaffer & Hirzinger 2001).

Dans (Östring et al. 2003), l'identification de la flexibilité articulaire et structurelle d'un axe de robot industriel est effectuée grâce à la boîte à outils *System Identification* du logiciel *Matlab* (Ljung 1999) (Ljung 2000). L'approche est intéressante car les paramètres inertiels et la raideur semblent bien identifiés. Mais les auteurs ne discutent pas de la répartition des frottements secs et du filtrage des mesures. Dans (Janot et al. 2011), une comparaison rigoureuse de trois modèles d'identification développés dans (Pham et al. 2001) et (Pham et al. 2002) est effectuée. Bien que ces techniques donnent des résultats intéressants, elles nécessitent soit la mesure des variables de flexibilité, soit l'estimation des dérivées d'ordre élevé de la position moteur (1 à 4) et de l'effort moteur (1 à 2).

Récemment, une nouvelle méthode d'identification dynamique, la méthode *DIDIM* (Direct and Inverse Dynamic Identification Model) a été validée sur les robots rigides (Gautier et al. 2011a). Cette dernière nécessite seulement la

mesure des efforts moteurs. Dans ce papier cette méthode est étendue au cas d'un robot à flexibilité localisée. Une précédente approche a été présentée dans (Gautier et al. 2011c) : les paramètres sont identifiés par moindres carrés non linéaires avec la méthode du Simplex de Nelder-Mead. Ceux-ci sont bien identifiés mais l'algorithme est sensible à l'initialisation et converge lentement.

Ce papier présente une nouvelle méthode à erreur de sortie pour l'identification en boucle fermée des paramètres dynamiques d'un robot avec une flexibilité articulaire localisée. Cette méthode utilise uniquement l'effort et la position du moteur, sans aucune mesure de flexibilité. Une première étape identifie la fréquence du mode rigide asservi et la fréquence du mode flexible à entrée bloquée, en utilisant un modèle haute fréquence double intégrateur du robot. L'identification utilise une méthode à erreur de sortie sur la position du moteur avec calcul de la solution optimale par optimisation non linéaire classique (ex : méthode du Simplex). Ces deux paramètres de fréquence optimaux sont ensuite utilisés dans la deuxième étape pour l'identification des paramètres dynamiques du robot par une méthode à erreur de sortie sur l'effort moteur. Cette méthode (*DIDIM*) qui utilise les modèles d'identification directe et inverse du robot permet d'obtenir une convergence des paramètres très rapide et insensible aux conditions initiales.

Ce papier est divisé en six parties. La deuxième partie décrit le robot expérimental étudié et sa modélisation. La troisième partie présente la méthode d'identification classique par modèle inverse et moindres carrés linéaires (*IDIM-LS*). La quatrième partie présente la méthode *DIDIM* pour l'identification des robots rigides et la cinquième partie présente la méthode *DIDIM* pour l'identification des robots à flexibilité localisée ainsi que l'identification des fréquences du mode rigide asservi et du mode flexible à entrée bloquée. L'identification expérimentale du robot avec la méthode *DIDIM* est effectuée en sixième partie.

## 2. MODELE DYNAMIQUE D'UN ROBOT A FLEXIBILITE LOCALISEE

### 2.1. Cas d'étude d'un axe de robot prismatique

Le système expérimental EMPS est composé d'un moteur à courant continu entraînant un chariot via une vis à bille (voir figure 1). Un accouplement flexible à lame relie l'axe du moteur à la vis à bille. Deux codeurs haute-résolution (12500 points par tour) mesurent la position du moteur  $q_1$  et la position du chariot  $q_{12}$  par rapport au bâti (voir figure 2).



Figure 1 : Le robot expérimental et l'accouplement flexible

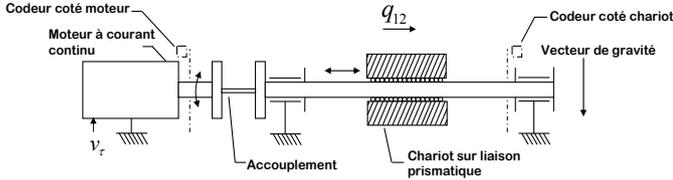


Figure 2 : Schéma de principe du bras EMPS

La position du moteur  $q_1$  est contrôlée par une loi de commande de type PD (proportionnel-dérivé). Les variables articulaires et les paramètres du robot sont exprimés en unités SI coté articulaire (coté chariot).

### 2.2. Modèle dynamique inverse du robot à flexibilité localisée

Le robot possède deux degrés de liberté (*ddl*): un *ddl* rigide  $q_1$  et un *ddl* flexible  $q_2$ . Dans le cas d'étude de ce papier, il n'est pas soumis à la gravité. Les paramètres mécaniques sont constitués de deux inerties, d'une raideur et des termes de frottements secs et visqueux (voir figure 3).

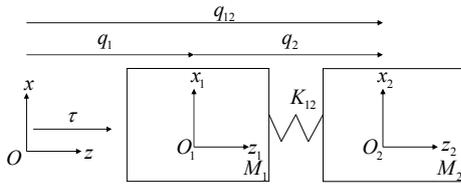


Figure 3 : Schéma du bras EMPS

Le *MDI* exprime l'effort moteur en fonction des variables articulaires et de ses dérivées :

$$\begin{aligned} \tau_{idm1} &= M_1 \ddot{q}_1 + F_{v1} \dot{q}_1 + F_{c1} \text{sign}(\dot{q}_1) - K_{12} q_2 \\ 0 &= M_2 \ddot{q}_{12} + F_{v2} \dot{q}_{12} + F_{c2} \text{sign}(\dot{q}_{12}) + K_{12} q_2 \end{aligned} \quad (1)$$

Où :  $\tau_{idm1}$  est l'effort moteur;  $(q_1, \dot{q}_1, \ddot{q}_1)$  sont respectivement la position, la vitesse et l'accélération du moteur (*ddl* rigide);  $(q_{12}, \dot{q}_{12}, \ddot{q}_{12})$  sont respectivement la position, la vitesse et l'accélération du chariot par rapport au bâti;  $(q_2, \dot{q}_2, \ddot{q}_2)$  sont respectivement la position, la vitesse et l'accélération du *ddl* flexible (chariot par rapport au moteur) avec  $q_{12} = q_1 + q_2$ ,

$\dot{q}_{12} = \dot{q}_1 + \dot{q}_2$  et  $\ddot{q}_{12} = \ddot{q}_1 + \ddot{q}_2$ ;  $M_1$  (Kg),  $F_{v1}$  (N/m/s) et  $F_{c1}$  (N) sont respectivement l'inertie, le frottement visqueux et le frottement sec coté moteur;  $M_2$  (Kg),  $F_{v2}$  (N/m/s) et  $F_{c2}$  (N) sont respectivement l'inertie, le frottement visqueux et le frottement sec coté chariot;  $K_{12}$  (N/m) est la raideur. L'inertie  $M_2$  regroupe les inerties de la vis, de l'écrou et du chariot. Il y a sept paramètres mécaniques à identifier.

Le *MDI* du robot s'écrit sous la forme matricielle :

$$\tau_{idm} = M(q) \ddot{q} + N(q, \dot{q}) + Kq \quad (2)$$

$$\text{avec } \tau_{idm} = \begin{pmatrix} \tau_{idm1} \\ 0 \end{pmatrix}, q = \begin{pmatrix} q_1 \\ q_{12} \end{pmatrix}, \dot{q} = \begin{pmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_{12} \end{pmatrix}, \ddot{q} = \begin{pmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_{12} \end{pmatrix},$$

$$M(q) = \begin{pmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{pmatrix}, N(q, \dot{q}) = \begin{pmatrix} F_{v1} \dot{q}_1 + F_{c1} \text{sign}(\dot{q}_1) \\ F_{v2} \dot{q}_{12} + F_{c2} \text{sign}(\dot{q}_{12}) \end{pmatrix}, K = \begin{pmatrix} K_{12} & -K_{12} \\ -K_{12} & K_{12} \end{pmatrix}$$

Le *MDI* (1) peut aussi être exprimé linéairement par rapport aux paramètres :

$$\tau_{idm} = IDM(q, \dot{q}, \ddot{q}) \chi \quad \text{avec } \tau_{idm} = \begin{pmatrix} \tau_{idm1} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$IDM = \begin{pmatrix} \ddot{q}_1 & \dot{q}_1 & \text{sign}(\dot{q}_1) & 0 & 0 & 0 & -q_2 \\ 0 & 0 & 0 & \ddot{q}_{12} & \dot{q}_{12} & \text{sign}(\dot{q}_{12}) & q_2 \end{pmatrix},$$

$$\chi = (M_1 \quad F_{v1} \quad F_{c1} \quad M_2 \quad F_{v2} \quad F_{c2} \quad K_{12})^T$$

### 2.3. Modèle dynamique direct du robot à flexibilité localisée

Le *MDI* (2) peut aussi s'écrire sous la forme d'une équation linéaire différentielle implicite qui exprime le Modèle Dynamique Direct (*MDD*):

$$M(q) \ddot{q} = \tau_{idm} - N(q, \dot{q}) - Kq \quad (4)$$

### 2.4. Modèle dynamique inverse du robot rigide

Pour un fonctionnement en basse fréquence, inférieure au premier mode flexible, on a:  $q_{12} = q_1$ . Les inerties et frottements coté moteur et coté chariot se regroupent:  $M_{tot} = M_1 + M_2$ ,  $F_{v_{tot}} = F_{v1} + F_{v2}$  et  $F_{c_{tot}} = F_{c1} + F_{c2}$ .

Le *MDI* (2) devient:

$$\tau_{idm1} = M_r \ddot{q}_1 + N_r(\dot{q}_1) \quad (5)$$

Où:  $M_r = M_{tot}$  et  $N_r(\dot{q}_1) = F_{v_{tot}} \dot{q}_1 + F_{c_{tot}} \text{sign}(\dot{q}_1)$ .

Ce modèle s'exprime sous une forme linéaire par rapport aux paramètres :

$$\tau_{idm1} = (\ddot{q}_1 \quad \dot{q}_1 \quad \text{sign}(\dot{q}_1)) (M_{tot} \quad F_{v_{tot}} \quad F_{c_{tot}})^T \quad (6)$$

### 2.5. Modèle dynamique direct du robot rigide

A partir de l'équation (5), le *MDD* du robot rigide s'écrit :

$$M_r \ddot{q}_1 = \tau_{idm1} - N_r(\dot{q}_1) \quad (7)$$

## 3. IDENTIFICATION PAR MODELE INVERSE ET MOINDRES CARRÉS (*IDIM-LS*)

L'effort moteur réel  $\tau$  diffère de l'effort moteur  $\tau_{idm}$  suivant une erreur  $e$  à cause des bruits de mesure et des erreurs de modèle:

$$\tau = \tau_{idm} + e = IDM(q, \dot{q}, \ddot{q})\chi + e \quad (8)$$

Les paramètres sont estimés par  $\hat{\chi}$ , solution au sens des moindres carrés linéaires du système surdéterminé construit après échantillonnage de (8):

$$Y = W\chi + \rho \quad (9)$$

Où  $Y$  est le vecteur (rx1) des mesures;  $W$  est la matrice (rxb) d'observation;  $\chi$  est le vecteur (bx1) des paramètres identifiables et  $\rho$  est le vecteur (rx1) des erreurs ( $r=n \times n_e$  avec  $n_e$  le nombre d'échantillons).

$\hat{\chi}$  est unique si la matrice  $W$  est de rang plein ( $rang(W) = b$ ). Pour cela il faut utiliser les paramètres de base  $\chi$  calculés dans (Gautier & Khalil 1990) et (Mayeda et al. 1990) ainsi que des trajectoires excitantes définies dans (Presse & Gautier 1993) (Gautier & Khalil 1991). Le calcul des écarts-types absolus  $\sigma_{\hat{\chi}^j}$  et relatifs  $\sigma_{\hat{\chi}^j}$  en % ( $= 100 \left| \sigma_{\hat{\chi}^j} / \hat{\chi}^j \right|$ ) (pour  $\hat{\chi}^j \neq 0$ ) est décrit dans (Gautier 1997). Les vitesses et accélérations dans (8) sont calculées par différence centrée après filtrage passe-bas des positions. Comme  $W$  est construite à partir de données bruitées,  $\hat{\chi}$  peut être biaisé. Pour diminuer le biais il est nécessaire de filtrer en parallèle le vecteur  $Y$  et les colonnes de  $W$ . Le filtrage est réalisé avec la fonction *decimate* du logiciel *Matlab*. Les procédures de filtrage sont détaillées dans (Gautier 1997), (Pham et al. 2001).

#### 4. IDENTIFICATION DES ROBOTS RIGIDES PAR MODELE D'IDENTIFICATION DIRECT ET INVERSE (DIDIM)

La méthode d'identification *DIDIM* (Gautier et al 2008) (Gautier et al 2011a) est une méthode à erreur de sortie en boucle fermée qui minimise la norme de l'erreur entre l'effort moteur réel  $y = \tau$  et l'effort moteur simulé  $y_s = \tau_{idm}$ . Le vecteur de paramètre optimal  $\hat{\chi}$  minimise le critère quadratique suivant:

$$J(\chi) = \|Y - Y_s\|^2 \quad (10)$$

Où  $Y$  et  $Y_s$  sont respectivement les vecteurs obtenus après échantillonnage et filtrage parallèle de  $y$  et  $y_s$ . Le problème des moindres carrés non linéaires est résolu par une méthode récursive de Gauss-Newton. On se base sur un développement de Taylor de  $y_s$  pour une estimation du vecteur de paramètres  $\hat{\chi}^k$  à l'itération  $k$ . Les variables articulaires et leurs dérivés sont très peu sensibles aux variations de  $\hat{\chi}^k$  car le robot simulé est contrôlé en boucle fermée avec la même loi de commande que celle implantée sur le robot réel :

$$\left( q_{ddm}(\hat{\chi}^k), \dot{q}_{ddm}(\hat{\chi}^k), \ddot{q}_{ddm}(\hat{\chi}^k) \right) \approx (q, \dot{q}, \ddot{q}) \quad (11)$$

Où  $\left( q_{ddm}(\hat{\chi}^k), \dot{q}_{ddm}(\hat{\chi}^k), \ddot{q}_{ddm}(\hat{\chi}^k) \right)$  sont des variables articulaires calculées par intégration du *MDD*. La matrice jacobienne de  $y_s$  par rapport à  $\chi$  est approchée par l'expression suivante:

$$\left( \frac{\partial(y_s)}{\partial\chi} \right)_{\hat{\chi}^k} \approx IDM \left( q_{ddm}(\hat{\chi}^k), \dot{q}_{ddm}(\hat{\chi}^k), \ddot{q}_{ddm}(\hat{\chi}^k) \right) \quad (12)$$

Ce qui conduit à l'expression :

$$y = \tau = IDM \left( q_{ddm}(\hat{\chi}^k), \dot{q}_{ddm}(\hat{\chi}^k), \ddot{q}_{ddm}(\hat{\chi}^k) \right) \chi^{k+1} + (o + e) \quad (13)$$

On retrouve le *MDI* où  $(q, \dot{q}, \ddot{q})$  sont estimés par  $(q_{ddm}, \dot{q}_{ddm}, \ddot{q}_{ddm})$ . Le système linéaire suivant est construit après échantillonnage et filtrage parallèle de (13) :

$$Y(\tau) = W_\delta \left( q_{ddm}, \dot{q}_{ddm}, \ddot{q}_{ddm} \hat{\chi}^k \right) \chi + \rho \quad (14)$$

$\hat{\chi}^{k+1}$  est solution des moindres carrés de (14). Le test d'arrêt utilise la relation :

$$\left( \|\rho_{k+1}\| - \|\rho_k\| \right) / \|\rho_k\| \leq tol_1 \quad (15)$$

Où  $tol_1$  réalise un compromis entre la rapidité de convergence et la précision des paramètres identifiés.

### 5. IDENTIFICATION DES ROBOTS A FLEXIBILITE LOCALISEE AVEC DIDIM

#### 5.1. Position du problème avec flexibilité

Pour identifier les paramètres avec la méthode *DIDIM*, il est nécessaire que l'approximation (12) soit vérifiée. Une des difficultés pour les systèmes flexibles est que le *ddl* flexible  $q_2$  n'est ni motorisé ni contrôlé. Ainsi, l'adaptation des gains présentée dans (Gautier et al 2011a) doit être modifiée. Considérons l'articulation contrôlée par un régulateur PD et présentée à la figure 4.

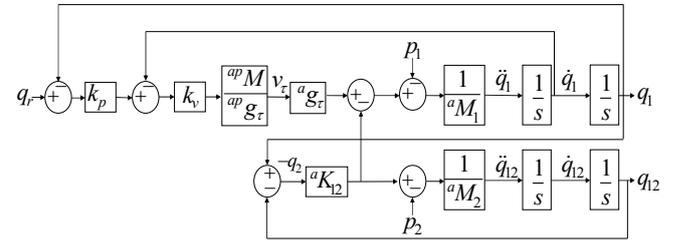


Figure 4 : Schéma du robot réel

Où:  ${}^{ap}g_\tau$  et  ${}^ag_\tau$  sont respectivement les gains d'actionnement *a priori* et réel (actuel);  $q_r$  est la position de référence;  ${}^aM_1$  et  ${}^aM_2$  sont respectivement les inerties réelles coté moteur et coté chariot;  ${}^aK_{12}$  est la raideur réelle;  $p_1$  et  $p_2$  sont des termes basse fréquence dus aux frottements :

$$p_1 = F_{v1}\dot{q}_1 + F_{c1}sign(\dot{q}_1) \text{ et } p_2 = F_{v2}\dot{q}_2 + F_{c2}sign(\dot{q}_2) \quad (16)$$

Pour l'étude en poursuite de la référence  $q_r$ , le terme  $p_1$  et l'effet du couplage flexible sur le *ddl* rigide sont considérés comme des perturbations ( $p_1 = 0$  et  $q_2 = 0$ ). Ceci conduit à contrôler le double intégrateur  $G/s^2$  avec  $G = k_v {}^{ap}M {}^ag_\tau / ({}^aM_1 {}^{ap}g_\tau)$

De la même façon, nous pouvons définir le double intégrateur en boucle ouverte,  $({}^aK_{12} / {}^aM_2) * (1/s^2)$ , du *ddl* flexible obtenu avec le *ddl* rigide bloqué ( $q_r = q_1 = 0$ ). Étudions ensuite l'articulation flexible du robot simulé de la figure 5 :

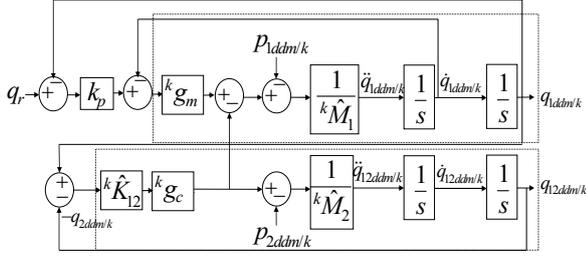


Figure 5 : Schéma du robot simulé

Où :  ${}^k\hat{M}_1$  et  ${}^k\hat{M}_2$  sont respectivement les inerties estimées coté moteur et coté chariot à l'itération  $k$ ;  ${}^k\hat{K}_{12}$  est la raideur estimée à l'itération  $k$ ;  $P_{1ddm/k}$  et  $P_{2ddm/k}$  sont des signaux basses fréquences dus aux frottements à l'itération  $k$ ;  ${}^k g_m$  et  ${}^k g_c$  sont les gains d'adaptation calculés à l'itération  $k$ . Les deux relations suivantes, calculées à chaque itération  $k$ , permettent de garder les mêmes doubles intégrateurs en boucle ouverte  $G/s^2$  du *ddl* rigide et  $({}^aK_{12}/{}^aM_2) * (1/s^2)$  du *ddl* flexible entre le robot réel et le robot simulé :

$${}^k g_m = G {}^k\hat{M}_1 \quad (17)$$

$${}^k g_c = \left( {}^k\hat{M}_2 / {}^k\hat{K}_{12} \right) \left( {}^aK_{12} / {}^aM_2 \right) \quad (18)$$

Dans ce cas les approximations  $q_{1ddm/k} \approx q_1$  et  $q_{12ddm/k} \approx q_{12}$  sont vérifiées à chaque itération  $k$  quelque soit la valeur de  $\hat{\chi}^k$ . On remarque qu'estimer  $({}^aK_{12} / {}^aM_2)$  revient à estimer  ${}^a f_{n\_flex}$ , le mode flexible à entrée bloquée ( $q_1 = 0$ ) :

$${}^a f_{n\_flex} = \sqrt{{}^aK_{12} / {}^aM_2} / (2\pi) \quad (19)$$

Le gain d'adaptation (18) devient :

$${}^k g_c = 4\pi^2 {}^a f_{n\_flex}^2 \left( {}^k\hat{M}_2 / {}^k\hat{K}_{12} \right) \quad (20)$$

Le calcul des gains d'adaptation (17) et (20) nécessite les estimations précises de  $G$  et du mode flexible à entrée bloquée  ${}^a f_{n\_flex}$ .

### 5.2. Etape 1 : identification du gain $G$ et du mode flexible à entrée bloquée

Les paramètres  $\hat{G}$  et  $\hat{f}_{n\_flex}$  sont identifiés par une méthode à erreur de sortie avec le modèle haute fréquence double intégrateur du robot. Le critère à minimiser est le suivant :

$$\left( \hat{G}, \hat{f}_{n\_flex} \right) = \min_{G, f_{n\_flex}} \left( \|q_{f1ddm} - q_{f1}\| / \|q_{f1}\| \right) \quad (21)$$

Où  $q_{f1}$  et  $q_{f1ddm}$  sont respectivement la position moteur réelle  $q_1$  et la position moteur simulée  $q_{1ddm}$  filtrées par un filtre passe-haut qui élimine les composantes basses fréquences dues aux frottements (inférieures à  $10.F_{v_{tot}} / (2\pi M_{tot})$  Hz) car ces derniers sont mis à zéro dans le simulateur. Cette étape correspond à identifier le modèle double intégrateur en hautes fréquences. Les paramètres du

robot sont bloqués dans le simulateur quelque soit l'itération  $k$ . Ils sont pris égaux à l'initialisation régulière  $\chi^0$  décrite dans (Gautier et al. 2011a) :

$${}^0M_1 = {}^0M_2 = {}^0K_{12} = I, {}^0F_{v1} = {}^0F_{v2} = {}^0F_{c1} = {}^0F_{c2} = 0 \quad (22)$$

Seuls les gains d'adaptation (17) et (20) sont actualisés à chaque itération  $k$  en fonction de  ${}^k\hat{G}$ ,  ${}^k\hat{f}_{n\_flex}$  et  $\chi^0$  (22) :

$${}^k g_m = {}^k\hat{G} \quad (23)$$

$${}^k g_c = 4\pi^2 {}^k\hat{f}_{n\_flex}^2 \quad (24)$$

La position simulée  $q_{1ddm/k}(\chi^0, {}^k\hat{f}_{n\_flex}, {}^k\hat{G})$  est solution de (4).

Les doubles intégrateurs en boucle ouverte  $1/s^2$  du *ddl* rigide et du *ddl* flexible sont identiques sur le robot réel et sur le robot simulé, aux valeurs optimales de  $\hat{G}$  et de  $\hat{f}_{n\_flex}$  près. L'optimisation non linéaire est réalisée avec la méthode du Simplex de Nelder-Mead qui n'utilise pas de dérivées et est robuste par rapport aux conditions initiales.

### 5.3. Etape 2 : Identification des paramètres dynamiques du robot flexible

La méthode *DIDIM* permet d'identifier les paramètres dynamiques du robot flexible. Les paramètres optimaux minimisent le critère quadratique (10). Les gains d'adaptations  ${}^k g_m$  et  ${}^k g_c$  sont actualisés à chaque l'itération  $k$  :

$${}^k g_m = {}^k\hat{M}_1 \hat{G} \quad (25)$$

$${}^k g_c = 4\pi^2 \hat{f}_{n\_flex}^2 \left( {}^k\hat{M}_2 / {}^k\hat{K}_{12} \right) \quad (26)$$

Où  $\hat{G}$  et  $\hat{f}_{n\_flex}$  sont les valeurs identifiées à l'étape 1. L'initialisation régulière (22) peut être utilisée. Une deuxième initialisation appelée initialisation pseudo-régulière est proposée dans (Gautier et al. 2011c) :

$${}^0M_1 = {}^0M_2 = \hat{M}_{tot} / 2, {}^0F_{v1} = {}^0F_{v2} = \hat{F}_{v_{tot}} / 2, {}^0F_{c1} = {}^0F_{c2} = \hat{F}_{c_{tot}} / 2 \quad (27)$$

Cette initialisation nécessite d'identifier le modèle dynamique rigide du robot avec la méthode *DIDIM*. Ce dernier n'est valable qu'aux basses fréquences, la fréquence de coupure du filtre *decimate* doit donc être fixée à une faible valeur (inférieure à 10Hz). Par la suite les deux initialisations sont testées et comparées.

Nous rappelons la procédure d'identification à la figure 6.

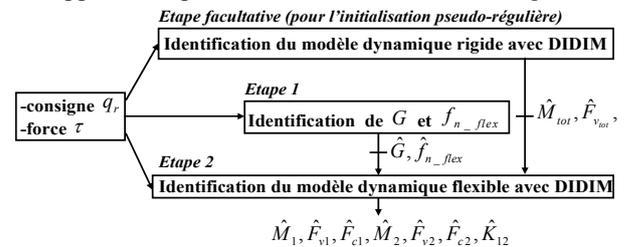


Figure 6 : Procédure d'identification

## 6. VALIDATION EXPERIMENTALE

### 6.1. Acquisition de donnée

La fréquence d'échantillonnage des positions et de la consigne est de 1000Hz. L'effort moteur est calculé par la

relation  $\tau_I = {}^{ap} g_\tau v_\tau$  avec  $v_\tau$  l'entrée de référence de l'amplificateur de courant et  ${}^{ap} g_\tau$  la valeur *a priori* du gain d'actionnement du moteur. Ce dernier est le gain statique de la boucle de courant dont la bande passante (700Hz) est très supérieure à la dynamique du robot (inférieure à 30Hz). La bande passante de la boucle fermée est fixée à 20Hz pour permettre d'identifier tous les paramètres du robot. La trajectoire de référence  $q_r$  est la somme d'un signal de type trapèze-vitesse intégré et d'un signal de position sinusoïdal wobulé de faible amplitude. Le signal en trapèze-vitesse excite les inerties et les frottements, le signal sinusoïdal wobulé excite la raideur.

### 6.2. Identification DIDIM du modèle dynamique rigide

Le filtre *decimate* est réglé à une fréquence de coupure de 5Hz. Nous utilisons l'initialisation régulière ( ${}^0M_{tot} = I$ ,  ${}^0F_{v_{tot}} = {}^0F_{c_{tot}} = 0$ ). Les gains sont actualisés dans le simulateur à chaque itération  $k$  (Gautier et al. 2008). Après deux itérations, les paramètres sont identifiés (voir tableau 1). Ces valeurs seront utilisées sections 6.3 pour le calcul de la fréquence de coupure du filtre passe-haut et section 6.5 pour l'initialisation pseudo-régulière.

Tableau 1: Résultats d'identification du modèle rigide

Paramètre	$\hat{\chi}^2$	$\sigma_{\hat{\chi}^2}(\%)$
$M_{tot}$ (Kg)	107	0.38
$F_{v_{tot}}$ (N/m/s)	209	1.8
$F_{c_{tot}}$ (N)	19.5	1.6
$\ Y - W.X\ /\ Y\ $	4.25%	

### 6.3. Identification IDIM-LS du modèle dynamique flexible

Une identification avec la méthode *IDIM-LS* est effectuée (Gautier et al. 2011c). Elle nécessite l'effort moteur  $\tau_I$ , la position moteur  $q_I$  et la position du chariot  $q_{I2}$ . Le MDI (3) est utilisé. La fréquence de coupure du filtre passe-bas est de 100Hz et celle du filtre *decimate* est de 5Hz. Les résultats présentés dans le tableau 3, servent de référence dans la comparaison aux autres méthodes.

### 6.4. Identification du gain $\hat{G}$ et du mode flexible $\hat{f}_{n\_flex}$

La fréquence de coupure du filtre passe-haut de la position est de 5Hz et la fréquence de coupure du *decimate* est de 60Hz. L'algorithme converge rapidement en 15 itérations (31 simulations du MDD). Le choix de l'initialisation n'est pas critique pour l'algorithme d'optimisation.  ${}^0\hat{G}$  peut être choisi entre 50 et 300 et  ${}^0\hat{f}_{n\_flex}$  entre 10 et 50Hz ce qui englobe le premier mode de flexibilité articulaire des robots industriels. Les résultats sont présentés dans le tableau 2.

Tableau 2: Résultats d'identification de  $\hat{G}$  et de  $\hat{f}_{n\_flex}$

	Initialisation	Valeurs identifiées
$\hat{G}$	100	187
$\hat{f}_{n\_flex}$	40	23.5

Pour les hautes fréquences, la position moteur simulée est très proche de la position moteur réelle (voir figure 7) avec une erreur relative de 2%.

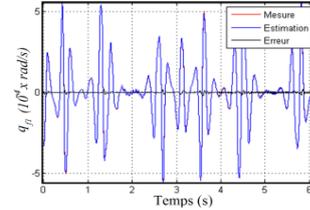


Figure 7 : Validation : rouge:  $q_{f1}$ , bleu:  $q_{f1dm}$ , noir: erreur

### 6.5. Identification DIDIM du modèle dynamique flexible

Deux identifications avec la méthode *DIDIM* sont effectuées, une avec l'initialisation régulière (22) (*DIDIM\_1*) et une avec l'initialisation pseudo-régulière (27) (*DIDIM\_2*). Les gains d'adaptation  ${}^k g_m$  (25) et  ${}^k g_c$  (26) sont actualisés à chaque itération en fonction de  $\hat{\chi}^k$ . Les valeurs de  $\hat{G}$  et de  $\hat{f}_{n\_flex}$  identifiées à la partie 6.4 sont utilisées. Les résultats sont regroupés dans le tableau 3 et comparés à ceux obtenus avec la méthode *IDIM-LS*. Grâce aux gains d'adaptation, l'algorithme converge en un nombre très faible d'itérations (3 seulement). Les inerties et la raideur ne sont pas sensibles à l'initialisation et leurs valeurs identifiées sont proches des valeurs *IDIM-LS*. Par contre les frottements se regroupent coté moteur pour l'initialisation régulière. Il n'est pas possible de les identifier séparément coté moteur et coté chariot pour ce premier essai à cause de l'absence des mesures de positions. Par contre leurs sommes restent correctes pour les deux essais. La méthode *DIDIM* montre son efficacité pour identifier les paramètres avec un faible temps de calcul et avec seulement la mesure de l'effort moteur.

Tableau 3: Résultats d'identification du modèle flexible

Méthode	<i>IDIM-LS</i>		<i>DIDIM 1</i>		<i>DIDIM 2</i>	
	$\hat{\chi}^3$	$\sigma_{\hat{\chi}^3}(\%)$	$\hat{\chi}^3$	$\sigma_{\hat{\chi}^3}(\%)$	$\hat{\chi}^3$	$\sigma_{\hat{\chi}^3}(\%)$
$M_I$ (Kg)	70.8	0.27	64.8	0.51	66.2	0.50
$F_{v_I}$ (N/m/s)	104	1.3	210	0.90	135	1.80
$F_{c_I}$ (N)	10.0	1.3	17.1	0.80	12.1	1.72
$M_2$ (Kg)	36.0	0.68	38.3	0.78	36.7	0.83
$F_{v_2}$ (N/m/s)	96.4	1.4	-	-	78.5	1.04
$F_{c_2}$ (N)	9.09	1.3	-	-	6.03	1.13
$K_{I2}$ (N/m)	$6.8 \cdot 10^5$	0.59	$8.4 \cdot 10^5$	0.78	$8.0 \cdot 10^5$	0.83
$F_{v_I} + F_{v_2}$	200	-	210	-	213.5	-
$F_{c_I} + F_{c_2}$	19.1	-	17.1	-	18.1	-
$\ Y - W.X\ /\ Y\ $	6.81%		9.12%		8.75%	

L'effort moteur estimé est très proche de l'effort moteur réel comme l'illustre la figure 8.

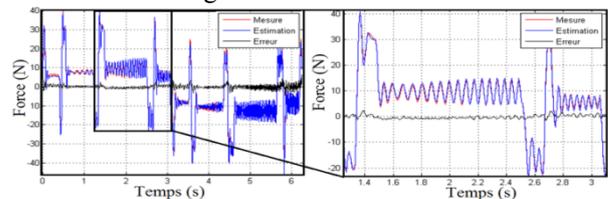


Figure 8 : Validation directe. Force mesurée, reconstruite et erreur

6.6. Comparaison avec une méthode d'identification classique à erreur de sortie sur la position moteur ou sur l'effort moteur

La méthode à erreur de sortie en boucle fermée utilise l'algorithme du Simplex de Nelder-Mead. L'implémentation se fait avec la fonction *fminsearch* du logiciel *Matlab*. Aucune adaptation de gains n'est effectuée. Deux critères sont testés, le premier (28) utilise la position moteur et le deuxième (29) utilise l'effort moteur :

$$C_{q_i} = \|q_{iddm} - q_i\| / \|q_i\| \quad (28)$$

$$C_{\tau} = \|\tau_{ddm} - \tau\| / \|\tau\| \quad (29)$$

Où  $q_{iddm}$  est la position moteur simulée;  $q_i$  est la position moteur mesurée;  $\tau_{ddm}$  est l'effort moteur simulé et  $\tau$  est l'effort moteur mesuré. Un filtrage parallèle à une fréquence de coupure de 60Hz est appliqué sur ces vecteurs. Les conditions initiales sur les paramètres sont issues de l'initialisation pseudo-régulière (27). La méthode est décrite dans (Gautier et al. 2011c). L'optimisation avec le critère  $C_{q_i}$  (28), converge en 172 itérations avec 276 simulations du MDD et l'optimisation avec le critère  $C_{\tau}$  (29) converge en 129 itérations avec 221 simulations du MDD. Les paramètres identifiés avec *DIDIM* sont très proches de ceux identifiés avec cette méthode (voir tableau 4) mais cette dernière demande un temps de calcul plus élevé et est sensible à l'initialisation des paramètres. Les résidus relatifs finaux avec  $C_{q_i}$  et  $C_{\tau}$  sont respectivement de 7.38% et 6.63%.

Tableau 4: Résultats d'identification avec une méthode à erreur de sortie sur la position

Critère	$C_{q_i}$		$C_{\tau}$	
	$\hat{\chi}^{172}$	$\sigma_{\hat{\chi}^{172}}$ en %	$\hat{\chi}^{129}$	$\sigma_{\hat{\chi}^{129}}$ en %
$M_1$ (Kg)	67.1	0.27	64.1	0.25
$F_{v1}$ (N/m/s)	76.5	1.9	126	0.97
$F_{c1}$ (N)	12.1	0.98	13.2	0.80
$M_2$ (Kg)	37.8	0.52	40.1	0.44
$F_{v2}$ (N/m/s)	135	1.1	84.6	1.4
$F_{c2}$ (N)	6.40	1.9	5.21	2.1
$K_{12}$ (N/m)	$7.6810^5$	0.43	$8.7510^5$	0.37
$F_{v1} + F_{v2}$	212	-	211	-
$F_{c1} + F_{c2}$	18.5	-	18.4	-

## 7. CONCLUSION

Dans ce papier, nous avons proposé une nouvelle méthode à erreur de sortie pour l'identification des paramètres dynamiques d'un robot un axe à flexibilité articulaire localisée. Elle se déroule en deux étapes et nécessite uniquement l'effort et la position du moteur. La mesure de flexibilité n'est pas nécessaire. Les résultats expérimentaux obtenus montrent la rapidité de convergence de la méthode (34 simulations du MDD pour les 2 étapes) alors que les autres méthodes nécessitent un temps de calcul plus élevé (au moins 221 simulations du MDD). De plus, les résultats

obtenus sont proches de ceux obtenus avec la méthode *IDIM-LS* qui nécessite les mesures de flexibilités.

Cette performance est principalement due au fait que deux gains sont actualisés lors de la simulation du robot durant la deuxième étape. Ces gains permettent de conserver sur le simulateur les modes rigide et flexible à entrée bloquée du robot réel, identifiés durant la première étape. Les travaux futurs portent sur l'application de cette méthode sur un robot multiaxe avec flexibilité articulaire.

## REFERENCES

- Albu-Schaffer, A. & Hirzinger, G., 2001. Parameter identification and passivity based joint control for a 7 DOF torque controlled light weight robot. In *Proc. ICRA Robotics and Automation IEEE Int. Conf.* pp. 2852–2858.
- Atkeson, C., An, C. & Hollerbach, J., 1986. Estimation of Inertial Parameters of Manipulator Loads and Links. *International Journal of Robotics Research*, 5(3), pp.101-119.
- Gautier, M., 1997. Dynamic identification of robots with power model. In *Proc. Conf. IEEE Int Robotics and Automation*. pp. 1922–1927.
- Gautier, M. & Khalil, W., 1990. Direct calculation of minimum set of inertial parameters of serial robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 6(3), pp.368–373.
- Gautier, M. & Khalil, W., 1991. Exciting trajectories for the identification of base inertial parameters of robots. In *Proc. 30th IEEE Conf. Decision and Control*. pp. 494–499.
- Gautier, M., Janot, A. & Vandanjon, P.O., 2008. DIDIM: A new method for the dynamic identification of robots from only torque data. In *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation ICRA 2008*. pp. 2122–2127.
- Gautier, M., Vandanjon, P.O. & Janot, A., 2011a. Dynamic identification of a 6 dof robot without joint position data. In *Proc. IEEE Int Robotics and Automation*. Shanghai, Chine, pp. 234–239.
- Gautier, M., Janot, A., Jubien, A. & Vandanjon, P.O., 2011c. Joint Stiffness Identification from only Motor Force/Torque Data. In *Proc. IEEE Int. Conf. on Decision and Control, Orlando, USA, accepted*.
- Janot, A., Bidard, C., Gosselin, F. & Gautier, M., 2007. Modeling and Identification of a 3 DOF Haptic Interface. In *Proc. IEEE Int Robotics and Automation Conf.* pp. 4949–4955.
- Janot, A., Gautier, M., Jubien, A. & Vandanjon, P.O., 2011. Experimental Joint Stiffness Identification Depending on Measurements Availability. In *Proc. IEEE Int. Conf. on Decision and Control*. Orlando, USA, accepted.
- Khalil, W. & Dombre, E., 2002. *Modeling, Identification and Control of Robots*, Taylor and Francis Group, New York, 3rd edition.
- Khosla, P. & Kanade, T., 1985. Parameter identification of robot dynamics. In *Proc. 24th IEEE Conf. Decision and Control*. pp. 1754–1760.
- Ljung, L., 2000. *System identification toolbox—user's guide*, Sherborn, MA, USA: The MathWorks Inc.
- Ljung, L., 1999. *System Identification: Theory for the User*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA, 2nd edition.
- Mayeda, H., Yoshida, K. & Osuka, K., 1990. Base parameters of manipulator dynamic models. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 6(3), pp.312–321.
- Östring, M., Gunnarsson, S. & Norrlöf, M., 2003. Closed-loop identification of an industrial robot containing flexibilities. *Control Engineering Practice*, 11, pp.291-300.
- Pfeiffer, F. & Holzl, J., 1995. Parameter identification for industrial robots. In *Proc. Conf. IEEE Int Robotics and Automation*. pp. 1468–1476.
- Pham, M.T., Gautier, M. & Poignet, P., 2001. Identification of joint stiffness with bandpass filtering. In *Proc. IEEE Int Robotics and Automation Conf.* Séoul, Corée, pp. 2867-2972.
- Pham, M.T., Gautier, M. & Poignet, P., 2002. Accelerometer based identification of mechanical systems. In *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*. Washington, USA, pp. 4293–4298.
- Presse, C. & Gautier, M., 1993. New criteria of exciting trajectories for robot identification. In *Proc. Conf. IEEE Int Robotics and Automation*. Altanta, USA, pp. 907–912.
- Spong, M.W., 1987. Modeling and control of elastic joint robots. *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, 109(4), pp.310-319.